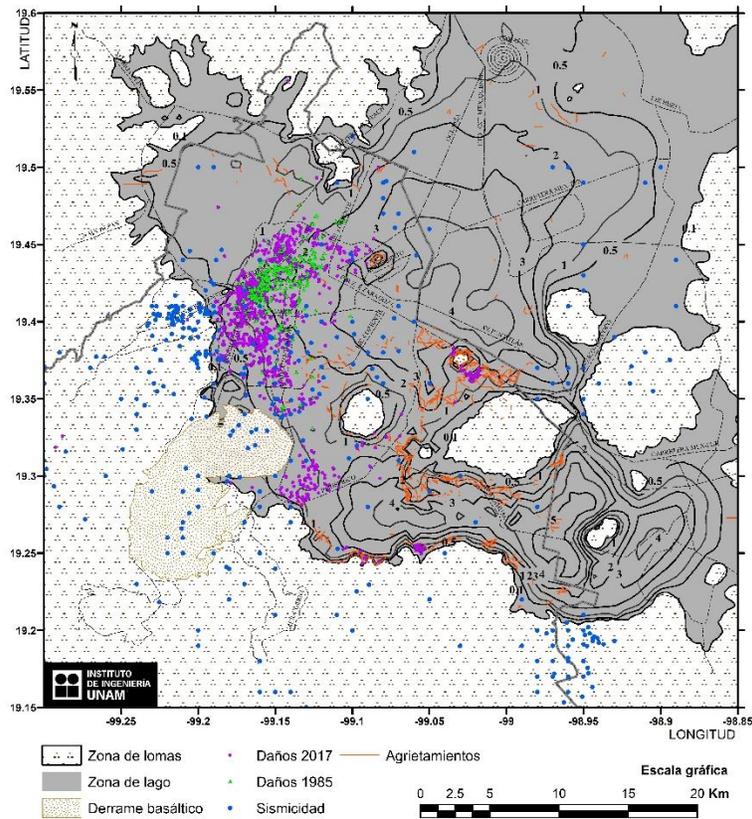




# ACTUALIZACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ÁREAS ALEDAÑAS-PARTE NORTE

(INFORME TÉCNICO)



NO. DE CONVENIO ISCDF/CEC-04/2020-13

Trabajo realizado por:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Diciembre, 2020

# ACTUALIZACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ÁREAS ALEDAÑAS-PARTE NORTE

(INFORME TÉCNICO)

Trabajo realizado por:

**Responsables Proyecto:** Javier Francisco Lermo Samaniego<sup>1</sup>

**Asesor Académico:** Francisco José Sanchez-Sesma<sup>1</sup>

**Colaboradores:** Erick Ramos Pérez<sup>1</sup>

Iván Álvarez Monroy<sup>1</sup>

Nallely Jiménez Méndez<sup>1</sup>

Rogelio Torres Cuenca<sup>1</sup>

Omar Rodrigo Machado González<sup>1</sup>

**Procesado, análisis e interpretación de datos:** Navil Annahí Téllez Rodríguez<sup>1</sup>

Isabel Luna Cruz<sup>2</sup>

Noé Crespo Gonzalez<sup>2</sup>

Diego López Maldonado<sup>3</sup>

Omar Huerta Espinoza<sup>3</sup>

Karina Yehemi Castañeda González<sup>1</sup>

**Trabajo de campo:** Juan Israel Luna Cruz<sup>1</sup>

Héctor Lorenzo González<sup>1</sup>

Jesús Fernando Pérez Aragon<sup>1</sup>

Juan Félix Luna Méndez<sup>1</sup>

Para:

**GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO  
INSTITUTO PARA LA SEGURIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES  
EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

*José María Izazaga 89, Centro, C.P. 06080*

*Alcaldía Cuauhtémoc*

*No. De Páginas 97*

<sup>1</sup> Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería-UNAM; CD. Universitaria, Apdo. Postal 70-472, Coyoacán 04510 CDMX. E-mail: [jlermos@iingen.unam.mx](mailto:jlermos@iingen.unam.mx)

<sup>2</sup> Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Zacatenco, IPN.

<sup>3</sup> Instituto de Geofísica, UNAM; CD. Universitaria, Apdo. Postal 70-472, Coyoacán 04510 CDMX.

## Contenido

1.	Introducción .....	6
1.1	Objetivos .....	8
2.	Antecedentes .....	9
2.1	Ubicación de la zona de estudio .....	9
2.2	Morfología.....	10
2.3	Geología y Tectónica.....	11
2.4	Zonificación geotécnica.....	13
2.5	Zonificación sísmica.....	16
3.	Ruido sísmico.....	18
3.1	Medición de microtemores.....	18
3.2	Procesamiento del ruido sísmico para obtener el cociente espectral H/V .....	19
3.3	Información para el mapa de periodo dominante .....	20
3.4	Información para el mapa de amplificación relativa .....	21
3.5	Información para el mapa de espesor.....	22
4.	Mapas de la Ciudad de México y áreas aledañas .....	23
4.1	Mapa de periodo dominante .....	23
4.2	Mapa de amplificación relativa .....	27
4.3	Mapa de espesor del suelo .....	29
5.	Microzonificación sísmica por alcaldías.....	31
5.1	Álvaro Obregón.....	33
5.2	Azcapotzalco .....	38
5.3	Benito Juárez.....	41
5.4	Coyoacán.....	44
5.5	Cuajimalpa de Morelos.....	48
5.6	Cuauhtémoc.....	50
5.7	Gustavo A. Madero .....	53
5.8	Iztacalco .....	57
5.9	Iztapalapa .....	60
5.10	La Magdalena Contreras.....	64
5.11	Miguel Hidalgo .....	65
5.12	Milpa Alta .....	69
5.13	Tláhuac .....	70
5.14	Tlalpan .....	75
5.15	Venustiano Carranza .....	78

5.16	Xochimilco .....	82
6.	Conclusiones .....	88
7.	Recomendaciones .....	90
8.	Agradecimientos .....	90
9.	Bibliografía .....	91
10.	Anexo C. Información de periodos dominantes por alcaldía. ....	95

## Resumen

Este trabajo es la continuación de estudios que este equipo ha venido haciendo desde hace casi treinta años. Debe señalarse que se trata de un trabajo continuo pues muchos de los colaboradores se han graduado con estudios alineados con este objetivo mayor: conocer la estructura del subsuelo de la Ciudad de México.

En este trabajo se describen mediciones de ruido sísmico en diversas alcaldías de la CDMX, exceptuando las de la zona sur en donde las amplificaciones sísmicas no son generalizadas. Parece existir suficiente información para hacer la zonificación a menor escala. El estudio propone mapas de microzonificación sísmica de 16 alcaldías de la CDMX. Estos tienen un carácter provisional pues se requieren estudios adicionales para establecer sus incertidumbres.

Se espera que estos resultados incidan en la mejora de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS). La zonificación actual debería ser más precisa. Por otra parte, los Atlas de Peligros y Riesgos (CENAPRED, 2016) contemplan estudios adicionales detallados. Es en este rubro que las propuestas presentadas contribuyen a mejorar esos Atlas.

La microzonificación es siempre de naturaleza preliminar pues se ignora tanto la ocurrencia como las características de los sismos futuros. Para estimar el peligro sísmico se cuenta con modelos de sismicidad y modelos semiempíricos de amplificación local, los que tienen incertidumbres reconocidas. Para afinar las estimaciones que mejoren la comprensión del fenómeno sísmico y sus implicaciones se miden parámetros obtenidos directa e indirectamente por medio de las mediciones de ruido sísmico, incluyendo el cociente espectral H/V para construir mapas que son la materialización de la microzonificación por alcaldías. Los mapas de interés son los de (1) periodo dominante, (2) espesor del suelo y, en menor medida, (3) la amplificación relativa.

Este estudio toma en cuenta la información disponible de la geología local como los agrietamientos, inducidos por la consolidación regional o subsidencia, en zonas de transición abrupta como los límites de los derrames volcánicos y formaciones arcillosas que han dado lugar a daños en amplias zonas.

De manera cualitativa se abordan los daños de los sismos de 1985 y de 2017, que afectaron áreas distintas de la ciudad, así como los enjambres de sismos locales que pueden ser muy intensos. En todos los casos se resalta la importancia de la microzonificación. En el futuro habrá que extender las evaluaciones a la Zona de Lomas. Hay estructuras geológicas y artificiales que se deben analizar. Los estudios preliminares deben ampliarse para evaluar la respuesta en la Zona de Lomas.

La respuesta sísmica de la cuenca requiere de modelos fidedignos para predecir el movimiento del suelo asociado a sismos de distinto origen para evaluar el peligro, coadyuvar al diseño y contribuir a mitigar el riesgo sísmico.

## 1. Introducción

La Ciudad de México se ubica en la parte central del territorio mexicano, en la denominada “Cuenca del Valle de México”, en la que se han establecido asentamientos humanos desde hace más de 2000 años. Debido a las características particulares de la Cuenca (rodeada de sierras y volcanes, y con cinco lagos en su interior) a lo largo del tiempo se han presentado fenómenos naturales, que afectaron el desarrollo de las poblaciones, como erupciones volcánicas, inundaciones y terremotos.

Hace aproximadamente 2000 años el volcán Xitle, ubicado al sur de la Cuenca en las laderas del volcán Ajusco, hizo erupción produciendo derrames basálticos que cubrieron un área aproximada de 70 km<sup>2</sup> y que se depositaron en gran parte sobre los suelos lacustres en las alcaldías Tlalpan, Coyoacán y Álvaro Obregón. La erupción del Xitle obligó a diversas poblaciones que habitaban el sur de la Cuenca, entre ellas las poblaciones de Cuicuilco y Copilco, a emigrar hacia el norte. Este depósito basáltico se conoce ahora como “El Pedregal”.

Debido al ambiente lacustre dentro de la Cuenca, en la historia de la Ciudad se han presentado inundaciones que provocaron severos daños a la Ciudad. Algunas de las más grandes inundaciones fueron las de 1629 y 1856. Por este motivo, se decidió desecar los grandes lagos y, por lo tanto, se realizó el Tajo de Nochistongo para evacuar las aguas hacia el norte. Por este motivo, la población de la Ciudad se extendió hacia los terrenos del antiguo lago.

El incremento de la población y de los asentamientos ha ocasionado otros problemas dentro de la Cuenca. A principios del siglo XX se incrementó la perforación de pozos para la extracción de agua y satisfacer la demanda de la población. Esto, aunado a la poca recarga de los mantos acuíferos, ha dado lugar al fenómeno de subsidencia que se refiere a los hundimientos graduales o súbitos de la superficie. En 1925, el ingeniero Roberto Gayol, autor del proyecto y director de las obras de drenaje de la ciudad, informa sobre el “descenso general del fondo del Valle”, presentando como primera evidencia de ese fenómeno, el asentamiento que acusaba la Catedral en esa fecha respecto al banco fijo de Atzacolco. Nabor Carrillo demuestra que la causa principal del hundimiento es el abatimiento de las presiones piezométricas que provoca la extracción de agua subterránea. Tales hundimientos han propiciado la generación de grietas en el valle, principalmente en las alcaldías de Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco (Martínez-González, 2011; Marsal y Mazari, 2016).

Otro de los fenómenos naturales que más daños ha causado en la Ciudad de México desde la época prehispánica son los terremotos. Debido a los suelos lacustres del Valle de México, el movimiento del terreno y el tiempo de duración del sismo se amplifican teniendo una mayor probabilidad de que las construcciones sufran daños severos por los terremotos. Los sismos que históricamente han afectado a la Ciudad son de dos tipos; sismos de subducción generados en las costas del pacífico y sismos intraplaca generados dentro de la placa norteamericana. Algunos de los sismos de subducción de mayor magnitud producidos durante este siglo, son el conocido como temblor de Madero de 1911 (magnitud 7.7; intensidad en la Ciudad de México cercana a la de 1985), el de Jalisco en 1932 (magnitud 8.2; intensidad MM en la Ciudad de México, quizá hasta VIII) y el de Acapulco en 1957 (magnitud 7.5; intensidad MM en la Ciudad de México hasta VIII). Entre los sismos intraplaca destaca el de Acambay de 1912 que se originó aproximadamente a 70 km de la Ciudad. Además, ocurren multitud de sismos de origen local en el Valle de México que causan daños menores y muy localizados (Lermo *et al.*, 2016, Jaimes *et al.*, 2016).

El sismo de 1941 fue el primero que encontró en la Ciudad edificios de estilo casi moderno, por lo que los daños causados en las construcciones propiciaron la elaboración del reglamento de 1942, que

fue el primero en la Ciudad en tener disposiciones de diseño sísmico. El sismo de 1957 causó graves daños en la Ciudad, debido a las construcciones de estilo moderno y al aumento de la población en las zonas vulnerables, por lo que se elaboraron las normas de emergencia. Hasta 1966 se publica el nuevo reglamento y en 1976 se publica otro. En ellos, sobre todo el segundo, se avanza significativamente en métodos generales de análisis, métodos que son capaces de cubrir casi cualquier estilo de construcción, y se avanza en la zonificación de la Ciudad en función del tipo de suelo de cada sitio. Sin embargo, se conservó la errónea idea de que no había que diseñar para perturbaciones mucho más intensas que el temblor del 28 de julio de 1957 ([Rosenblueth et al., 1992](#)).

El gran sismo del 19 de septiembre de 1985,  $M_w 8.1$  y sus réplicas, cambió drásticamente la forma en que se concibe el riesgo sísmico en la Ciudad de México. Por la estratigrafía profunda del Valle de México, las ondas que llegaron a la superficie rocosa tenían un contenido excepcionalmente alto de energía en un intervalo de frecuencias que abarca justamente aquellas que más amplifican las arcillas del valle. A su vez, las construcciones que, al experimentar grandes oscilaciones, vibraban naturalmente en este rango de frecuencias (en general edificios de 7 a 15 pisos) sufrieron los máximos daños. A raíz del sismo se modificaron las normas técnicas con la nueva información y se publicaron en 1987. Para incluir los efectos de la interacción suelo-estructura en el diseño estructural de ciertas estructuras, el reglamento de 1987 incluyó las curvas de isoperiodos e isopropiedades de los depósitos de arcillas para la Ciudad de México ([Rosenblueth et al., 1992](#)).

Exactamente 32 años después del sismo de 1985, el 19 de septiembre de 2017, ocurrió un sismo intraplaca en Axochiapan, Morelos, aproximadamente a 120 km de la Ciudad de México, de magnitud  $M_w 7.1$ . Este evento causó el colapso de 46 estructuras y severos daños en otras, la mayoría edificios menores de 10 pisos. La mayoría de las afectaciones ocurrieron al poniente de la Ciudad de México, en la zona de transición. Este sismo obligó a revisar de nuevo el reglamento de construcciones y las normas de diseño por sismo ([Galvis et al., 2017](#), [NTC-DS, 2017](#)).

Recientemente se presentó en la Ciudad de México una secuencia de 20 sismos locales (del 12 al 18 de julio de 2019) con epicentros en la alcaldía Miguel Hidalgo, al poniente de la ciudad. El evento más grande ocurrió el 17 de julio y tuvo una magnitud de  $M_w 3.2$  y una profundidad de 1 km. La aceleración máxima del suelo (PGA) de 101, 314, 305  $\text{cm/s}^2$  en las componentes NS, EW, Z, respectivamente de la estación Acelerográfica MHVM, es el mayor registrado hasta la fecha en un sitio de la montañosa de la CDMX. Por otro lado, existen numerosas fallas cartografiadas en la CDMX que superan los 20 km de longitud; por lo tanto, magnitudes  $M_w > 5.0$  de sismos locales de este tipo de fuentes no se pueden descartar, aun cuando este temblor no causó daños en la zona epicentral, si se requiere reevaluar el peligro sísmico para este tipo de fuente sísmica ([Singh et al., 2020](#)).

A raíz de los recientes sismos, tanto el del 19 de septiembre de 2017 como los eventos locales, es necesaria una revisión al reglamento de construcciones y a las normas técnicas de diseño por sismo de la Ciudad de México. Para estas últimas, los mapas de isoperiodos e isopropiedades no se han modificado desde el 2004, aunque se ha realizado trabajo al respecto por parte de diferentes dependencias e investigadores ([Jaimes et al., 2016](#)).

El objetivo del presente trabajo es actualizar el mapa de isoperiodos de la Ciudad de México y áreas aledañas, además de brindar información de la profundidad al estrato resistente por medio de información recabada de sondeos geotécnicos y pozos profundos. Además, se presenta el mapa de amplificación relativa para la misma área, con información de ruido sísmico y estaciones acelerográficas.

## 1.1 Objetivos

- Actualizar el mapa de periodos dominantes del suelo para la Ciudad de México y áreas aledañas con nuevas mediciones de ruido sísmico al norte de la Ciudad de México y en los municipios aledaños.
- Actualizar el mapa de espesor del suelo al estrato resistente para la Ciudad de México y áreas aledañas con las nuevas mediciones de ruido sísmico y la relación potencial obtenida en el trabajo anterior (Lermo et al., 2019).
- Realizar un mapa de amplificación para la Ciudad de México y áreas aledañas por medio de la amplitud del cociente espectral H/V con énfasis en registros de sismos.
- Avance preliminar de la microzonificación sísmica de las 16 alcaldías de la Ciudad de México considerando el periodo dominante, el espesor del suelo, la amplificación, las grietas y los daños de los sismos de 1985 y 2017.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se ubica en la parte central de México, en la denominada cuenca del Valle de México. La cuenca es endorreica y se ubica dentro del eje neo-volcánico, el cual se extiende en dirección este-oeste por la zona centro del territorio mexicano. Está rodeada por altas montañas, limitada al norte por las sierras de Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán. Al sur está limitada por la sierra de Chichinautzin. Al este limita con la sierra Nevada, con sus picos Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Al oeste la cuenca limita con las sierras de monte alto y las cruces. Dentro de la cuenca existen estructuras monogenéticas como el Peñón del Marqués, el Peñón de los Baños, la Sierra de Santa Catarina, el Cerro de la Estrella, el volcán Xico, etc. (Díaz-Rodríguez, 2006). La cuenca del valle de México estuvo formada por cinco lagos someros: Zumpango, Xaltocán, Texcoco, Xochimilco y Chalco, de los que actualmente sólo quedan pequeños cuerpos de agua (Figura 2.1).

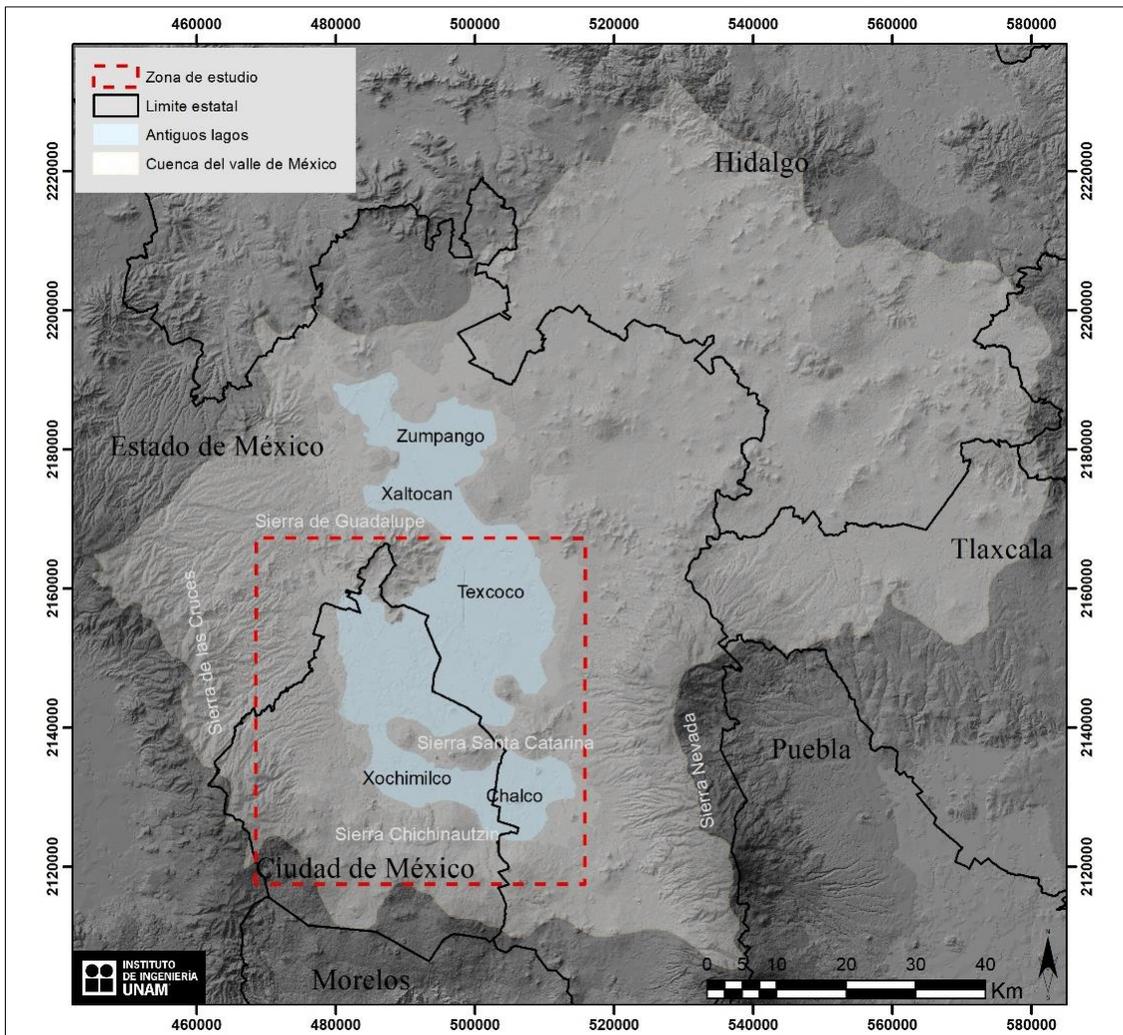


Figura 2.1. Ubicación de la zona de estudio.

## 2.2 Morfología

La morfología de la cuenca del Valle de México está definida por grandes sierras, anteriormente mencionadas, alrededor de la planicie lacustre en la que se ubican varios cerros y volcanes. En la parte norte, a las faldas de la sierra de Guadalupe se ubican los cerros Tepeyac, Coalacuaya y, al sur, el Peñón de los Baños. Al Poniente se localiza el cerro Chapultepec. Alrededor de la sierra de Santa Catarina se ubican el cerro de la Estrella, el volcán Yuhualixqui y el Peñón del Marqués. Al oriente destacan el cerro Chimalhuacán y el cerro el Pino. En la parte sureste los cerros Xico, Tlapacoya y Cocotitlán son las características morfológicas más destacadas. Por último, al noreste se ubican dos cerros pequeños en Texcoco (Figura 2.2). La característica más importante, que tiene influencia en la planicie del lago, es el derrame basáltico producido por el volcán Xitle perteneciente a la sierra de Chichinautzin.

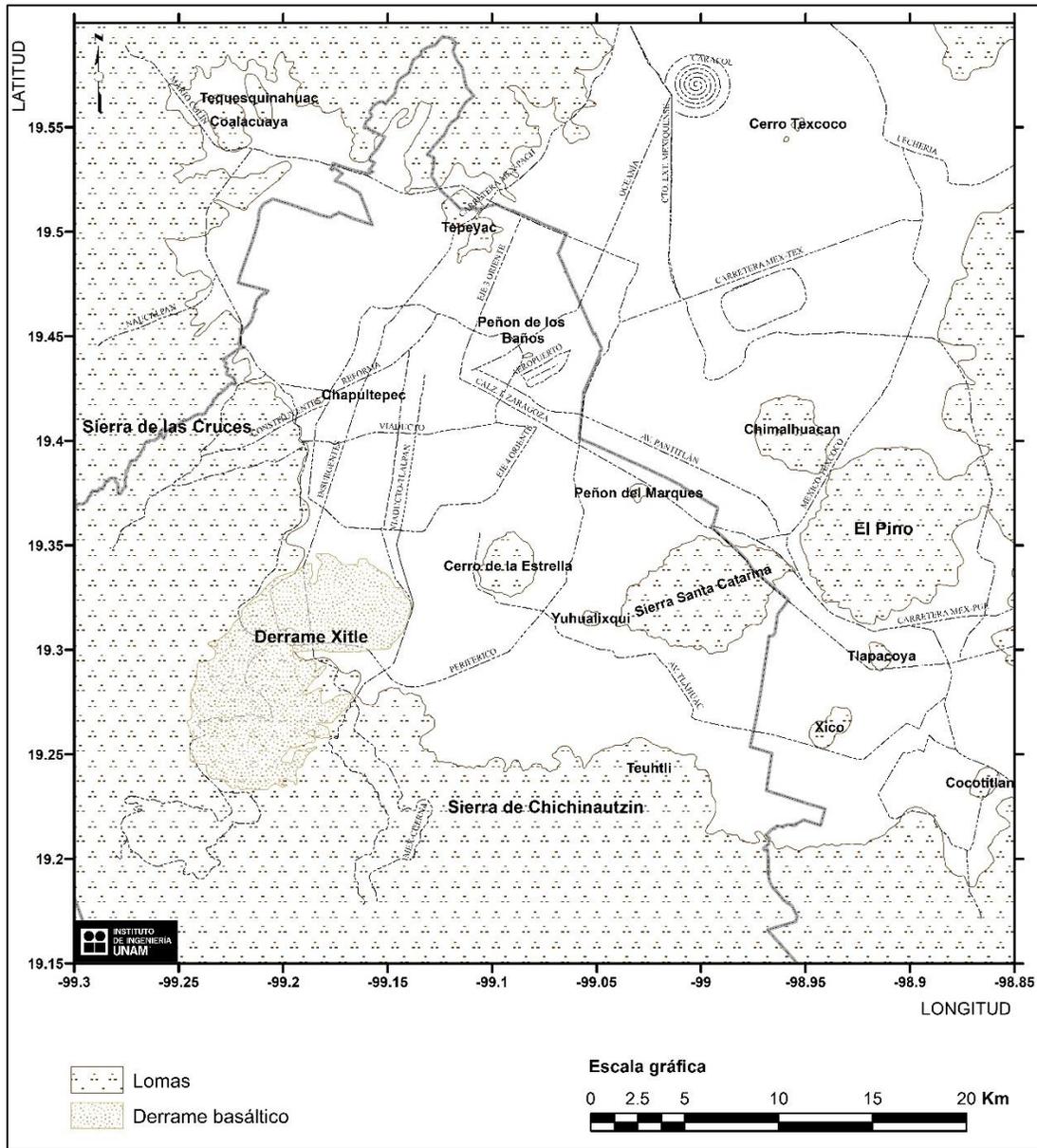


Figura 2.2. Morfología de la cuenca del Valle de México.

## 2.3 Geología y Tectónica

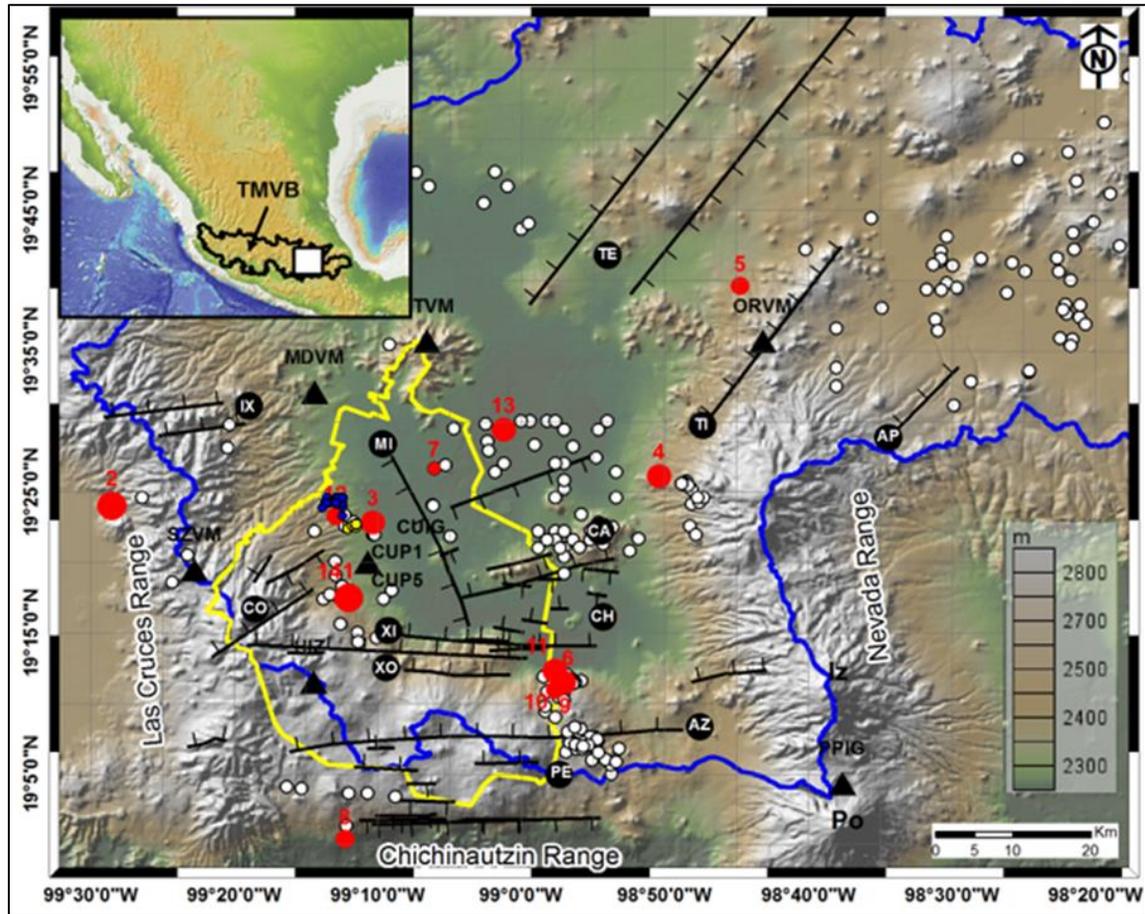
Se han realizado varios trabajos geológicos en los alrededores de la cuenca de México, los cuales, apoyados con la información de pozos profundos han permitido establecer una estratigrafía. Con información de los pozos se ha podido establecer que existe un basamento calcáreo que se correlaciona con las formaciones geológicas del cretácico que afloran al sur de la cuenca, en el área de Cuernavaca-Tepoztlán. Cubriendo el basamento se encuentran conglomerados calcáreos (Eoceno) pertenecientes al grupo Balsas y rocas volcánicas del Eoceno-Oligoceno. La columna continúa con depósitos volcánicos del Mioceno expuestos en la Sierra de Guadalupe y en los alrededores de Tepoztlán, Morelos asociadas con la actividad de la Formación Volcánica Transmexicana de México (FVTM). Rocas de esta misma edad han sido encontrados en pozos de Mixhuca, Tulyehualco, San Lorenzo Tezonco y Roma. Cubriendo a las rocas del Mioceno se encuentran depósitos volcánicos del Plioceno al Holoceno que también están reaccionadas con la FVTM, las cuales afloran en la Sierra de las Cruces, Sierra Nevada y Sierra Chichinautzin. Finalmente, en la cima de la columna existen sedimentos lacustres del Pleistoceno al Holoceno (Vásquez-Serrano, 2019).

En el centro de México, dentro de la FVTM, se han documentado por lo menos tres sistemas de fallas de tipo normal NNW-SSE, E-W Y NE-SW. Algunos de estos sistemas han sido reactivados durante la fase de extensión cortical (N-S) observada actualmente dentro del FVTM, heredados de eventos de extensión más antiguos. Estos tres sistemas de fallas están presentes en la mayor parte de la FVTM, siendo el sistema NNW-SSE el más antiguo (Oligoceno-Mioceno) y el E-W el que actualmente se encuentra activo, acomodado un mayor desplazamiento.

Dentro de la cuenca de México también se han definido estos sistemas de fallas principales: Por ejemplo, el sistema ENE-WSW, representado por lineamientos paralelos a la Sierra de Santa Catarina y observados a diferentes profundidades del contacto entre rocas calcáreas del Cretácico y las rocas volcánicas del Cenozoico. A este mismo sistema pertenece la fosa de Santa Catarina, formada por dos fallas normales con una orientación ENE-WSW (CA, Figura 2.3), la cual fue definida por Arce *et al.* (2013) con la ayuda de las columnas litológicas descritas en los pozos profundos perforados al norte (Mixhuca y San Lorenzo Tezonco) y al sur (Tulyehualco) de la Sierra de Santa Catarina. Otro sistema de fallas que se ha reportado dentro de la cuenca, tiene una orientación NNW-SSE y también se ha definido con base en la variación de la profundidad del contacto entre rocas calcáreas y volcánicas. Gracias a dicha variación se pudo definir a la falla Mixhuca (MI, Figura 2.3), la cual es de tipo normal y parece acomodar un desplazamiento importante generando la fosa Roma, al oeste de la falla (Pérez-Cruz, 1988). En la zona occidental y noroccidental de la cuenca de México se han realizado algunos estudios de las fallas que afectan a las rocas de la Sierra de las Cruces y de la parte occidental de la Sierra de Guadalupe. Mediante un análisis morfoestructural detallado, mostraron la importancia de las fallas en el relieve de la Sierra de las Cruces y definieron algunas sub cuencas y fallas como Ixtlahuaca y Otomí, Contreras (IX, CO; Figura 2.3). Adicionalmente, también se han reportado fallas con orientación E-W, como las fallas Xicomulco, Xochimilco, Azteca, La Pera (XI, XO, AZ y PE; Figura 2.3), al norte y al sur de la Sierra Chichinautzin, respectivamente; estas presentan un desplazamiento importante, generando lineamientos observables en imágenes satelitales.

Por otro lado, Lermo *et al.* (2016) compilan la información de 218 sismos locales (círculos blancos, Figura 2.3) y analizan 14 de estos registrados dentro de la Cuenca, con magnitudes  $M_w$  entre 2.3 y 3.8 (círculos rojos, Figura 2.3). La mayoría de la sismicidad registrada se ubica en los sistemas descritos. En la misma Figura 2.3, también se resaltan con círculos azules y amarillos, dos enjambres sísmicos. El primero ocurrió entre el 4 y 15 de febrero de 1981, siendo de  $M_l$  3.2 la magnitud del

evento principal, y con profundidades entre 0.7 a 1.6 Km en un plano de falla casi vertical; se obtuvo una solución de plano de falla normal con el eje tensional en la dirección casi Este-Oeste (círculos pequeños de color amarillo) (Havskov, 1982). Mientras que el segundo enjambre ya descrito en la introducción ocurre entre el 12 al 18 de julio de 2019, cuyo evento principal tuvo una magnitud Mw 3.2. (círculos pequeños de color azul) (Singh, 2020).



**Figura 2.3.** Mapa de la Cuenca de México. La línea azul y el polígono amarillo encierran la cuenca de México y el área metropolitana de la CDMX, respectivamente. La porción sur de la cuenca está delimitada por las Sierras de Chichinautzin, Nevada y Las Cruces. Los principales sistemas de fallas se identifican por círculos sólidos con dos letras: La Pera (PE), Azteca (AZ), Xochimilco (XO), Xicomulco (XI), Sub-cuenca de Chalco (CH), Mixhuca (MI), Contreras (CO), Ixtlahuaca y Otomí (IX), Tizayuca (TI), Texcoco (TE) y Apan-Tlálóc (AP). Iz y Po indican los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl respectivamente. Los puntos blancos muestran la ubicación epicentral de los 218 sismos reubicados, los círculos amarillos, rojos y azules son los sismos analizados por Havskov (1982), Lermo et al. (2016) y Singh et al. (2020).

En cuanto al origen de los sismos en esta región, se piensa que son generados por:

1. La reactivación de antiguas fallas.
2. También se considera que estos eventos pueden ocurrir como resultado de la acumulación de tensión regional o que el hundimiento de la CM podría originar tensiones que, si bien no generan propiamente a los sismos, sí pudieran dispararlos (Havskov, 1982).

3. También existe la hipótesis de que los grandes sismos generados en la costa pudieran dar lugar a condiciones de desequilibrio y desencadenar sismos locales (Singh *et al.* 1998).
4. Asimismo, debido al incremento de los esfuerzos cortantes, por efecto de acumulación de agua y las fuerzas de filtración, en las fallas geológicas que surcan el macizo montañoso de la Sierra de las Cruces a raíz de las fuertes lluvias. (Alberro, 1991).

Finalmente, Jaimes *et al.* (2016) desarrollan ecuaciones de predicción del movimiento del suelo basadas en regresiones bayesianas para predecir el espectro de respuesta en sitios localizados en la zona de lomas de la Ciudad de México para 15 sismos locales en el valle de México. Y destacan que el crecimiento de la Ciudad de México ha llevado a un importante desarrollo urbano al sur y al oeste, donde puentes, centros comerciales, centros de negocios, residenciales y educativos, se han construido edificios sobre varias de las fallas sísmicas activas descritas en la primera parte. Por lo tanto, como comentario final, debe considerarse que un terremoto local en la ciudad de México podría generar algún daño en construcciones de baja calidad, y aunque es probable que el evento afecte solo a una pequeña área (debido a su alta atenuación), podría ser una densamente poblada.

## 2.4 Zonificación geotécnica

Marsal y Mazari (2016) presentaron la primera zonificación geotécnica del área urbana de la Ciudad de México, con información de sondeos geotécnicos, basada principalmente en las propiedades de los materiales. En esta zonificación la ciudad fue dividida en tres zonas: Lomas, formada por terrenos compactos de las sierras; Transición, entre las sierras y la zona de lago con variaciones extraordinarias en la estratigrafía de punto a punto; y Lago, en donde se ubican las formaciones típicas del lago de Texcoco.

La zona de Lomas incluye las sierras que rodean a la Ciudad de México y las zonas aledañas, como la Sierra de las Cruces y la Sierra de Chichinautzin, además de los cerros que se ubican en el interior de la cuenca como el Peñón de los Baños y la Sierra de Santa Catarina. Las Lomas del poniente tienen elementos litológicos producto de las erupciones de grandes volcanes andesíticos como tobas y lahares fracturados, depósitos de arenas pumíticas y depósitos glaciales. En el sur, predominan las formaciones basálticas de la Sierra de Chichinautzin, en donde destaca el derrame basáltico del Xitle. En la zona de Lomas existen rellenos artificiales, barrancas, galerías de minas antiguas, cavernas y túneles, que deben considerarse en la exploración geotécnica. La zona de Transición forma una franja entre los suelos lacustres y las sierras que rodean a la Ciudad de México y áreas aledañas o los aparatos volcánicos que sobresalen en la planicie de la zona de Lago. Los ríos que desembocaban en la zona de Lago formaron deltas poco extensos, cuyos depósitos se intercalaron con las series arcillosas. La zona de Transición puede clasificarse en dos: transición interestratificada, en donde se encuentran intercalaciones de arcillas lacustres con arenas y gravas de río; y transición abrupta, en donde existe contacto entre arcillas lacustres y rocas volcánicas (Santoyo-Villa *et al.*, 2005).

La estratigrafía de la zona de Lago es una secuencia de suelos de la antigua zona lacustre integrada, en forma general, por los siguientes estratos (Santoyo-Villa *et al.*, 2005).

- *Costra superficial (CS)*. Rellenos artificiales de espesor variable. Los más gruesos se encuentran en el centro histórico y tienen varios metros de espesor.
- *Formación arcillosa superior (FAS)*. Secuencia de arcillas de la zona de lago formada por siete substratos de arcilla, separados por lentes duros. La composición de las arcillas es de blanda a muy blanda, y su espesor varía entre 25 y 50 m.

- *Capa dura (CD)*. Es un depósito heterogéneo que se desarrolló en el periodo climático del interglacial Sangammon en el cual predominan limos arenosos con algo de arcilla y gravas ocasionales. Tiene una cementación muy errática y su espesor es variable (es delgada en el centro del lago de Texcoco y alcanza 5 m en sus orillas). La capa dura desempeña un papel importante en las cimentaciones profundas de la Ciudad de México, ya que para muchas estructuras sirve como apoyo de pilotes de punta, de control y de punta penetrante.
- *Formación arcillosa inferior (FAI)*. Es una secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros, Su espesor es de unos 15 m al centro del lago y prácticamente desaparece en las orillas.
- *Depósitos profundos (DP)*. Constituyen una serie de arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio. La parte superior de estos depósitos, de 1 a 5 m, está más endurecida que la inferior, en donde se encuentran estratos menos cementados y hasta arcillas preconsolidadas.

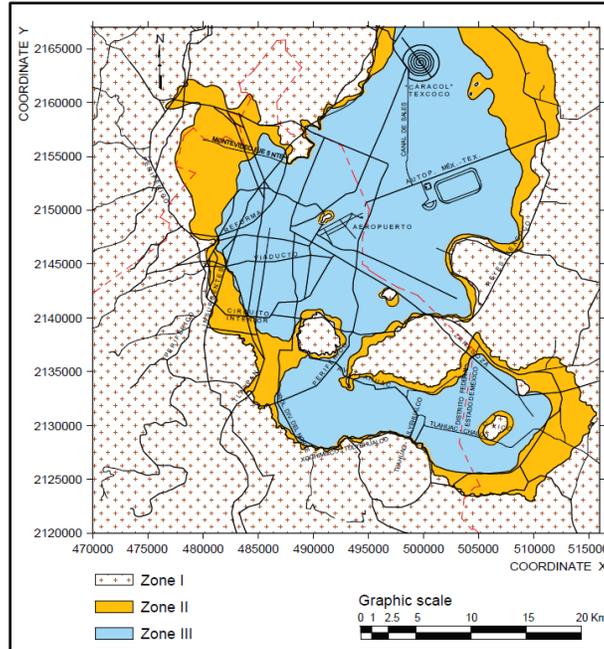
La zonificación que aparece en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal ([GDF, 2004b](#)) se basa en la interpretación de Marsal y Mazari que considera sólo tres zonas. En el Capítulo VII “Del Diseño de Cimentaciones” del RCDF, en el Artículo 170, se definen las tres zonas de la siguiente manera.

- *Zona I. Lomas*, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta Zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelo para explotar minas de arena.
- *Zona II. Transición*, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- *Zona III. Lacustre*, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente comprensible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

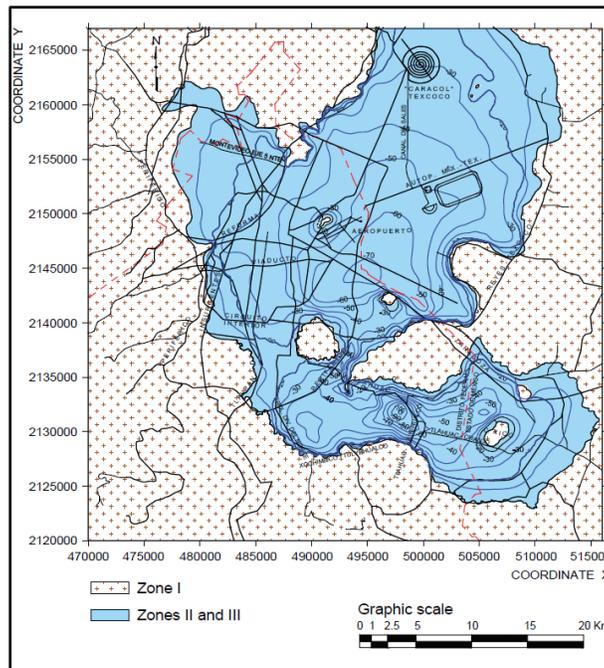
Por otra parte, [Auvinet et al. \(2016\)](#) construyeron un nuevo mapa de zonificación geotécnica para la Ciudad de México y áreas aledañas con una base de datos de 10,000 sondeos geotécnicos (Figura 2.4). Esta zonificación se incluyó, con ligeras modificaciones, en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones ([GCM, 2017](#)) de la Ciudad de México. Se conserva la división de la Ciudad de México en tres zonas principales: Zona I, Lomas; Zona II, Transición; y Zona III, exLago.

Con el propósito de definir la frontera entre las zonas II y III, [Juárez-Camarena et al. \(2016\)](#) realizaron un análisis geostatístico de la distribución espacial de los depósitos profundos con información de 544 sondeos geotécnicos cuya profundidad alcanza este estrato. Los resultados se muestran en el mapa de contornos de la Figura 2.5. Se observa que las mayores profundidades de los DP se encuentran localizadas en la zona del ex Lago de Chalco, al sur del área lacustre. Cabe señalar que en esta zona se cuenta con algunos sondeos de 50 y 60 m de profundidad que no alcanza la de los

depósitos profundos. Este mapa ha sido de utilidad para actualizar el mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México.



**Figura 2.4.** Mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México y áreas aledañas realizado con información de aproximadamente 10,000 sondeos geotécnicos (Auvinet *et al.*, 2016). Este mapa se presenta en la actualización de las Normas Técnicas Complementarias para Construcción y Diseño de Cimentaciones (GCM, 2017).



**Figura 2.5.** Mapa de espesor de los suelos lacustres realizado con información de 544 sondeos geotécnicos mediante análisis geostatístico (Juárez-Camarena *et al.*, 2016).

## 2.5 Zonificación sísmica

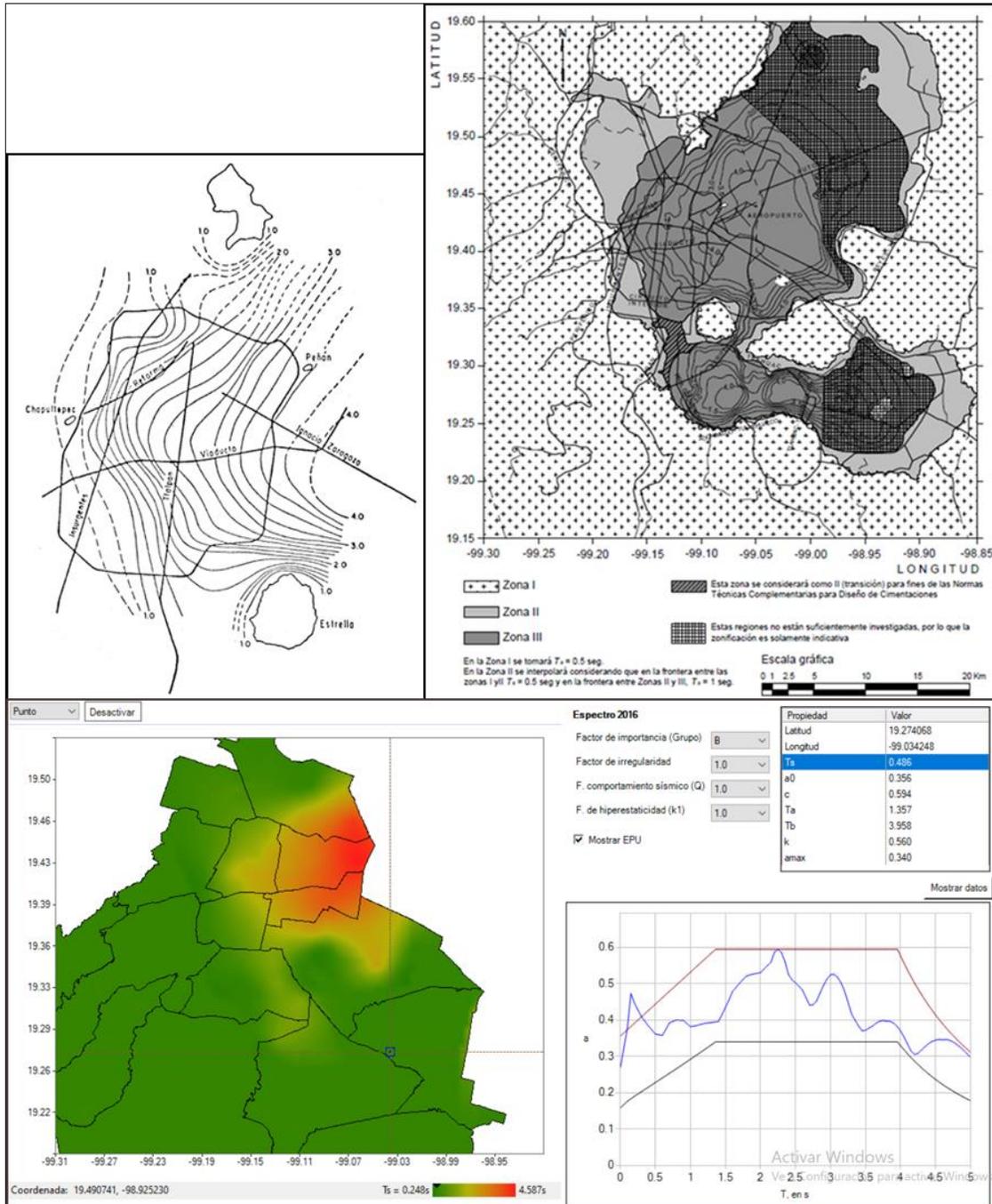
La zonificación sísmica consiste en la cuantificación y despliegue espacial de parámetros de interés en la predicción de la respuesta sísmica; así se puede zonificar con mapas de periodo dominante, o de amplificación relativa a un cierto periodo. Si la escala de interés es de cientos de metros suele hablarse de microzonificación, e incluso de nano-zonificación para decenas de metros. Esta información puede ser útil para estimar la influencia que pueden tener las condiciones locales en el movimiento del suelo durante un sismo. En la mayoría de los estudios se considera sólo el modelo de respuesta más sencillo: el modelo de cortante unidimensional (1D). Por condiciones locales se entiende la estratigrafía del suelo en el sitio de interés, así como las características geológicas y topográficas alrededor del sitio (Esteva, 1977). Brammerini *et al.* (2015), en los lineamientos para la microzonificación sísmica de Italia, definen la microzonificación sísmica como “la evaluación del peligro sísmico local identificando las zonas de un área geográfica con comportamiento sísmico homogéneo. En la práctica, la microzonificación sísmica caracteriza e identifica las zonas estables, las zonas estables propensas a la amplificación local del movimiento sísmico y las zonas propensas a la inestabilidad”. La información básica para realizar la microzonificación sísmica de un sitio está ligada con varias disciplinas tales como la geología, geomorfología, geotecnia, geofísica, ingeniería sísmica, ingeniería estructural, etc. Además, se deben considerar fenómenos físicos tales como la amplificación del suelo, los deslizamientos y derrumbes, la licuefacción, el agrietamiento, el hundimiento regional y diferencial, etc. Esta información se debe analizar e integrar para generar mapas que muestren la microzonificación a diferentes escalas.

Actualmente, la microzonificación sísmica en la Ciudad de México se realiza con base en el periodo dominante del suelo, lo cual como primera aproximación es correcto. En el futuro habrá que incluir estimaciones de los efectos de la irregularidad lateral. El RCDF de 1987 fue el primero en incluir el mapa de isoperiodos de la Ciudad de México (Rosenblueth *et al.*, 1992). Este mapa incluyó datos de periodo dominante de la parte central de la Ciudad de México, pero carecía de información en la parte sur; en la subcuenca de Xochimilco-Chalco. En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004) se actualizó el mapa de periodos de la Ciudad de México, utilizando registros de movimientos fuertes y microtemores (Lermo *et al.*, 1988, 1993, 1994a, b), incluyendo mayor información en la subcuenca de Xochimilco-Chalco, así como en la parte noroeste de la CDMX, aunque hay dos zonas que no están suficientemente mapeadas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Para fines de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (GDF, 2004), la Ciudad de México se divide en tres zonas, al igual que la zonificación geotécnica: Lomas (Zona I), formadas por rocas o suelos generalmente firmes; Transición (Zona II), en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad o menos; y Lago (Zona III), integrada por potentes sedimentos de arcilla altamente compresibles. Se considera que la división entre la Zona I y Zona II es la curva de 0.5 s de periodo de vibración del suelo, mientras que la curva de 1.0 s, divide la Zona II de la Zona III. Además, la Zona III se divide en cuatro subzonas: IIIa, IIIb, IIIc y IIId (Figura 2.6).

En la nueva NTC-DS (2017) para la CDMX, la determinación de los espectros de diseño cambió de manera radical. Pues (1) se eliminó la caracterización geosísmica y (2) la determinación del espectro de diseño se realiza utilizando el programa de cómputo SASID. Este programa es de hecho un sistema que integra un mapa de la CDMX en el cual se indican las coordenadas del sitio de interés y el sistema genera los parámetros de los espectros elástico, y de diseño, así como el periodo dominante del suelo  $T_s$  en ese sitio. Ante estas consideraciones de las NTC-DS (2017), cobra gran relevancia el periodo dominante del suelo. Sin embargo, hay algunas zonas en las que los valores generados por el programa

SASID, difieren hasta en 25 por ciento de los obtenidas con registros de sismos o registros de microtemores. Esto se ha documentado para zonas cercanas a estructuras volcánicas y para la Zona de Lomas (Flores-López y González Ramírez, 2019; Huerta, 2019). Por ello, parece conveniente recurrir a alguna técnica de campo como lo es el registro de Microtemores (vibración ambiental, ruido sísmico, etc) o al uso de los registros sísmicos que se tienen disponibles de las estaciones sísmológicas de la CDMX (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Mapa de isoperiodos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo para la CDMX. Parte superior izquierda NTC-DS 1987; derecho NTC-DS 2004. Parte inferior, NTC-DS 2017.

### 3. Ruido sísmico

El método del cociente espectral H/V, también llamado la técnica de Nakamura o HVSR, fue introducido por [Nogoshi e Igarashi en 1971](#) basado en los estudios iniciales de Kanai y Tanaka en 1961. Este método presenta un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo como por la rapidez con que permite obtener resultados ([SESAME, 2004](#)). El cociente espectral H/V nos permite conocer la frecuencia (o su inverso, el periodo) de vibración del suelo en el sitio en donde se realiza la medición de ruido sísmico ambiental.

En los trabajos de [Lermo y Chávez-García \(1993 y 1994\)](#), en los cuales compararon el cociente espectral estándar que utiliza registros de sismos (SSR) con el cociente espectral utilizando registros de microtremores, se concluyó que el cociente espectral utilizando microtremores determina de forma precisa el periodo dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.2 y 10 Hz, además de estimar de forma preliminar la amplificación. Por otra parte, [Bard \(1999\)](#) concluye, después de realizar una extensa revisión de las investigaciones sobre el ruido sísmico ambiental, que los resultados experimentales prueban que el cociente espectral H/V indica de manera precisa la frecuencia fundamental de los suelos blandos.

La metodología propuesta por [Nakamura \(1989\)](#) y [Lermo y Chavez-García \(1993\)](#), parte de la hipótesis de que la energía de los microtremores o ruido sísmico ambiental consiste principalmente de ondas Rayleigh y que la amplificación del efecto de sitio se debe a la presencia en la superficie de una capa de suelo blando sobre un semiespacio. El cociente espectral H/V proporciona información relevante del suelo como el periodo dominante y su amplificación relativa, además puede ser considerado como una pseudo-función de transferencia empírica ([Sánchez-Sesma et al., 2011](#); [Kawase et al., 2018](#)).

#### 3.1 Medición de microtremores

El cociente espectral H/V es una técnica para evaluar algunas características de los depósitos sedimentarios. Debido al bajo costo de las mediciones en campo y del análisis, la técnica H/V ha sido frecuentemente adoptada en la microzonificación sísmica ([SESAME, 2004](#)). Para realizar las mediciones de ruido sísmico ambiental o microtremores, el proyecto de investigación europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations, por sus siglas en inglés) ha publicado una serie de recomendaciones prácticas, basadas en una investigación detallada, para realizar las mediciones en campo, las cuales se han seguido en el presente proyecto. Entre las más importantes se encuentran las siguientes: para observar una frecuencia de vibración del suelo de 0.2 Hz es necesario un tiempo de registro de 60 minutos como mínimo, colocar el sensor directamente en el suelo y una frecuencia de muestreo de 50 Hz es suficiente.

El equipo empleado para medir el ruido sísmico ambiental fue un sismógrafo digital triaxial, de banda ancha y alta resolución, ideal para este tipo de mediciones por su practicidad, peso y dimensiones. Este sismógrafo tiene un periodo natural de 30 s y una respuesta en frecuencia de 0.03 a 100 Hz, que abarca el rango de interés de un estudio de ingeniería sísmica (0.1 a 20 Hz). Una vez localizado el punto en donde se requiere medir el ruido sísmico ambiental, la instalación del sensor se realiza de forma rápida mediante 3 pasos: orientar el sensor hacia el norte geográfico, nivelar el sensor y, por último, conectar el equipo a una batería y revisar mediante una computadora que la señal se registre de forma adecuada.

En total se realizaron 96 nuevas mediciones de ruido sísmico (Figura 3.3), con tiempo de medición mayor a una hora, en la zona norte de la Ciudad de México, principalmente en las alcaldías Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero. Además, se consideraron las 120 mediciones realizadas en la Zona de Lomas de la alcaldía Álvaro Obregón. En total son 216 nuevas mediciones de ruido sísmico en el área de estudio.

### 3.2 Procesamiento del ruido sísmico para obtener el cociente espectral H/V

El procesamiento de las señales de ruido sísmico ambiental para obtener el cociente espectral H/V se realizó con el software Geopsy, desarrollado por el proyecto [SESAME \(2004\)](#). El proceso para obtener el cociente espectral H/V se describe en el diagrama de la Figura 3.1. Primero, se seleccionan N ventanas de ruido estacionario, eliminando mediante un algoritmo “anti-trigger” el ruido transitorio producido por fuentes muy cercanas. Para cada ventana de ruido estacionario seleccionada se calcula el espectro de amplitud de Fourier y se realiza un suavizamiento. Este procedimiento se realiza para las tres componentes. Posteriormente, se promedian las componentes horizontales N y E para cada ventana. Con el espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical (V) y del promedio de las componentes horizontales (H) se realiza el cociente espectral H/V para cada ventana. Por último, se calcula el promedio del cociente H/V.

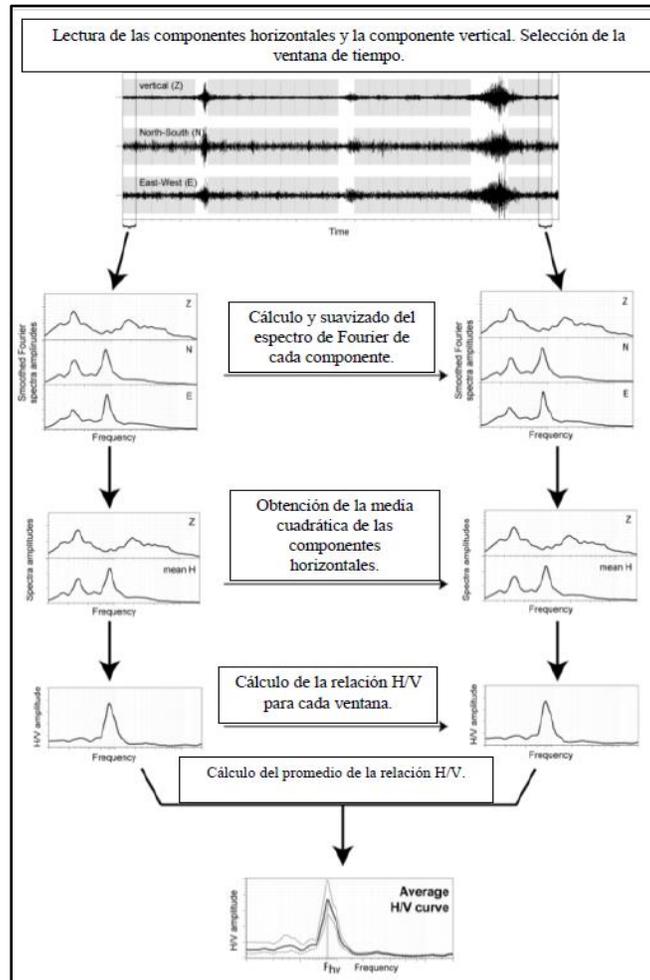
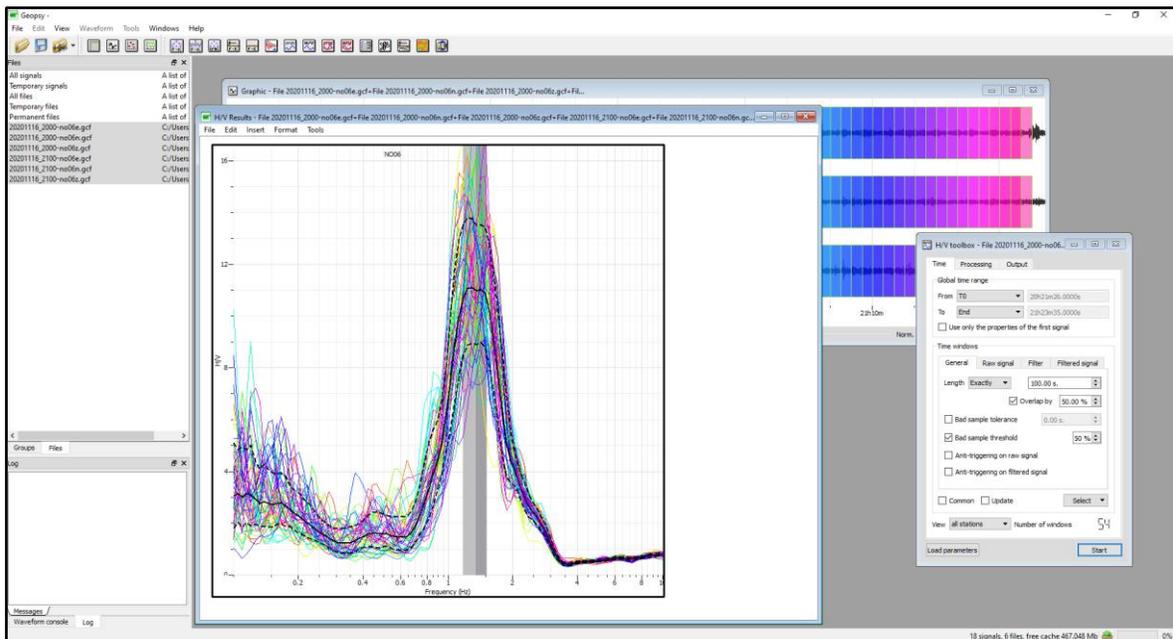


Figura 3.1. Diagrama para obtener el cociente espectral H/V ([SESAME, 2004](#)).

Para el procesamiento de las señales de ruido sísmico se utilizaron los siguientes parámetros: ventanas de 100 s, se utilizó un traslape entre ventanas de 50 % y para el cálculo del promedio de las componentes horizontales se utilizó la ecuación

$$H(f) = \sqrt{\frac{N^2(f) + E^2(f)}{2}} \quad (1)$$

Para identificar el periodo de vibración del suelo y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V se toma en cuenta el pico de mayor amplitud de la curva. Para el ejemplo de la Figura 3.2, la frecuencia de vibración es 1.26 Hz, que da como resultado un periodo de 0.79 s, además la amplitud relativa es 11.3 veces.



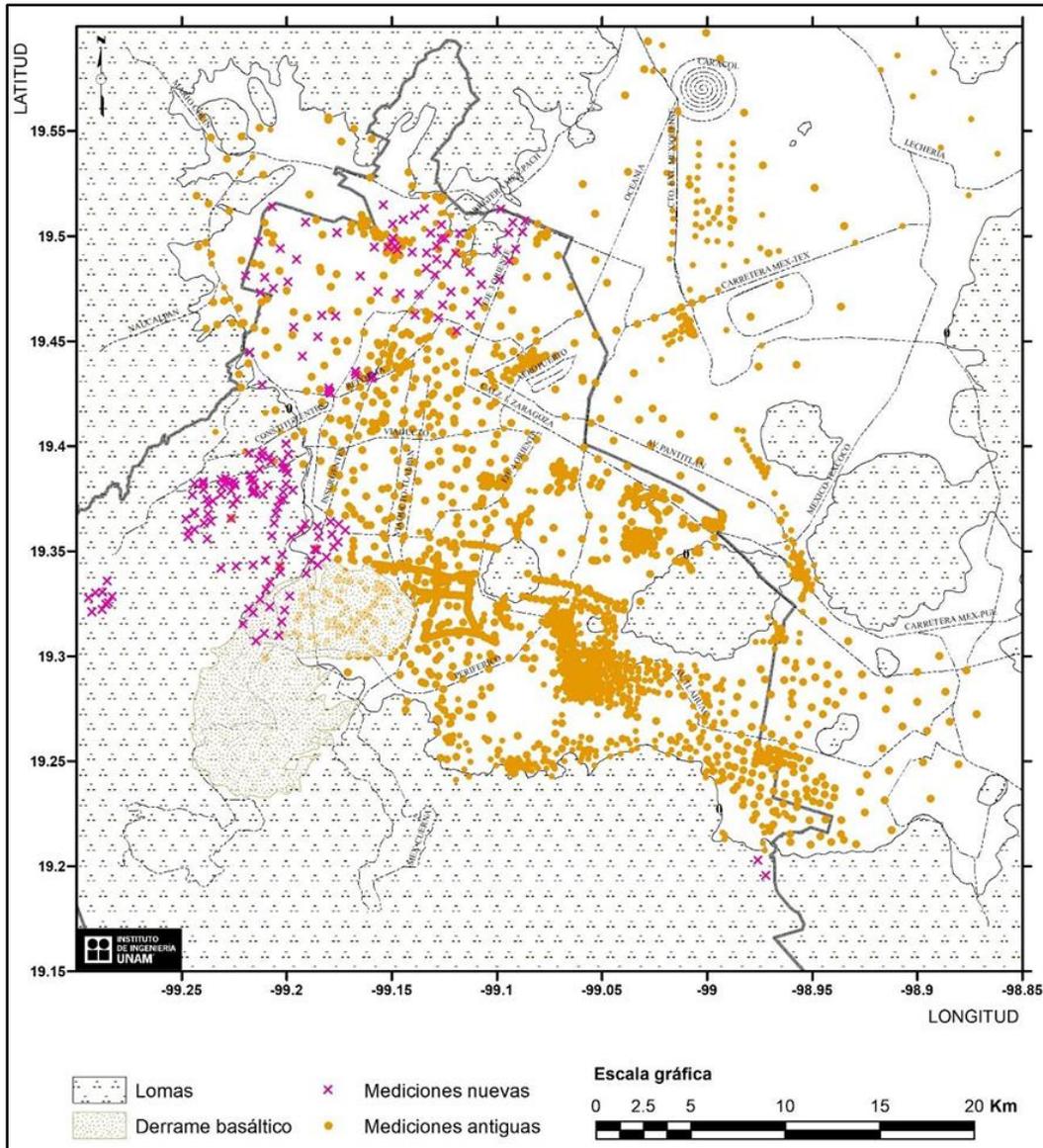
**Figura 3.2.** Ejemplo de procesamiento de la señal de ruido sísmico NO0, registrada en la alcaldía Azcapotzalco, para obtener el cociente espectral H/V.

### 3.3 Información para el mapa de periodo dominante

Para construir el mapa de periodos dominantes del suelo se consideraron aspectos importantes. Primero, se definió una curva alrededor de todo el valle de México y de los cerros ubicados dentro de la ciudad en la que se considera que no existe efecto de sitio. Para esto se consideró la geología de la cuenca establecida por [Mooser \(2018\)](#) y la topografía. En las zonas en donde terminan los depósitos aluviales y comienzan los cerros, y en donde la topografía cambia drásticamente, se definió la curva sin efecto de sitio (0.1 s).

Como base de la actualización del mapa de periodo se tomaron los datos que recolectó [Lermo et al. \(2019\)](#) de los siguientes trabajos: [Lermo y Chávez-García \(1993 y 1994\)](#), [Lermo et al. \(2012\)](#) y [Martínez-González et al. \(2015\)](#). Los puntos con información de periodo recolectados fueron en total 2464. Con los 216 nuevos datos de periodo dominante y los 2464 datos que se tenían como base, el

nuevo mapa actualizado de periodo dominante se realizó con 2680 datos, distribuidos por gran parte de la zona de estudio (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Mediciones de ruido sísmico en la Ciudad de México y áreas aledañas.

### 3.4 Información para el mapa de amplificación relativa

Para realizar el mapa de amplificación relativa se consideró toda la información disponible, debido a que muchos datos de periodo no cuentan con información de amplificación, sobre todo la información antigua. En total, se tomaron en cuenta 1362 datos de amplificación relativa, de las cuales 76 fueron obtenidas con los registros de sismos de 76 estaciones Acelerográfica de la red sísmica del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C., así como de otras redes acelerográficas más pequeñas como el Instituto de Ingeniería de la UNAM, UAM, etc. Las otras 1286 fueron estimadas con ruido sísmico que presentan una duración de más de una hora y registradas con sismógrafos de banda ancha.

### 3.5 Información para el mapa de espesor

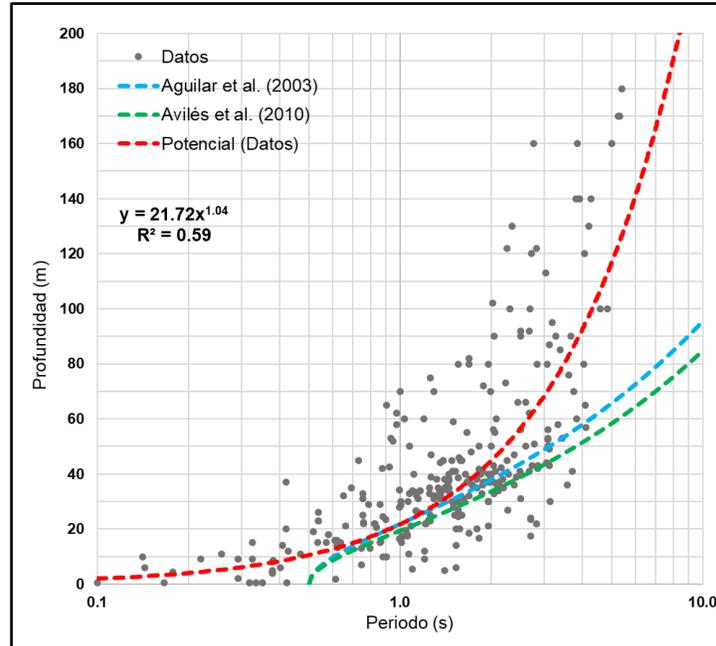
En sitios con alto contraste de impedancia entre los suelos blandos y los depósitos profundos se ha encontrado que la frecuencia de vibración del suelo, obtenida mediante el cociente espectral H/V, se correlaciona bien con el espesor de los sedimentos en el sitio. En general, la frecuencia y el espesor se relacionan por medio de una función empírica no lineal que en términos del periodo da como resultado la siguiente ecuación.

$$H_s = a * T_0^b \tag{2}$$

En este trabajo, para estimar el espesor del suelo en la Ciudad de México y áreas aledañas se utilizó la relación propuesta por [Lermo et al. \(2019\)](#). Dicha relación se obtuvo con información de sondeos geotécnicos, pozos de agua y pozos profundos en 285 sitios alrededor de la zona de estudio. La relación es la siguiente:

$$H_s = 21.72 * T_0^{1.04} \tag{3}$$

La relación de [Lermo et al. \(2019\)](#) muestra una correlación aceptable entre los valores de periodo y espesor, aunque hay una gran dispersión entre 1 y 3 s (Figura 3.4). El valor del parámetro *b* es muy parecido al de otros estudios mientras que el valor del parámetro *a* es menor al encontrado en la literatura debido a que depende mucho del sitio de estudio, lo que muestra que las arcillas del Valle de México y el contraste con los depósitos profundos tienen características muy especiales ([Thabet, 2019](#)).



**Figura 3.4.** Relación potencial entre los periodos dominantes del suelo ( $T_0$ ) y el espesor del suelo ( $H_s$ ) para la cuenca del Valle de México. Se muestran también las relaciones de [Aguilar et al. \(2003\)](#) y [Avilés et al. \(2010\)](#) para fines comparativos.



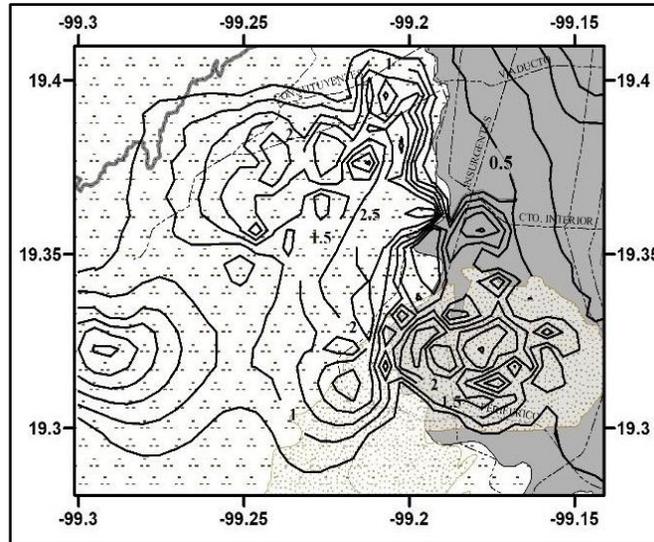
El periodo dominante tiene valores desde 0.1 s, en el límite entre sierras, cerros y volcanes, y los depósitos de arcillas lacustres de los antiguos lagos, hasta llegar al periodo máximo de la zona de estudio, el cual es de 5.9 s ubicado en el área lacustre de Chalco. La variación del periodo es abrupta al sur, en donde cambia de 0.1 a 3.0 s rápidamente, principalmente de la Sierra de Chichinautzin y la Sierra de Santa Catarina hacia la zona lacustre de Xochimilco y Chalco. El periodo también cambia abruptamente en el volcán Xico, al sureste, y en el Peñón del Marques y el Peñón de los Baños, ubicados al oriente de la Ciudad de México. La transición hacia la Zona de Lago es gradual en la Sierra de las Cruces, así como en el Cerro de la Estrella y la Sierra de Guadalupe, aunque en esta última, el periodo cambia rápidamente en donde se ubica el Cerro del Tepeyac (Figura 4.1).

Al sur de la zona de estudio, en la subcuenca de Xochimilco-Chalco, el periodo alcanza valores superiores a los 5.0 s en la zona central de los antiguos lagos, e incluso llega a los 5.9 s en el remanente del lago de Chalco a un costado del volcán Xico. En la subcuenca de Texcoco, el periodo llega a los 5.0 s en la zona del Bordo de Xochiaca, a un costado del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, justo en lo que fue el centro del antiguo lago de Texcoco. Al sur del volcán Yuhualixqui, la curva de 2.0 s define una estructura en dirección norte-sur, que llega a la frontera entre las alcaldías Tláhuac y Xochimilco, interpretada como un derrame basáltico (Figura 4.1).

En la parte noroeste de la Ciudad de México, en donde se realizaron las nuevas mediciones de ruido sísmico, se confirma la extensa área que abarca la transición entre las curvas de 0.5 y 1.0 s, a partir del Cerro de Chapultepec y casi hasta llegar a la Sierra de Guadalupe, de sur a norte, y ocupando la mayor parte de la alcaldía Azcapotzalco, de este a oeste. En la parte norte, la curva de 1.0 s define una estructura semicircular, cuyo límite al oriente es el Cerro del Tepeyac, con periodos mayores a 1.0 s en el centro de la misma. Al noreste, el periodo cambia progresivamente de 0.5 cerca del Cerro Texcoco, a 4.0 s hasta llegar al aeropuerto de la Ciudad de México (Figura 4.1).

El cambio de periodo en el centro de la Ciudad de México es progresivo de poniente a oriente, desde los 0.5 s hasta los 4.0 s. Este cambio de periodos sólo se interrumpe entre el Cerro de la Estrella, el Peñón del Marques y el Peñón de los Baños, en donde la curva de 3.5 s define dos zonas a izquierda y derecha (Figura 4.1).

En la Figura 4.1, el recuadro rojo marca una zona, perteneciente a la Sierra de las Cruces y al derrame basáltico del Xitle, en donde se tiene información de periodo dominante, pero que no se consideró en el mapa general ya que tradicionalmente esta área es considerada como Zona de Lomas, en la zonificación geotécnica, o Zona I, en la zonificación sísmica. Es decir, que no hay sedimentos, ya sea lacustres o de otro tipo, que pueden originar un efecto de sitio considerable. El mapa de periodos dominantes (Figura) muestra que se alcanzan periodos mayores a los 2.0 s sobre el derrame basáltico del Xitle, cuyas curvas de periodo no siguen una tendencia bien definida, y llegan incluso a valores de 3.0 s en la Sierra de las Cruces, al noreste y al suroeste de la alcaldía Álvaro Obregón. Los resultados del cociente espectral H/V revelan que existen periodos dominantes que se tienen que considerar, sobre todo en zonas de depósitos aluviales y barrancas, puesto que la amplificación relativa es mayor a 2 veces y llega a valores de hasta 8 o 9 veces (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Zona entre las alcaldías Coyoacán y Álvaro Obregón en la que se cuenta con información de periodo dominante.

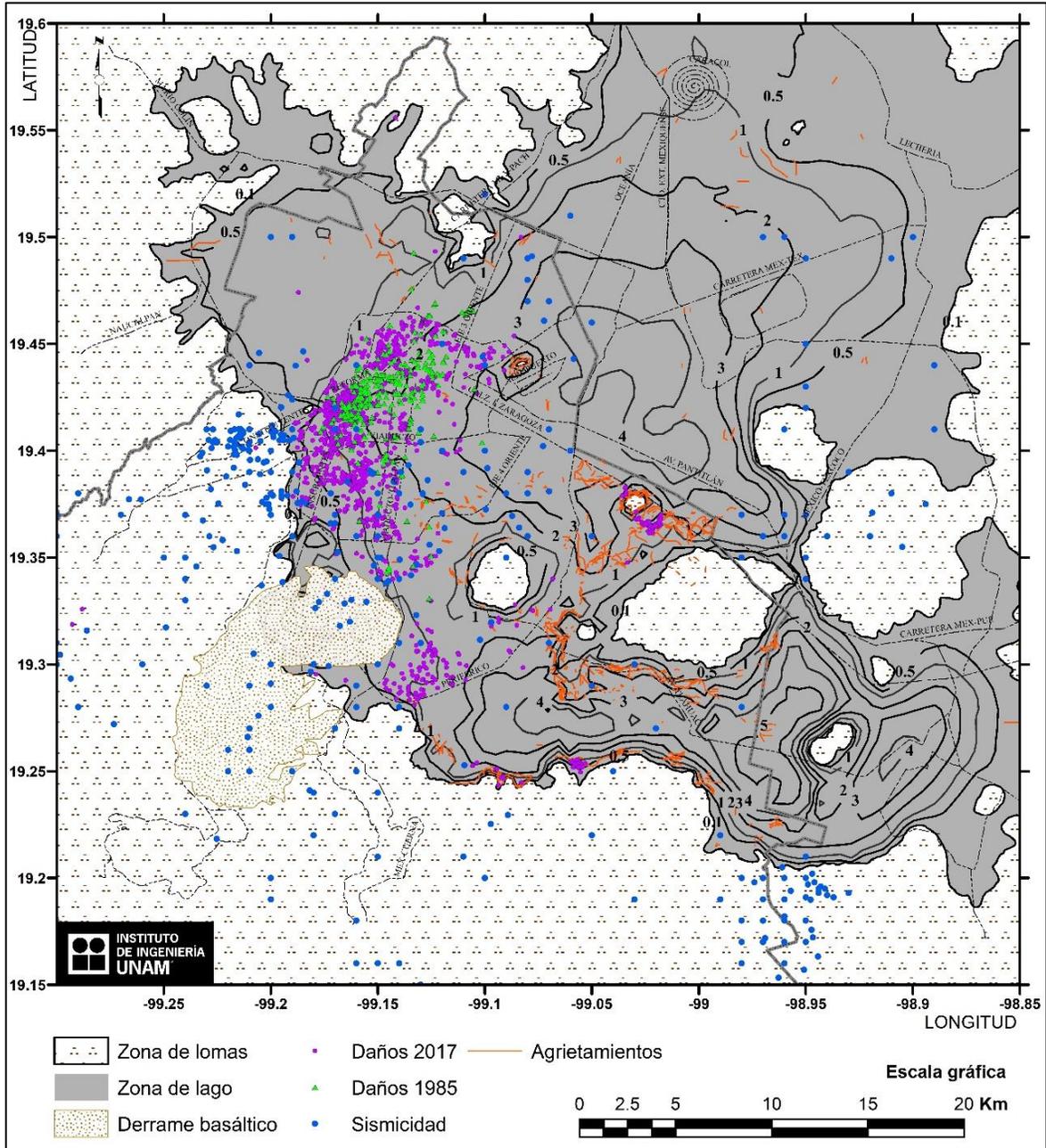
En la Figura 4.3 se observan, sobre el mapa de periodos dominantes, los daños ocasionados por los sismos del 19 de septiembre de 1985  $M_w 8.1$  y de 2017  $M_w 7.1$ , los agrietamientos causados por la subsidencia del Valle de México y por el sismo de 2017, y los sismos locales que se han presentado en el área de estudio. En este mapa se aprecia la distribución con respecto al periodo dominante y las zonas afectadas por tales fenómenos.

Los daños producidos por el sismo del 19 de septiembre de 1985  $M_w 8.1$  se produjeron principalmente en la zona centro de la Ciudad de México, en la alcaldía Cuauhtémoc, con una alineación NE-SW siguiendo la tendencia de la curva de 2.0 s de periodo. El rango de periodos que abarcaron los daños es de 1.5 hasta los 2.5 aproximadamente (Figura 4.3).

Los daños producidos por el sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w 7.1$  se concentraron en la zona poniente de la Ciudad de México, en los límites de los depósitos lacustres y la Sierra de las Cruces, con una tendencia N-S alineados a las curvas de 1.0 y 2.0 s. También se presentaron daños en la parte sur de la ciudad, principalmente en las alcaldías Xochimilco y Tláhuac. El rango de periodos que abarcaron los daños es de 0.8 hasta los 1.5 s, si se consideran solamente las estructuras colapsadas y las que presentaron riesgo alto de derrumbe (Figura 4.3).

Los agrietamientos se distribuyen en mayor medida en el límite entre las Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina, con las áreas de sedimentos lacustres. También se aprecian en el Peñón del Marques, el Peñón de los Baños y en el límite de la Sierra de Guadalupe con la zona de lago. Casi están ausentes en los límites del Cerro de la Estrella. Las grietas abarcan periodos que van desde los 0.1 s y llegan hasta los 2.0 s, a excepción de las que se ubican en el área entre el Cerro de la Estrella, el Peñón del Marques y el Peñón de los Baños, que llegan hasta los 3.0 s (Figura 4.3).

Por último, la mayor parte de los sismos locales se han producido en los sistemas de fallas de la Sierra de Chichinautzin y la Sierra de las Cruces, aunque también se han generado en los sistemas de fallas dentro de la cuenca, sobre todo en el graben de la Roma. Estos sismos pueden ser mayores a los 3.0 de magnitud y generar aceleraciones grandes en la zona del epicentro, por lo que se tiene que evaluar cuáles serían los daños que producirían y en que rangos de periodos dominantes (Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Mapa actualizado de periodos dominantes para la Ciudad de México y áreas aledañas. Se muestran en este mapa los daños del sismo del 19 de septiembre de 1985  $M_w 8.1$  (puntos verdes), los daños del sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w 7.1$  (puntos morados), los agrietamientos de la cuenca (líneas naranjas) y los sismos locales (puntos azules.)

## 4.2 Mapa de amplificación relativa

El mapa de amplificación relativa, basado en la amplitud del cociente espectral H/V, se realizó con 1362 datos de la Ciudad de México y áreas aledañas (Figura 4.4). En general, las amplificaciones mínimas se presentan en los límites entre las sierras, cerros y volcanes con la Zona de Lago, y las amplificaciones máximas, que alcanzan valores de hasta 30 veces, se ubican en la parte central de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, confirmando la misma tendencia que presentan los periodos dominantes.

En la subcuenca de Xochimilco-Chalco, las amplificaciones mínimas se ubican en el límite que divide la zona lacustre de las Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina. También se aprecia una zona de amplificaciones mínimas, que cruza de norte a sur dividiendo los antiguos lagos de Chalco y Xochimilco. Las amplificaciones máximas, que llegan a valores de 30 veces, se ubican en el centro de las zonas lacustres, justo en donde el periodo dominante del suelo es mayor a los 4.0 s. En la zona entre el derrame basáltico del Xitle y el Cerro de la Estrella, hay una zona de bajas amplificaciones (< 8 veces) que divide las subcuencas de Xochimilco-Chalco y Texcoco, asociada a periodos menores a 1.5 s (Figura 4.4).

En el centro de la zona de estudio hay una extensa área de amplificaciones altas, superiores a las 8 veces, que se distribuye de poniente a oriente, desde los límites con la Sierra de las Cruces hasta llegar al Lago Nabor Carrillo. Las amplificaciones máximas, de hasta 30 veces, se ubican en el área entre el Cerro de la Estrella, el Peñón del Marques y el Peñón de los Baños, en donde el periodo dominante es mayor a los 3.0 s. Al poniente del Peñón de los Baños, se ubica una zona de baja amplificación con alineamiento N-S que llega hasta el Cerro del Tepeyac, en la parte norte (Figura 4.4).

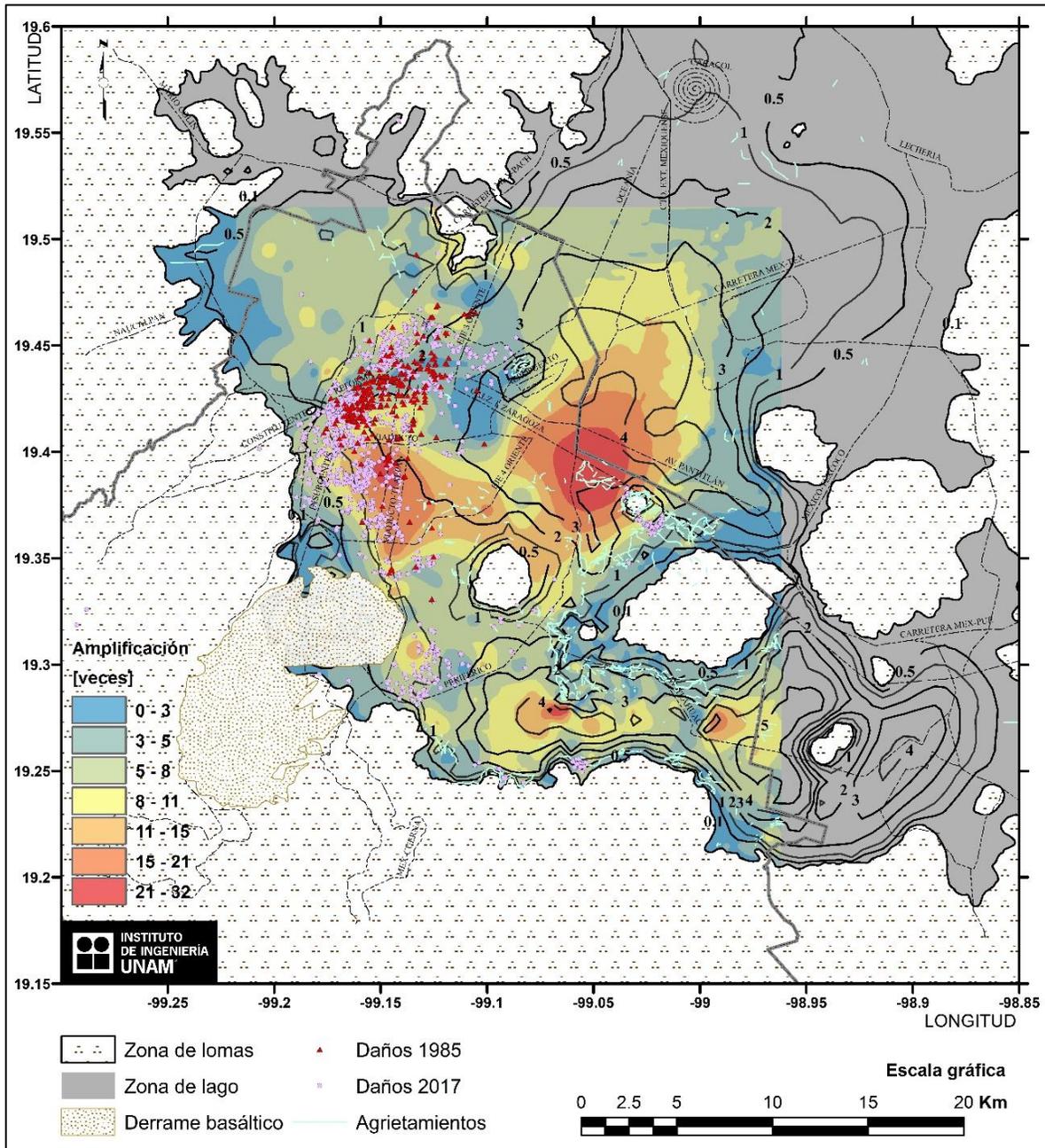
En la parte noroeste, las amplificaciones son moderadas (5-11 veces) y se ubican entre las curvas de 0.5 y 1.0 s, abarcando una extensa área que incluye prácticamente toda la alcaldía Azcapotzalco. En la estructura semicircular definida a un costado del Cerro del Tepeyac, las amplificaciones son menores en el centro que en el límite establecido por la curva de 1.0 s. Por último, al noreste las amplificaciones varían progresivamente de valores bajos, cerca del Cerro Tepeyac, hacia valores altos, en el aeropuerto de la Ciudad de México (Figura 4.4).

La zona de daños de los sismos de 1985 y 2017 en el centro de la Ciudad de México, en la alcaldía Cuauhtémoc, se ubican en un área de baja amplificación. Esto tiene que ser confirmado con más estudios debido a que en esta zona hubo gran amplificación, sobre todo durante el sismo de 1985. Al poniente de la ciudad, los daños ocasionados por el sismo de 2017 se ubican en una zona de amplificaciones altas, que abarcan las curvas de periodo de 0.5 a 1.5 s. Al sur, los daños se presentaron en zonas dispersas de altas y bajas amplificaciones, especialmente en la alcaldía Xochimilco (Figura 4.4).

Los agrietamientos, en general para toda la zona de estudio, se ubican en la transición entre amplificaciones bajas y amplificaciones moderadas, especialmente las grietas que se presentan en la subcuenca de Xochimilco-Chalco. Algunas grietas, en específico las que se ubican entre el Cerro de la Estrella, el Peñón de los Baños y el Peñón del marques, se presentan en donde las amplificaciones son altas (Figura 4.4).

En general, se puede observar una tendencia a aumentar la amplificación relativa en función del aumento del periodo. Sin embargo, en la zona poniente de la ciudad, la amplificación de más de 10 veces, no muestra la tendencia mencionada, ya que está se encuentra entre 1.0 y 2.0 s del periodo dominante, pero si responde a la zona donde los daños provocados por los terremotos de 1985 y 2017

fueron mayores. Lo que muestra que probablemente este sea otro de los factores que se necesitan conocer para responder por qué la distribución de daños se concentró en esta zona (Figura 4.4).



**Figura 4.4.** Mapa actualizado de amplificación relativa, basado en registros de temblores y en la amplitud del cociente espectral H/V, para la Ciudad de México y áreas aledañas. Las curvas de nivel representan los periodos dominantes. Se muestran en este mapa los daños del sismo del 19 de septiembre de 1985  $M_w$ 8.1 (puntos rojos), los daños del sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w$ 7.1 (puntos rosas) y los agrietamientos de la cuenca (líneas azul turquesa)

### 4.3 Mapa de espesor del suelo

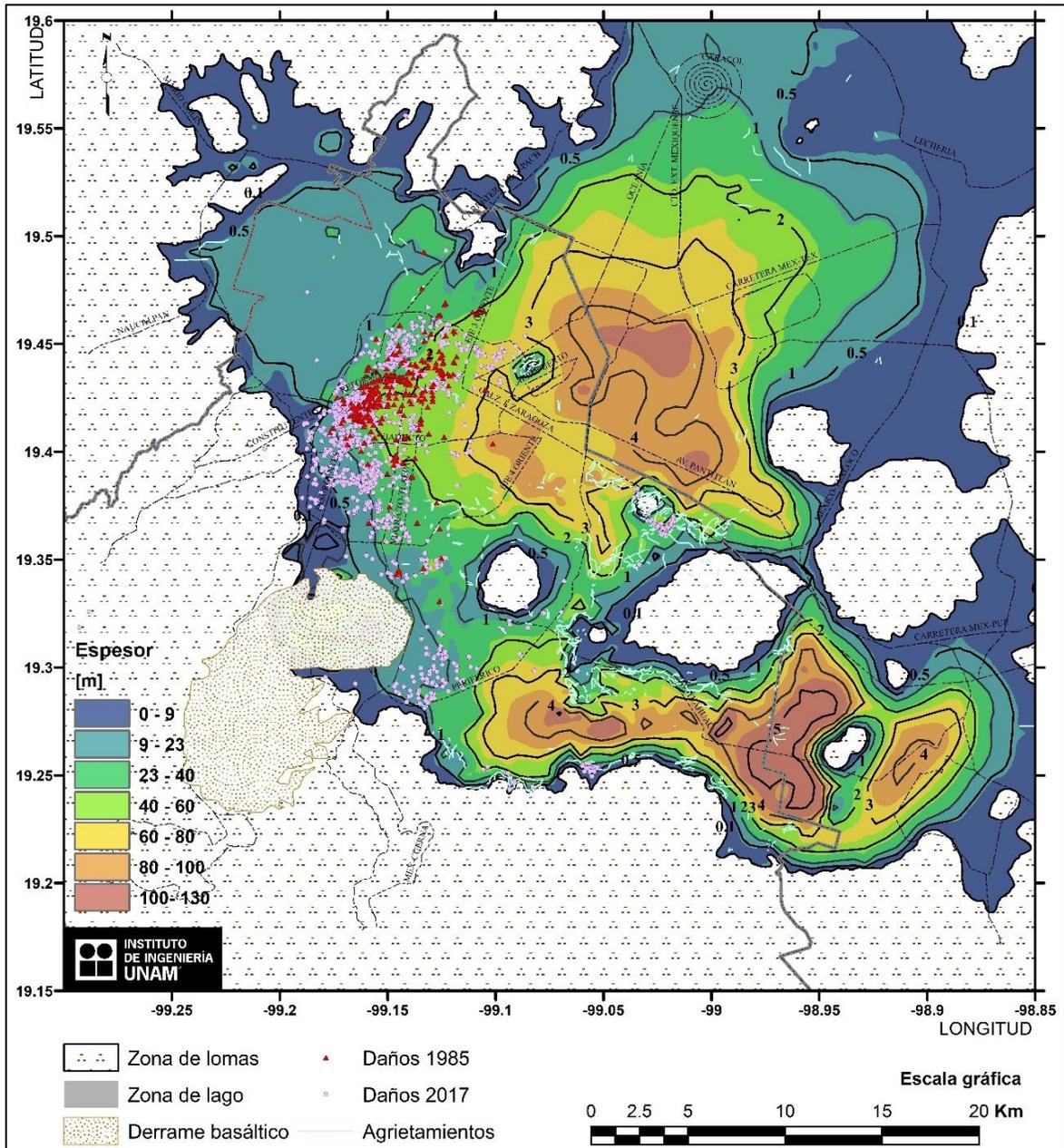
El mapa de espesor del suelo se actualizó con la información de periodo dominante disponible, a excepción de los datos ubicados en la zona del derrame basáltico del Xitle y en la alcaldía Álvaro Obregón en donde se considera que no hay sedimentos lacustres, y la relación potencial propuesta por Lermo et al. (2019). Debido a que este mapa se calculó con la información de periodo dominante, el espesor del suelo sigue la misma tendencia, siendo las zonas de máximo espesor del suelo en donde el periodo es alto (Figura 4.5). En la curva de 0.1 s, el espesor tiene un valor de 0 m.

En la subcuenca de Xochimilco-Chalco el espesor cambia de forma abrupta, en la transición entre las Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina, y los depósitos lacustres. Los valores más grandes se ubican en la parte central de los antiguos lagos de Xochimilco y Chalco, alcanzando valores de 130 m en este último. Entre estos dos lagos hay una zona de 60 a 80 m de espesor que los divide. Al sur del volcán Yuhualixqui se define una estructura N-S, que limita con la alcaldía Xochimilco, y que llega hasta los 60 de espesor. El área entre el Cerro de la Estrella y el derrame del Xitle el espesor varía de los 9 m hasta los 40 m. La transición de los valores de espesor en el Cerro de la Estrella es gradual hacia el norte y hacia el sur, con una zona de espesores máximos de 40 m hacia el volcán Yuhualixqui (Figura 4.5).

En el centro de la zona de estudio, la variación en el espesor es progresiva del poniente hacia el oriente, cambiando de valores mínimos cerca de la Sierra de las Cruces, hasta los valores máximos de esta subcuenca, en la parte central del antiguo lago de Texcoco. Entre el Peñón de Marques y el Peñón de los Baños hay un área de menor espesor (60-80 m) con alineamiento NW-SE. La transición de espesores en estos dos cerros también es abrupta (Figura 4.5).

Al noroeste, en la zona en la cual se actualizaron los periodos dominantes, el espesor varía entre 9 y 23 m sobre un área extensa que incluye la mayor parte de la alcaldía Azcapotzalco. En la estructura semicircular definida por el periodo dominante al norte de la Ciudad de México, al poniente del Cerro del Tepeyac, el espesor es mayor en la parte central. En la parte noreste, la variación en el espesor es progresiva, con valores 9 a 23 cerca del Cerro Texcoco y valores mayores a los 100 m cerca del aeropuerto de la Ciudad de México (Figura 4.5).

Los daños ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 1985  $M_w 8.1$  se ubican en la zona centro de la Ciudad de México, entre espesores de 23 a 60 m. Los daños del sismo del 19 de septiembre de se presentaron al poniente de la ciudad, entre espesores que van de los 9 hasta los 40 m aproximadamente, además también hubo daños en las alcaldías Xochimilco y Tláhuac en el mismo rango de espesores (Figura 4.5). Por último, las zonas de agrietamientos se ubican entre espesores que van desde 0 hasta 40 m, en especial las que se ubican en las transiciones entre las Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina y la zona de lago (Figura 4.5).



**Figura 4.5.** Mapa de espesor del suelo para la Ciudad de México y áreas aledañas. Las curvas de nivel representan los periodos dominantes. Se muestran en este mapa los daños del sismo del 19 de septiembre de 1985  $M_w$ 8.1 (puntos rojos), los daños del sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w$ 7.1 (puntos rosas) y los agrietamientos de la cuenca (líneas azul turquesa)

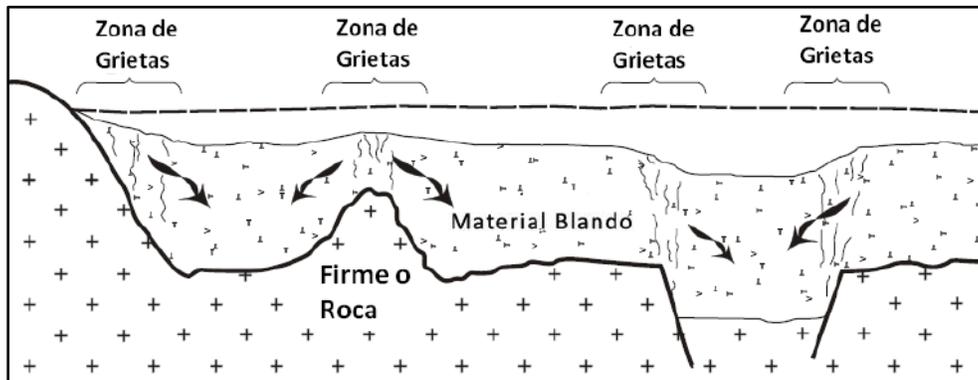
## 5. Microzonificación sísmica por alcaldías

Las mediciones de ruido sísmico consideradas en este trabajo se distribuyen por la mayoría de las alcaldías de la Ciudad de México, a excepción de las alcaldías de la zona sur, Milpa Alta, Tlalpan, La Magdalena Contreras y Milpa Alta, en donde normalmente se considera que no existe el fenómeno de efecto de sitio. Es decir, se tiene suficiente información en la Ciudad de México para considerar la zonificación a una menor escala. Por lo tanto, en este estudio se proponen mapas de microzonificación sísmica en las 16 alcaldías que pertenecen a la Ciudad de México, los cuales son provisionales ya que se tienen que realizar estudios más detallados.

El propósito de realizar la microzonificación sísmica por alcaldías es incluirla en las actualizaciones posteriores de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, debido a que la actual zonificación es muy general y se requiere información más precisa para considerarla en los procesos constructivos. Además, en los estudios a detalle para la estimación del peligro sísmico de los Atlas de Peligros y Riesgos (CENAPRED, 2006) es necesario un estudio de microzonificación sísmica, considerando la amplificación relativa y el periodo dominante, para conocer a profundidad la respuesta sísmica de un sitio. Por lo tanto, los mapas de microzonificación sísmica por alcaldía, propuestos en este trabajo, se pueden considerar para mejorar los Atlas de Peligros y Riesgos, ya que muchos de ellos no incluyen esta información e incluso algunos no consideran el peligro sísmico.

Para realizar la microzonificación de una zona específica es necesario considerar distintos parámetros que aporten información valiosa para la comprensión del fenómeno sísmico y sus implicaciones. En este estudio se consideraron los siguientes parámetros, obtenidos directa e indirectamente por medio de las mediciones de ruido sísmico y el cociente espectral H/V, para realizar la microzonificación por alcaldías: periodo dominante, espesor del suelo y, en menor medida, la amplificación relativa.

Por otro lado, también se tomará en cuenta el fenómeno de las grietas que se generan en las arcillas lacustres de la cuenca del Valle de México. En específico, se considerarán los agrietamientos debidos a la consolidación regional o subsidencia en zonas de transición abrupta, ya que este mecanismo es el responsable de generar y propagar las grietas más importantes y destructivas. Estas se presentan en las zonas de transición abrupta entre suelos firmes y suelos blandos, y en zonas en donde existen estructuras geológicas enterradas (Figura 5.1). Estas grietas aparecen principalmente en los límites entre la Sierra de Chichinautzin, la Sierra de Santa Catarina, el Peñón de los Baños y el Peñón del Marqués, y las arcillas de las zonas lacustres. Están casi ausentes en los límites de la Sierra de las Cruces y el Cerro de la Estrella con las zonas de lago.



**Figura 5.1** Grietas debidas a la consolidación regional que se presentan en zonas de transición abrupta y en donde existen estructuras geológicas enterradas (Martínez-González, 2011).

También se consideran, de forma cualitativa, los daños ocasionados por los sismos del 19 de septiembre de 1985  $M_w 8.1$  y de 2017  $M_w 7.1$ . El primero, cuyos daños se manifestaron principalmente en la zona centro de la Ciudad de México, y el segundo, que ocasionó severas afectaciones en la zona poniente de la ciudad y en la zona sur, en donde aparecieron grietas de gran extensión, principalmente en las alcaldías Tláhuac, Xochimilco e Iztapalapa.

Los sismos locales que han ocurrido en la Ciudad de México se muestran en los mapas de microzonificación con fines representativos, sin ahondar en su análisis, para observar su distribución. Estos sismos pueden llegar a magnitudes mayores a 3.0, como el evento del 17 de julio de 2019  $M_w 3.2$ , que produjo aceleraciones de 0.3g en la estación más cercana, a 1 km de distancia. Estos eventos tienen que ser analizados en detalle para predecir el movimiento del suelo asociado a estos y evaluar el peligro.

Las mediciones de ruido sísmico históricamente se han realizado en la Zona de Lago de la Ciudad de México y áreas aledañas, dejando de lado la zona de lomas. El motivo principal es que se ha dado prioridad a las áreas en donde el efecto de sitio, debido a las arcillas lacustres, es relevante y en donde los sismos generalmente han ocasionado mayores daños. Además, se ha considerado que el cociente espectral H/V no muestra respuestas en el rango de frecuencias de interés en ingeniería (0.1-20 Hz), por lo que se considera que no hay efecto de sitio, aunque esto no es del todo cierto.

Con el aumento de las construcciones en la zona de lomas, como en el caso de Santa Fe ubicada entre las alcaldías Cuajimalpa y Álvaro Obregón, es necesario realizar estudios de microzonificación para comprender mejor como responderían ante un eventual sismo de diferente tipo de fuente. Además, en la zona de lomas existen diferentes estructuras superficiales, tanto geológicas como hechas por el hombre, como rellenos artificiales, barrancas, galerías de minas antiguas, cavernas, túneles, etc., que se tienen que evaluar. Por tal motivo, se han realizado mediciones de ruido sísmico en la Zona de Lomas, principalmente en la alcaldía Álvaro Obregón, en donde los resultados del cociente espectral H/V muestran que existe respuesta a bajas frecuencias. Por ello, se proponen mediciones de ruido sísmico en algunas alcaldías para evaluar la respuesta en la Zona de Lomas.

En algunas alcaldías se han realizado trabajos técnicos específicos, por lo que se mencionan algunos con fines comparativos. Además, es necesario aclarar que la microzonificación sísmica es diferente para cada alcaldía, ya que se tomaron en conjunto los parámetros y fenómenos antes mencionados para realizar la microzonificación, por lo que en algunas demarcaciones se les da mayor importancia a las grietas y en otras al periodo dominante y a la amplificación relativa.

## 5.1 Álvaro Obregón

La alcaldía Álvaro Obregón se localiza al poniente de la Ciudad de México: colinda al norte con la alcaldía Miguel Hidalgo; al oriente, con las alcaldías Benito Juárez y Coyoacán; al sur, con las alcaldías La Magdalena Contreras y Tlalpan, y el municipio de Jalatlaco, Estado de México; y al poniente, con la alcaldía Cuajimalpa. La alcaldía ocupa una superficie de 7,720 ha, que representan el 6.28 % del área total de la Ciudad de México, de las cuales se localizan 5,052 ha en suelo urbano y 2,668 ha en suelo de conservación, que representan el 66.1% y el 33.8%, respectivamente (SPC, 2014a).

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Álvaro Obregón (SPC, 2014a) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: fallas geológicas, hundimientos, taludes, caída de rocas, derrumbes y zonas minadas. El riesgo más grande para las viviendas, las cuales se han construido de manera informal e incumpliendo los requerimientos de seguridad, lo representan las minas, oquedades y derrumbes. En este Atlas no se presenta mapas del peligro o riesgo por sismo, por lo tanto, la microzonificación sísmica aportará información importante a esta alcaldía.

En la alcaldía Álvaro Obregón se realizaron 120 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa por medio del cociente espectral H/V (Figura 5.2). El objetivo fue comprobar que, en esta alcaldía, considerada en la zonificación geotécnica como Zona de Lomas y, por ende, sin efecto de sitio, el cociente espectral no es “plano” y tiene picos incluso a bajas frecuencias con amplificación considerable. Este resultado debe considerarse en las NTCDS y en el Atlas de Peligros y Riesgos, debido a que hay zonas densamente pobladas y se están realizando nuevas construcciones de altura considerable, sobre todo en la zona de Santa Fe.

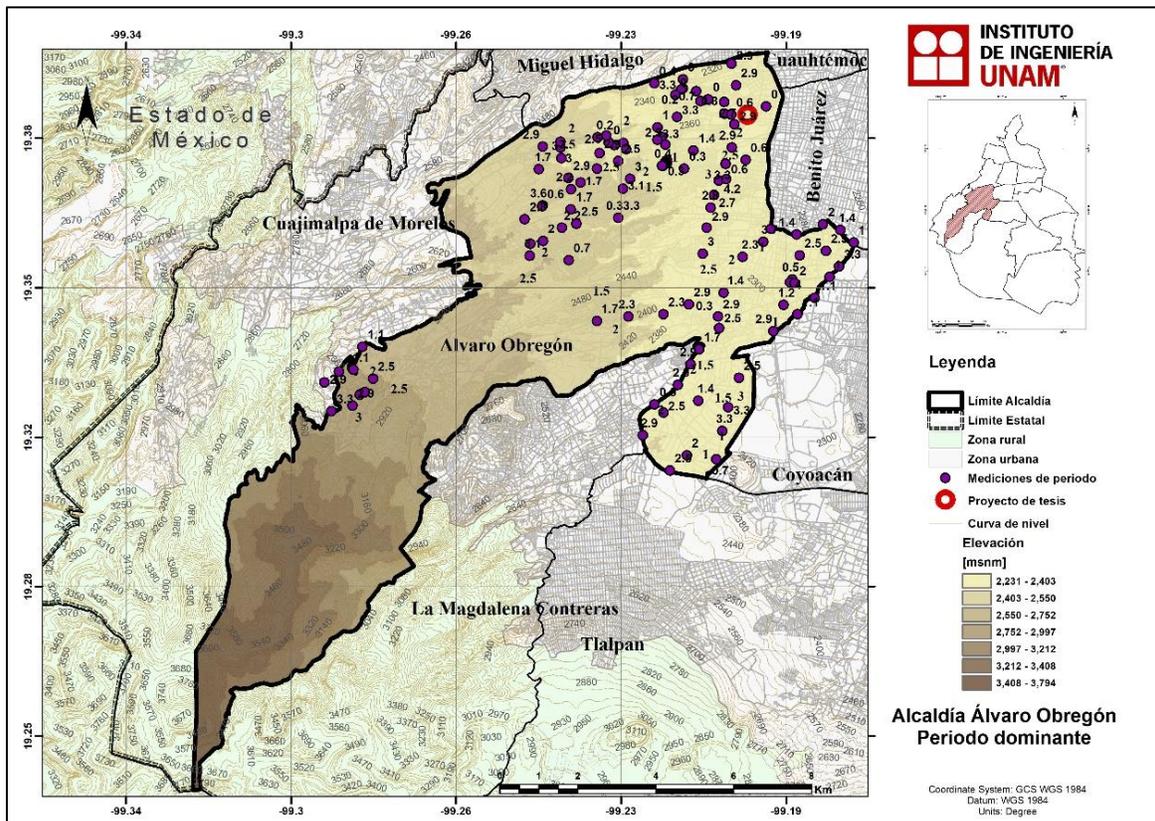
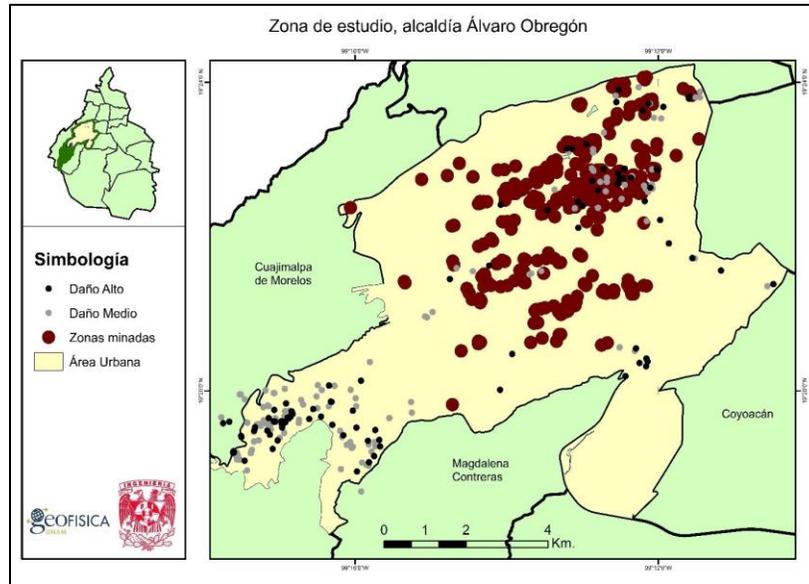


Figura 5.2. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Álvaro Obregón.

En esta alcaldía se realizó un trabajo de investigación de tesis (López-Maldonado, 2020) debido a que como está considerada en su mayoría dentro de la Zona de Lomas, se realizaron los mapas de periodo dominante para correlacionarlo con las zonas de minas y daños producidos por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (Figura 5.3).

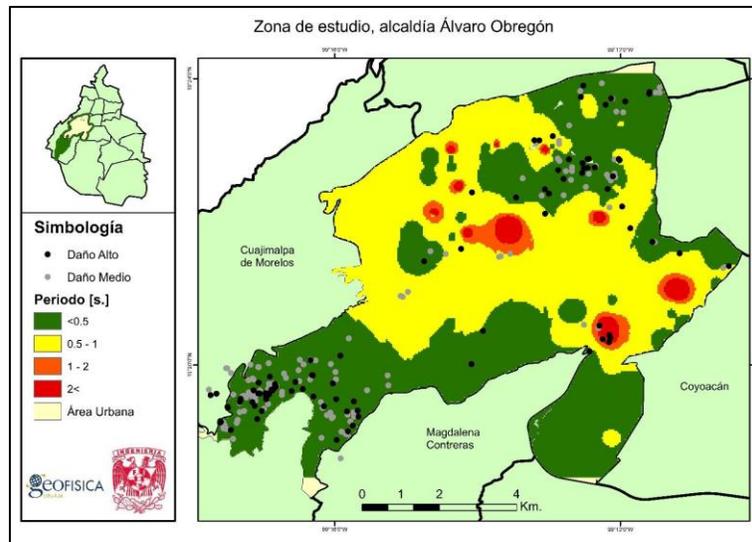


**Figura 5.3.** Mapa de zonas minadas en relación con los daños ocurridos en el sismo de 19 de septiembre de 2017. (Tomada de López-Maldonado, 2020).

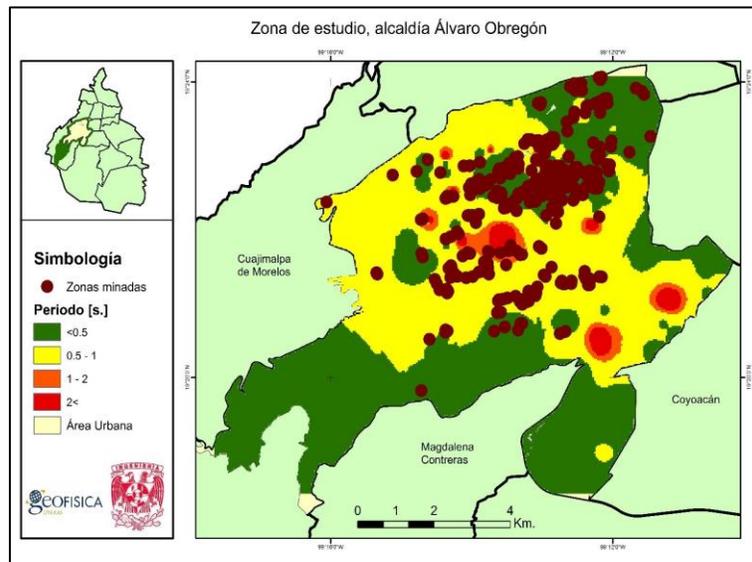
Se realizó una microzonificación sísmica en la zona urbana de la alcaldía Álvaro Obregón con la finalidad de estimar periodos dominantes, amplitudes relativas, así como también correlacionar con los daños ocurridos después del terremoto de falla normal a menos de 120 km de la Ciudad de México y de  $M_w 7.1$ , el 19 de septiembre de 2017 y las zonas de minadas. Los resultados de este trabajo ayudaron a verificar que existen sitios dentro de la llamada Zona de Lomas en los que encontramos una respuesta doble en algunas estaciones; que debe tomarse en consideración para fines de reglamentación en construcciones.

En las zonas con movimientos de periodo corto (menores a 0.5 s.) se esperan daños a viviendas de uno a dos niveles. Al observar la distribución espacial de los daños a viviendas reportados por Protección Civil en Álvaro Obregón (2018) se identificó una relación de estas afectaciones con el periodo dominante. Se observó también dos zonas con periodos cortos, menores de 0.5 s., en las cuáles se concentraron la mayor parte de los daños del sismo de magnitud 7.1 en 2017 (Figura 5.4, círculo oscuro, daño alto; círculo claro, daño medio).

Por otra parte, las zonas minadas se ubican al centro y noreste de la alcaldía (Información de minas recuperada del Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Álvaro Obregón (SPC, 2014a) en donde los periodos dominantes son menores a 0.5 s y alcanzan valores de hasta 1.0 s (Figura 5.5, círculos rojos, zonas minadas).



**Figura 5.4.** Mapa de periodo dominante y daños ocurridos en el sismo del día 19 de septiembre de 2019 (Información de viviendas dañadas proporcionada por Protección Civil de la Alcaldía Álvaro Obregón, 2018). (Tomada de López-Maldonado, 2020).



**Figura 5.5.** Mapa de periodo dominante y zonas minadas en Álvaro Obregón. (Información de minas presentes en Álvaro Obregón recuperada de Atlas de Peligros Naturales y Antropogénicos para la Delegación Álvaro Obregón (2010)). (Tomada de López-Maldonado, 2020).

El periodo dominante varía desde 0.5 s, en el límite entre la Sierra de las Cruces y la zona lacustre, hasta alcanzar valores de 3.0 s (Figura 5.6). El periodo en la Zona de Lago, en la pequeña zona al oriente de la alcaldía, alcanza valores de hasta 2.0 s. En la parte centro, sureste y suroeste, el periodo oscila entre valores de 1.5 y 3.0 s.

La variación de la amplificación relativa no es tan grande como en otras alcaldías, ya que oscila entre valores de 2 veces hasta 10 veces (Figura 5.6). Al oriente de la alcaldía hay una franja, que recorre

de norte a sur esta área, de amplificaciones bajas. En las demás regiones, la amplificación varía de 4 hasta 10 veces.

Para esta demarcación, el espesor del suelo sólo se considera en la parte oriente, ya que es la única zona en donde existen depósitos de arcilla lacustre. El espesor en el límite entre la Sierra de las Cruces y la zona de lago es de 0 m y crece hacia el este, llegando a valores de 60 m aproximadamente (Figura 5.7). En la Sierra de las Cruces el espesor no se considera, aunque tendría que evaluarse de manera detallada ya que existen zonas con depósitos sedimentarios de espesor considerable.

La alcaldía se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica, que difieren de las propuestas por López-Maldonado (2020), debido a que aquí se considera también la amplificación relativa (Figura 5.8). En la Zona I la amplificación tiene valores bajos y en esta zona no hay zonas minadas ni fracturas. La Zona II muestra amplificaciones medias y tampoco se aprecian zonas de minas o fracturas. La Zona III abarca la mayor parte de la alcaldía, ya que se consideran amplificaciones medias y altas, además que engloba las zonas de minas y fracturas. En este mapa también se puede apreciar la sismicidad local de la zona, que aparece principalmente al noreste de la alcaldía, en los límites con las alcaldías Benito Juárez y Miguel Hidalgo.

La microzonificación sísmica de esta alcaldía debe ser revisada nuevamente para considerar otros peligros como deslizamientos y fracturas, además de realizar un análisis de la sismicidad local, que puede generar aceleraciones muy grandes en la superficie, lo que afectaría gravemente las construcciones de la zona.

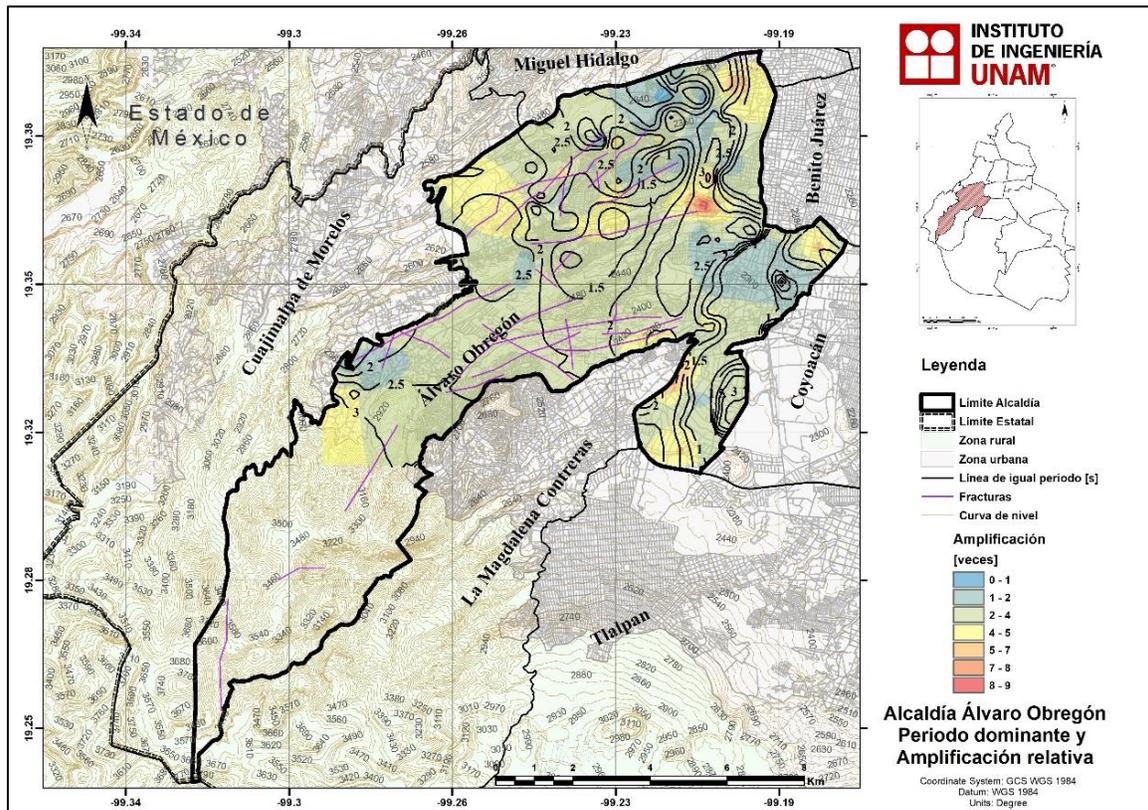


Figura 5.6. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Álvaro Obregón.

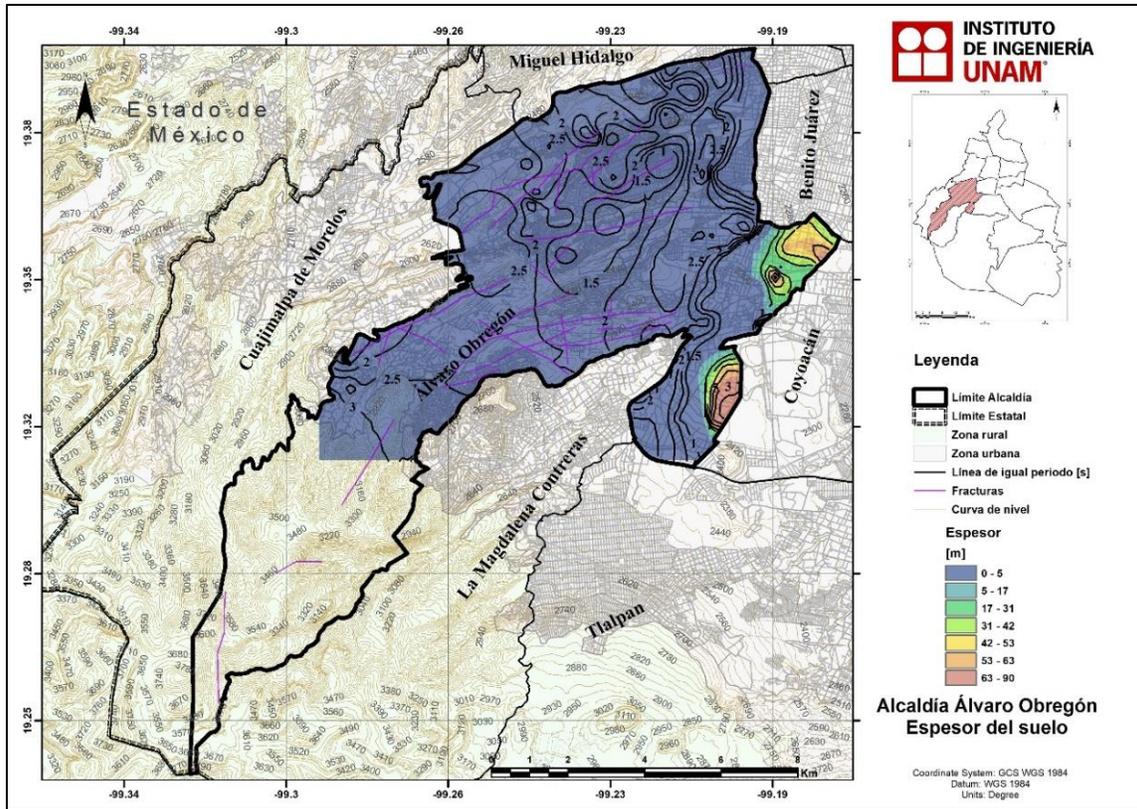


Figura 5.7. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Álvaro Obregón.

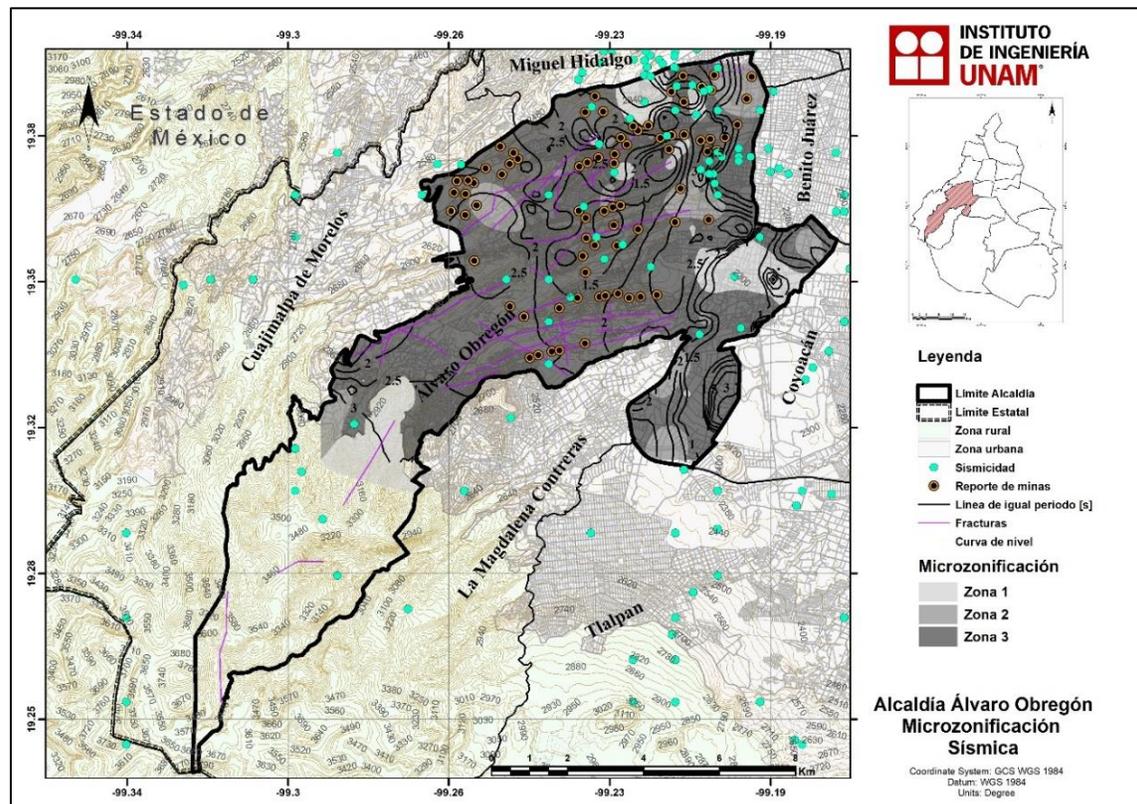


Figura 5.8 Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Álvaro Obregón.

## 5.2 Azcapotzalco

La alcaldía Azcapotzalco se localiza en la parte noroeste de la Ciudad de México y al centro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Colinda al norte con el municipio de Tlalnepantla de Baz; al este, con la alcaldía Gustavo A. Madero; al sur, con las alcaldías Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo; y al oeste, con el municipio de Naucalpan. Tiene una superficie territorial de 3,330 ha, que corresponde al 2.24% de la superficie total de la Ciudad de México y al 4.4% de la zona urbana de la entidad (SPC, 2014b). De acuerdo a las NTC-DS (2017), esta alcaldía se ubica en la Zona de Transición, de acuerdo a la zonificación geotécnica, y en la Zona II, de acuerdo a la zonificación sísmica.

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Azcapotzalco (SPC, 2014) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: el hundimiento regional y el sísmico. El riesgo sísmico, en este trabajo, se basa completamente en la zonificación geotécnica. Una pequeña parte de la zona oriente de la alcaldía se ubica en la Zona de lago (Zona III), en la cual inciden los mayores daños y la que ha sido identificada como de peligro sísmico alto. El poniente de la alcaldía se ubica en Zona de Transición (Zona II) y se considera que la vulnerabilidad en términos sísmicos es media.

Por lo tanto, para realizar la microzonificación sísmica de la alcaldía Azcapotzalco se tomaron en cuenta las 36 mediciones de ruido sísmico que se han realizado, con el objetivo de obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V, además de calcular el espesor del suelo (Figura 5.9).

El periodo dominante en Azcapotzalco varía de 0.6 a 1.2 s (Figura 5.10) y se distribuye de la siguiente forma: de noroeste a sureste se aprecia una estructura que se define por la curva de 0.7 s; en la parte suroeste, el periodo alcanza valores de 1.0 s; y, finalmente, en la parte este de la alcaldía se registraron los periodos más grandes, llegando hasta los 1.2 s al sureste.

La amplificación relativa se ubica en el rango de 2 hasta 11 veces (Figura 5.10). Los valores más grandes se ubican hacia el sureste, en donde se alcanzan amplificaciones de hasta 11 veces, cerca de la Zona de Lago. Por otro lado, las amplificaciones bajas se ubican hacia el suroeste, en los límites de la alcaldía con la Zona de Lomas.

El espesor del suelo se distribuye de la misma forma que el periodo en la alcaldía y varía desde los 11 hasta los 29 m (Figura 5.11). La estructura que va del noroeste al sureste tiene un espesor entre los 13 y 16 m. Los espesores más grandes se ubican la suroeste y al sureste, alcanzando valores en este último de hasta 29 m.

La microzonificación sísmica se realizó considerando tres zonas (Figura 5.12). La Zona I se ubica en periodos menores a los 0.6 s, espesores de hasta 10 m y amplificaciones medias, y abarca la parte central de la estructura que recorre la alcaldía de noroeste hacia el centro. La Zona II abarca los límites de la estructura hasta los 0.8 s de periodo y los 15 m de espesor. Por último, la Zona III está relacionada con las áreas de periodos y espesores más grandes, además de amplificación alta, y se distribuye en la parte suroeste y sureste de la demarcación. Finalmente, esta Zona III debe ser considerada en los reglamentos de construcción, ya que las zonas con una amplificación relativa mayores a los 8 veces, periodos menores a los 0.8 segundos y con estratos de suelo menores a los 30 metros, puede ser peligroso para viviendas económicas y populares de baja altura.

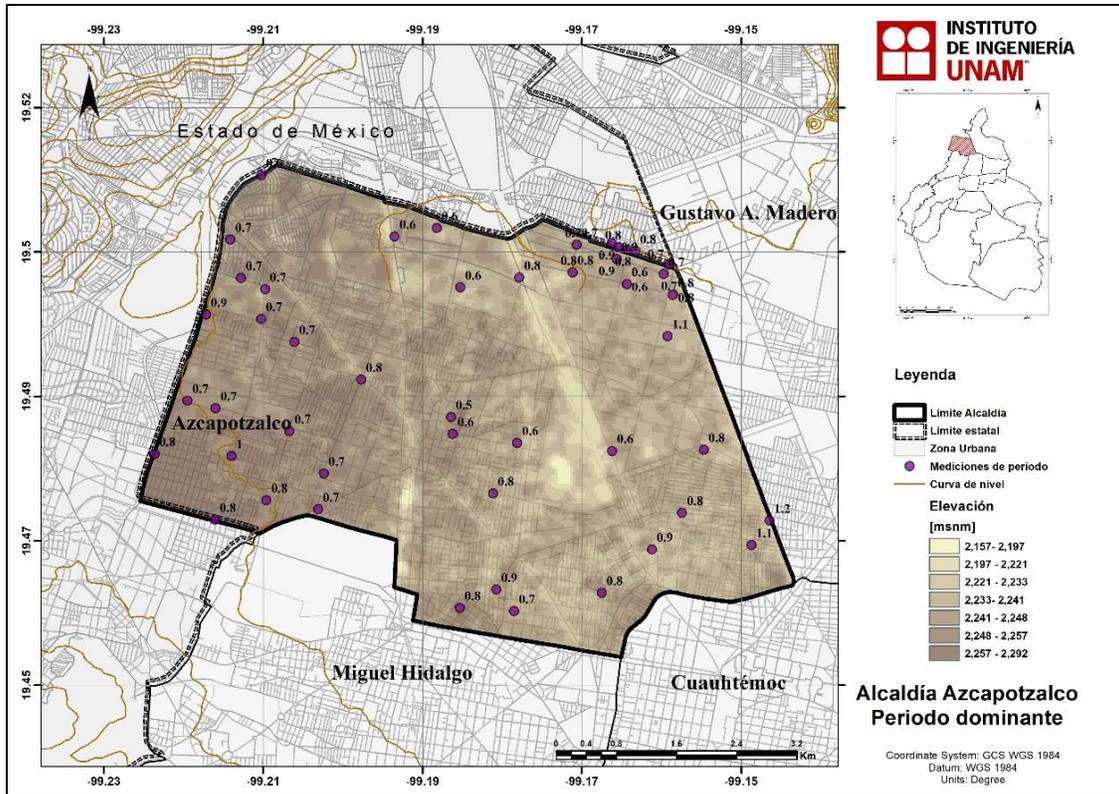


Figura 5.9. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Azcapotzalco.

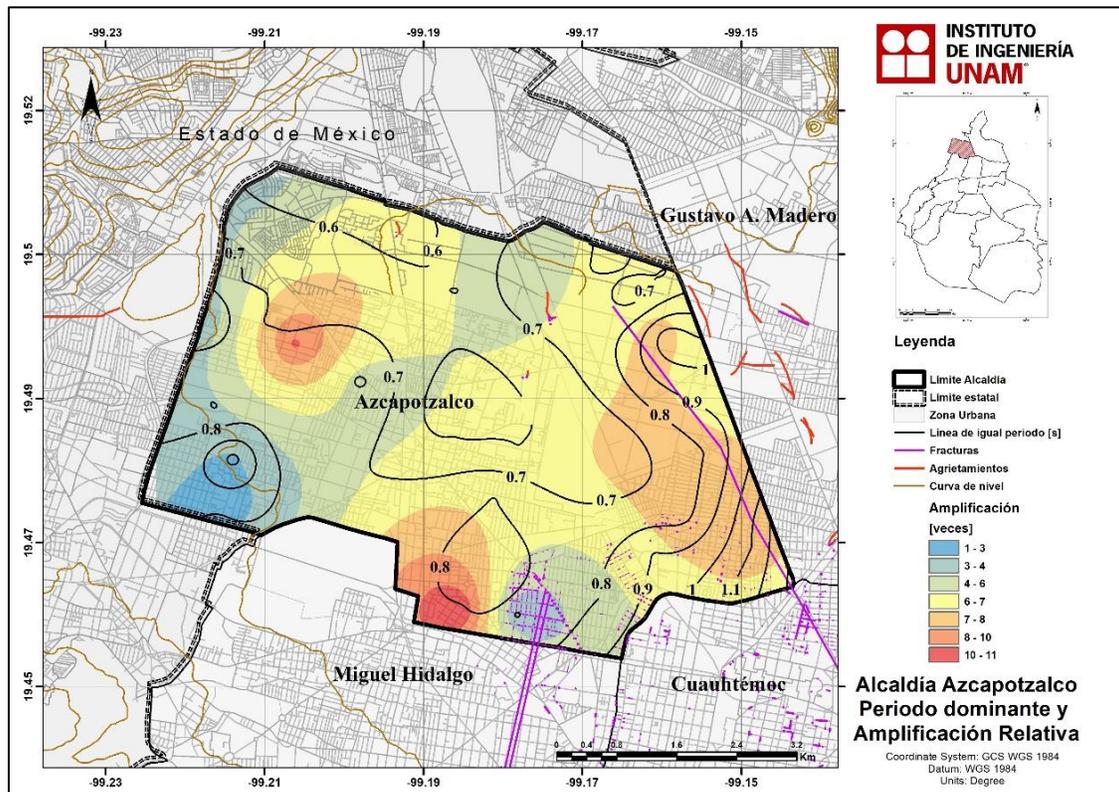
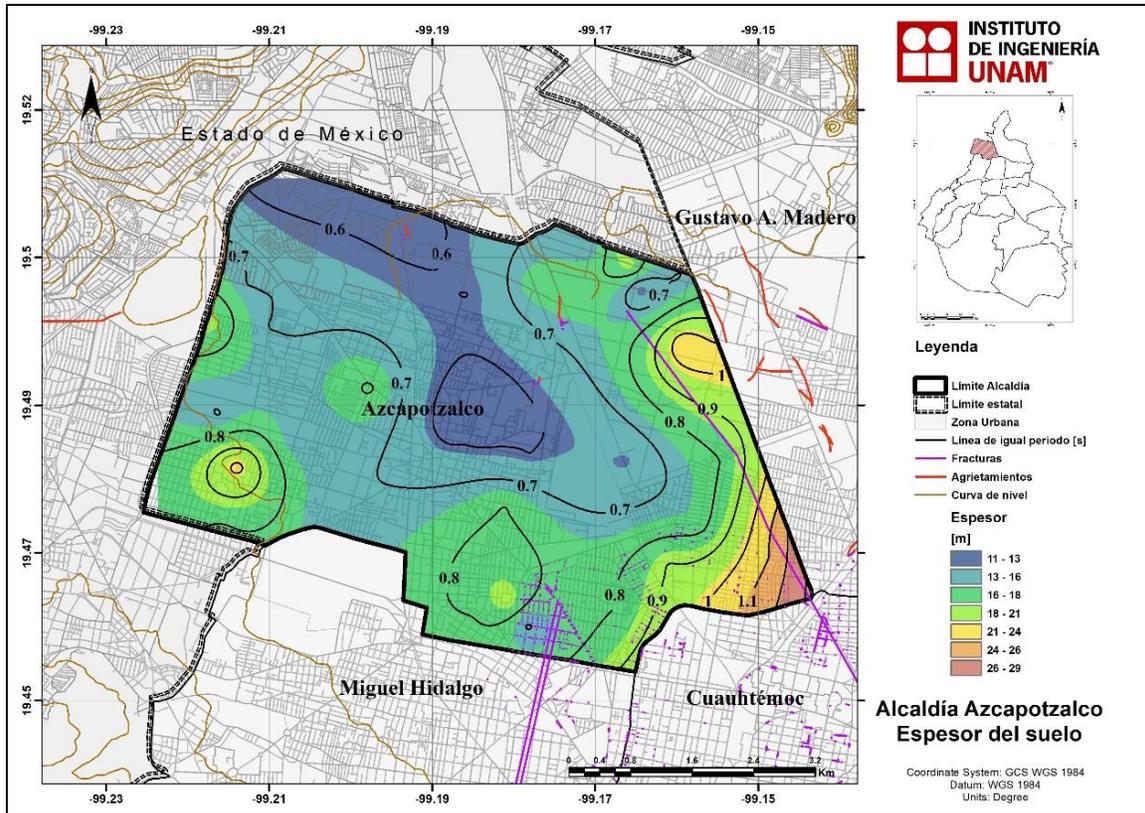
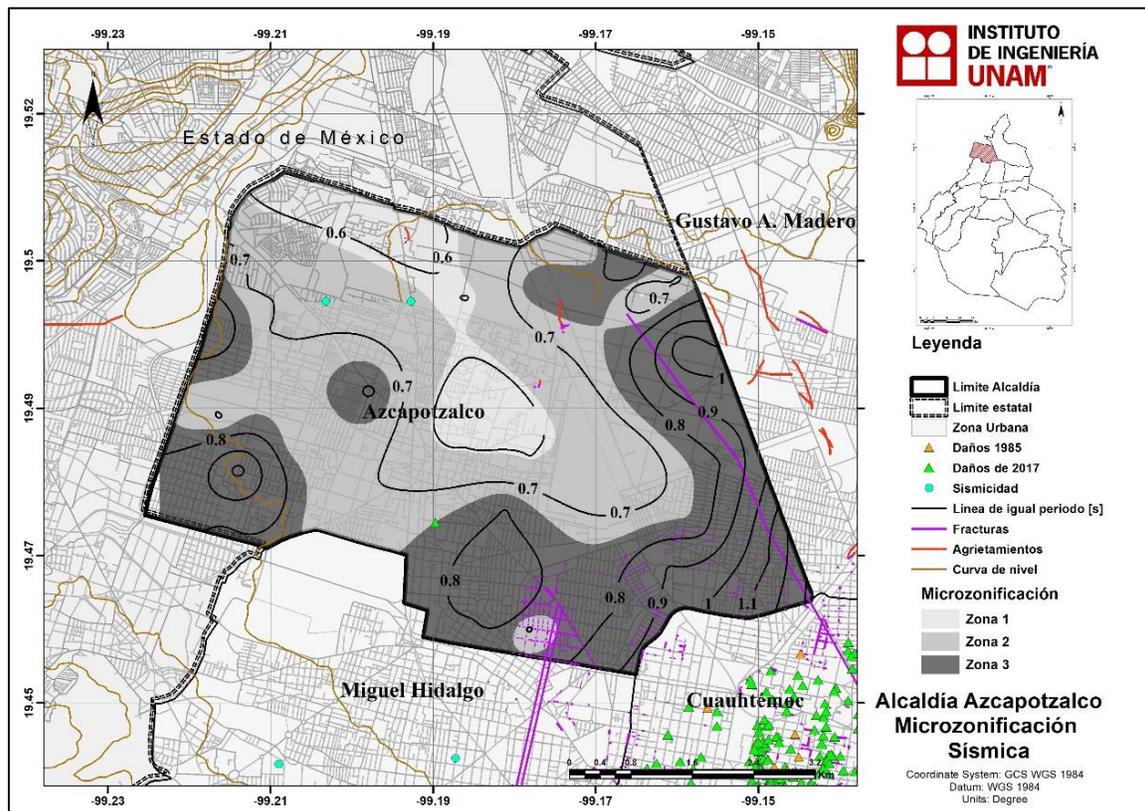


Figura 5.10. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Azcapotzalco.



**Figura 5.11.** Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Azcapotzalco.



**Figura 5.12.** Mapa de Microzonificación sísmica para la alcaldía Azcapotzalco.

### 5.3 Benito Juárez

La alcaldía Benito Juárez se localiza en la parte central de la Ciudad de México. Colinda al norte con las alcaldías Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo; al este, con las alcaldías Iztacalco e Iztapalapa; al sur, con la alcaldía Coyoacán; y al oeste, con la alcaldía Álvaro Obregón. Tiene una superficie territorial de 26.63 km<sup>2</sup> que representa el 1.8 % de la superficie de la Ciudad de México. De acuerdo a las [NTC-DS \(2017\)](#) esta demarcación se ubica entre las Zonas de Lomas, Transición y Lago, de acuerdo a la zonificación geotécnica, y entre las Zonas I, II, IIIa, IIIb y IIIc, de acuerdo a la zonificación sísmica. En esta alcaldía no se cuenta con la información del Atlas de Peligros y Riesgos para fines comparativos.

Para realizar la microzonificación sísmica de la alcaldía Benito Juárez se tomaron en cuenta las 41 mediciones de ruido sísmico que se han realizado, con el objetivo de obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V, además de calcular el espesor del suelo (Figura 5.13).

La variación en el periodo dominante para esta alcaldía es significativa, debido a que varía desde los 0.0 s hasta los 2.2 s (Figura 5.14). Al suroeste de la alcaldía, en la parte que se ubica en la Sierra de las Cruces, el periodo comienza en 0.0 s y cambia de manera regular hasta llegar al noreste, en donde se registraron los periodos más grandes llegando hasta los 2.2 s, que se encuentra en la Zona de Lago.

La amplificación relativa varía de 0 hasta llegar a las 26 veces, lo que indica una variación bastante significativa en esta demarcación (Figura 5.14). Al igual que el periodo, al suroeste los valores comienzan en 0 veces, es decir, no se presenta amplificación en la parte de la Sierra de las Cruces, y llegan hasta las 26 veces en la zona centro y noreste de la alcaldía.

El espesor del suelo también cambia de manera considerable desde los 0 m hasta los 50 m (Figura 5.15). En la parte suroeste de la alcaldía, el espesor comienza en 0 m justo en el límite entre la Sierra de las Cruces y los depósitos lacustres, y llega hasta los 50 m en la parte noreste de la demarcación.

La microzonificación sísmica de la alcaldía se dividió en tres zonas (Figura 5.16). La Zona I se ubica al suroeste, en donde se encuentra la Sierra de las Cruces y se considera que no hay efecto de sitio. En esta zona no hay grietas y prácticamente no hubo daños durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. La Zona II se ubica en donde el periodo va de 0.0 hasta 0.5 s, la amplificación cambia de 0 hasta 5-9 veces y el espesor va de 0 hasta 4-12 m. En esta zona tampoco se ubican grietas y los daños debidos al sismo del 2017 fueron mínimos. Por último, la Zona III se ubica a partir de los 0.5 s de periodo, de las 5-9 veces de amplitud y de los 12 m de espesor. Esta zona abarca toda la parte centro y noreste de la alcaldía y, aunque no se presentan grietas, en esta zona se presentaron la mayor cantidad de daños debidos al sismo del 2017.

Por último, la Zona III se ubica a partir de los 0.5 s hasta los 2 segundos de periodo dominante, así como la amplificación relativa llegó hasta las 26 veces, y su profundidad del espesor de suelo hasta el estrato resistente crece hasta los 50 metros. Aun cuando no se observan grietas, ni fracturas, la combinación del periodo dominante del suelo entre 0.5 a 2 segundos, y la amplificación relativa hasta 26 veces, para estratos de suelo blando de hasta 50 metros, sobre un estrato resistente, ***se tiene que tener en cuenta como un factor importante en el origen de la distribución de daños*** debido a los terremotos del 19 de septiembre de 1985 Mw8.1 (figura 5.16, triángulos de color naranja) y 2017 Mw7.1 (figura 5.16, triángulos de color naranja).

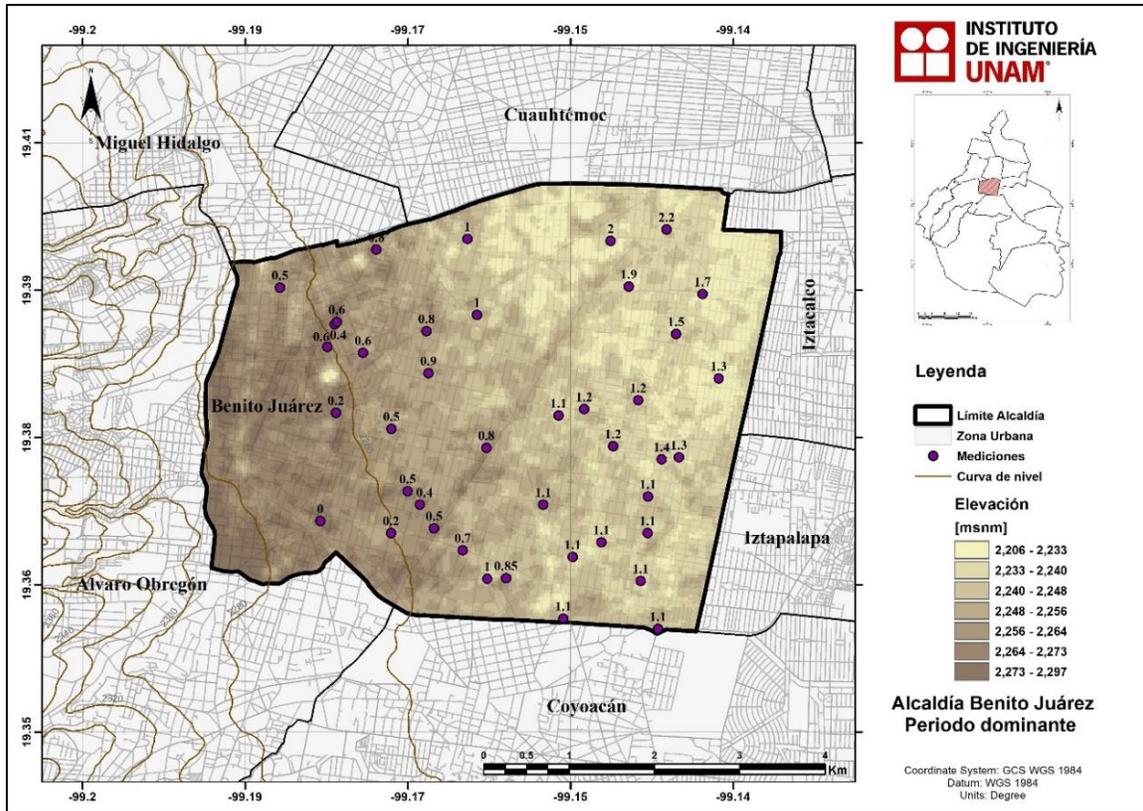


Figura 5.13. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Benito Juárez.

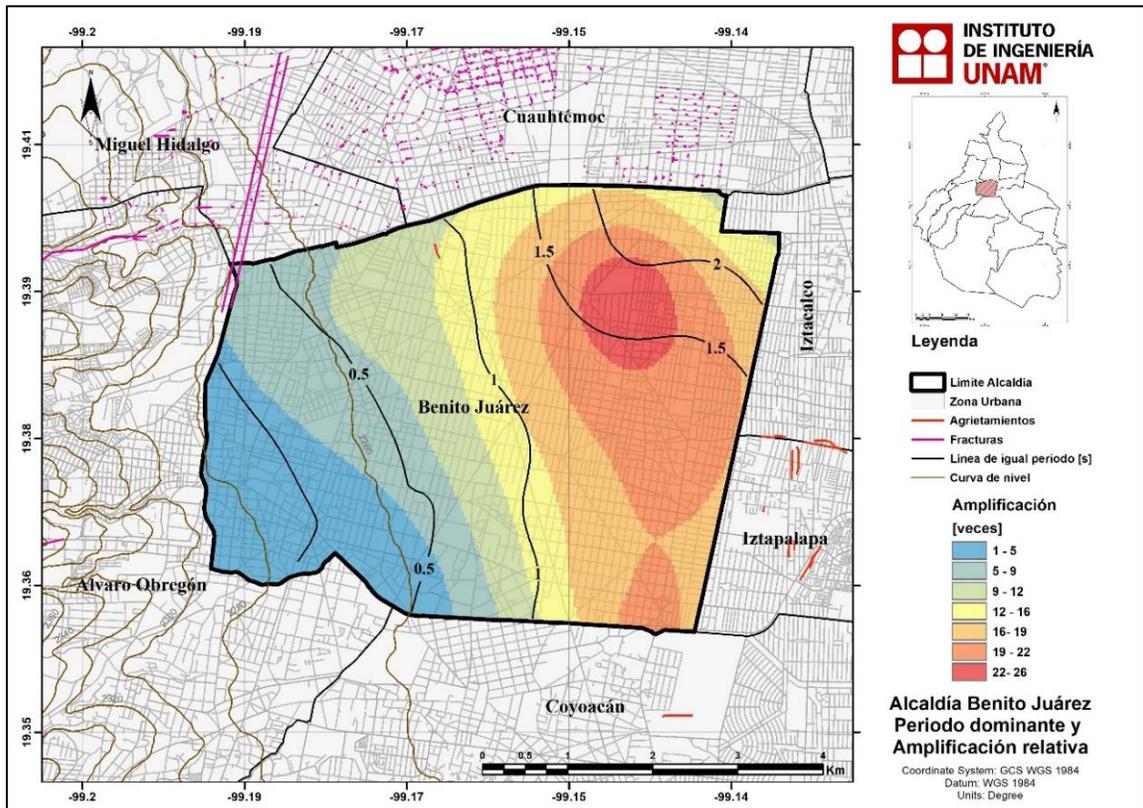


Figura 5.14. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Benito Juárez.

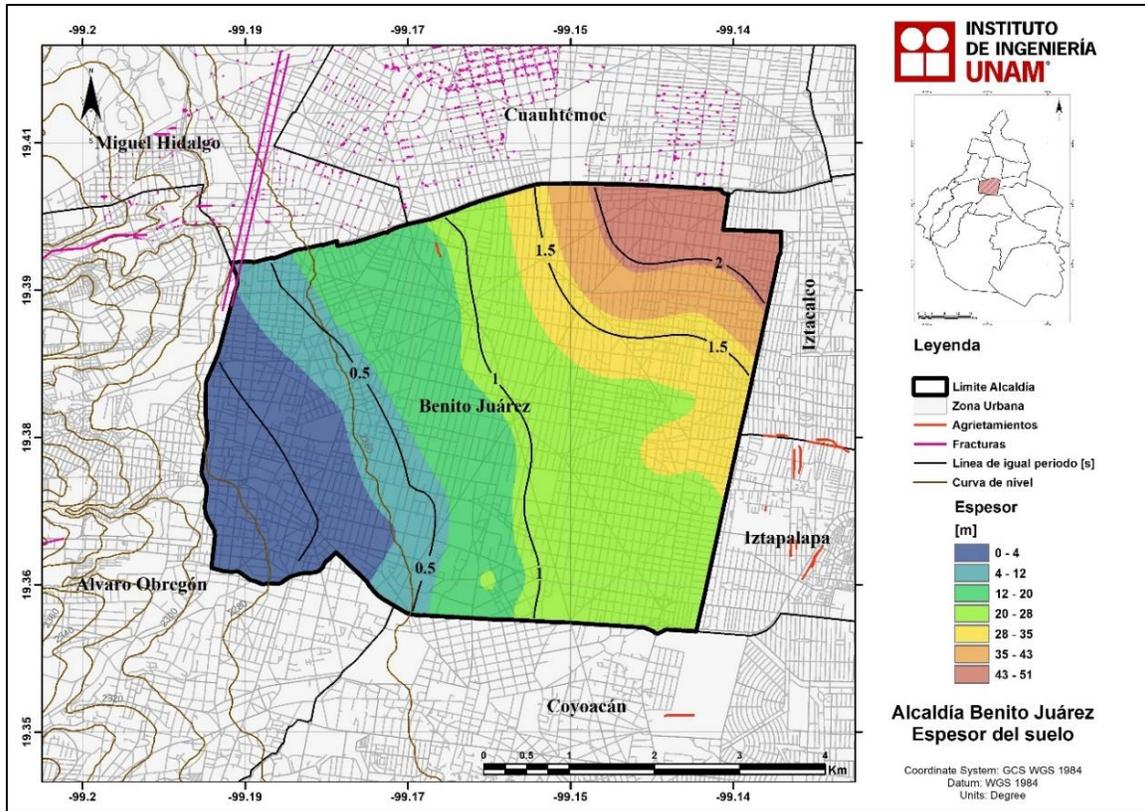


Figura 5.15. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Benito Juárez.

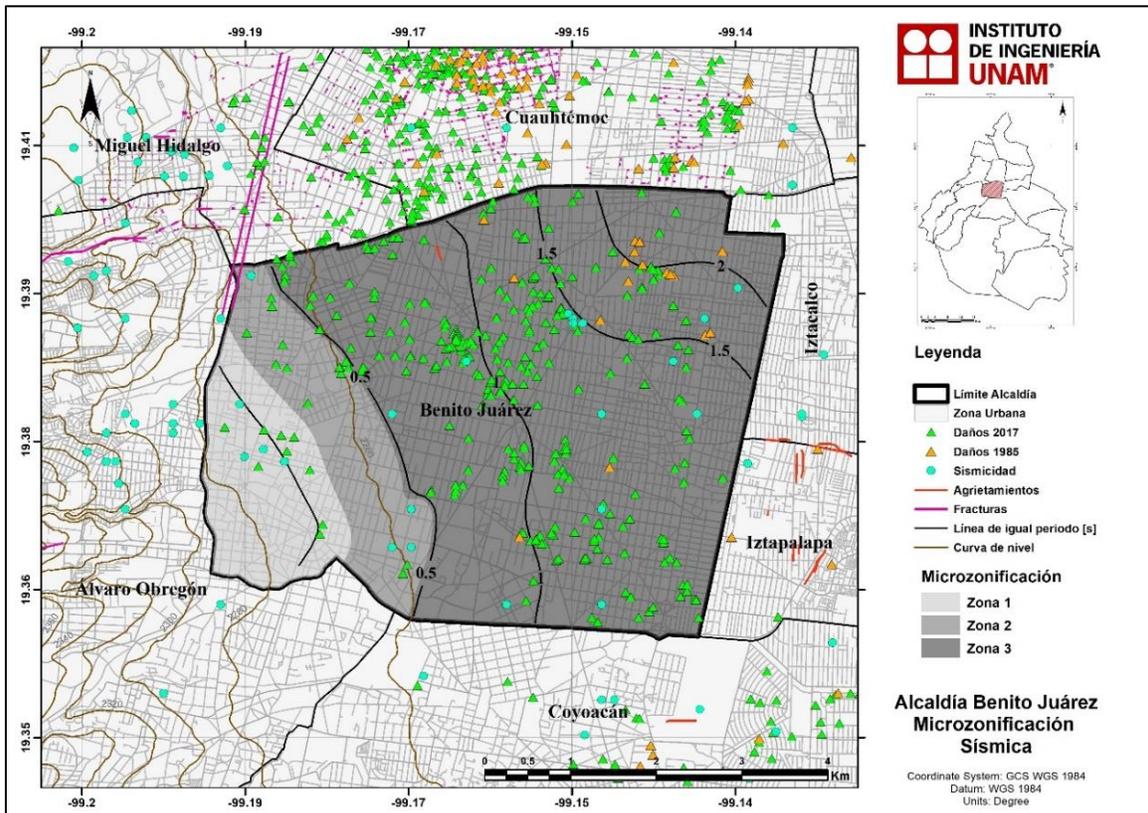
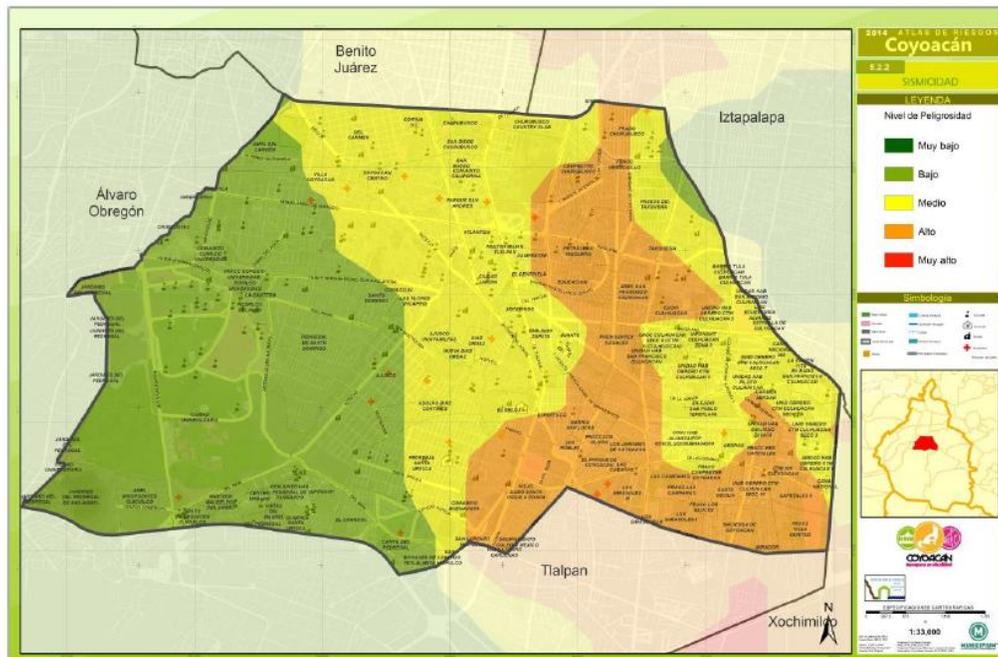


Figura 5.16. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Benito Juárez.

## 5.4 Coyoacán

La alcaldía Coyoacán se ubica en el centro de la Ciudad de México. Limita al norte con la alcaldía Benito Juárez; al noreste con la alcaldía Iztapalapa; al oriente también con la alcaldía Iztapalapa; al sureste con la alcaldía Xochimilco; al sur con la alcaldía Tlalpan y, al poniente, con la alcaldía Álvaro Obregón (SEDATU, 2015a). El área de la alcaldía es de 54.4 km<sup>2</sup>, lo que significa el 3.6 % de la superficie de la Ciudad de México.

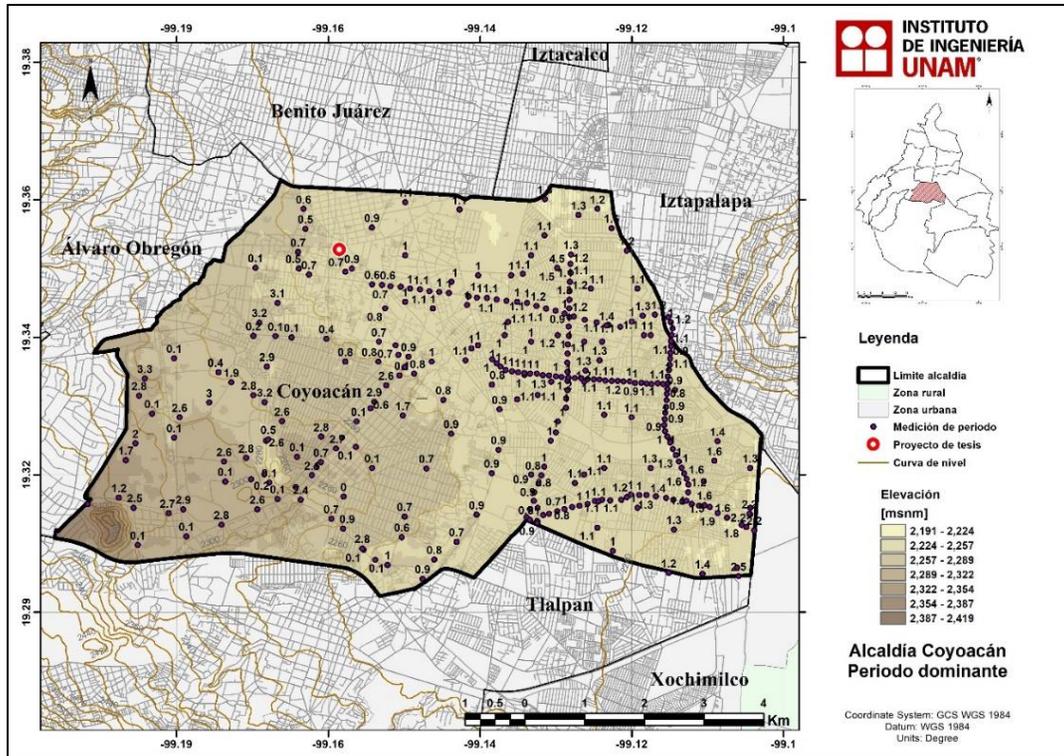
El Atlas de Riesgos de la alcaldía Coyoacán (SEDATU, 2015a) considera el peligro sísmico en función de la respuesta de los materiales del subsuelo ante la amplificación de las ondas sísmicas, es decir, por medio de la zonificación geotécnica de la Ciudad de México. La Zona de Lomas se considera como peligro muy bajo o bajo, mientras que la Zona de Lago se considera como peligro alto y muy alto (Figura 5.17). De acuerdo a este diagnóstico simple, la alcaldía de Coyoacán fue dividida en tres tipos de peligro sísmico: dos zonas con peligro bajo (Figura 5.17, zonas de color verde), dos zonas con peligro medio (Figura 5.17, zonas de color amarillo), y una zona con peligro alto (Figura 5.17, zonas de color naranja).



**Figura 5.17.** Mapa de peligro sísmico para la alcaldía Coyoacán de acuerdo con el Atlas de Riesgos.

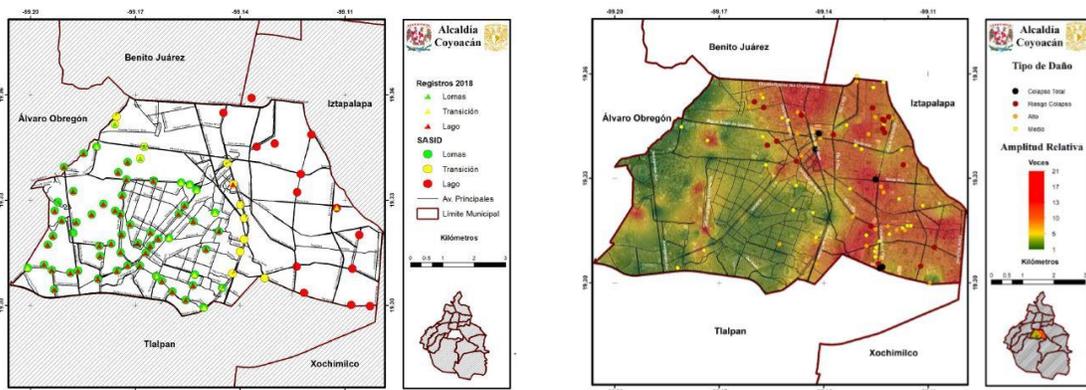
En la alcaldía Coyoacán se han realizado 313 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.18, puntos circulares de color morado) de las cuáles 85 mediciones se realizaron recientemente con el fin de evaluar el efecto de sitio en la alcaldía y actualizar la información. Huerta-Espinoza (2019) realizó la microzonificación de esta alcaldía y a continuación se muestra un resumen de su trabajo. Figura 5.18 parte izquierda, triángulos de colores verde, amarillo y rojo).

En el trabajo de Huerta-Espinoza (2019), se muestra la evaluación del efecto de sitio de la alcaldía Coyoacán a través de la distribución espacial de periodos dominantes y las amplitudes relativas. Para ello se realizó una campaña de registros de microtemores empleando el método H/V.



**Figura 5.18.** Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Coyoacán.

Con los resultados de las mediciones del cociente espectral H/V, se pudo concluir que la zona de lomas, es decir, el derrame basáltico del Xitle, no está libre de efectos de sitio. Se encontró que algunos lugares de esta área presentan periodos mayores a 1.4 s, contrario a las mediciones del SASID en donde se establece que, para esta zona, los periodos deben ser menores a 0.5 s. En esta zona de lomas se observaron amplificaciones de hasta 2 veces que de acuerdo al manual [SESAME \(2004\)](#), un área considerada libre de efecto de sitio debe tener amplificaciones menores a 2 veces. Este trabajo concluyó que estas amplificaciones se deben a contrastes de impedancias en capas profundas. También se concluyó que, la mayoría de los daños ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 2017, se concentró en zonas con amplitudes mayores a 5 veces y cuyo periodo fundamental va de los 0.7 a 1.2 s (Figura 5.19, parte derecha).

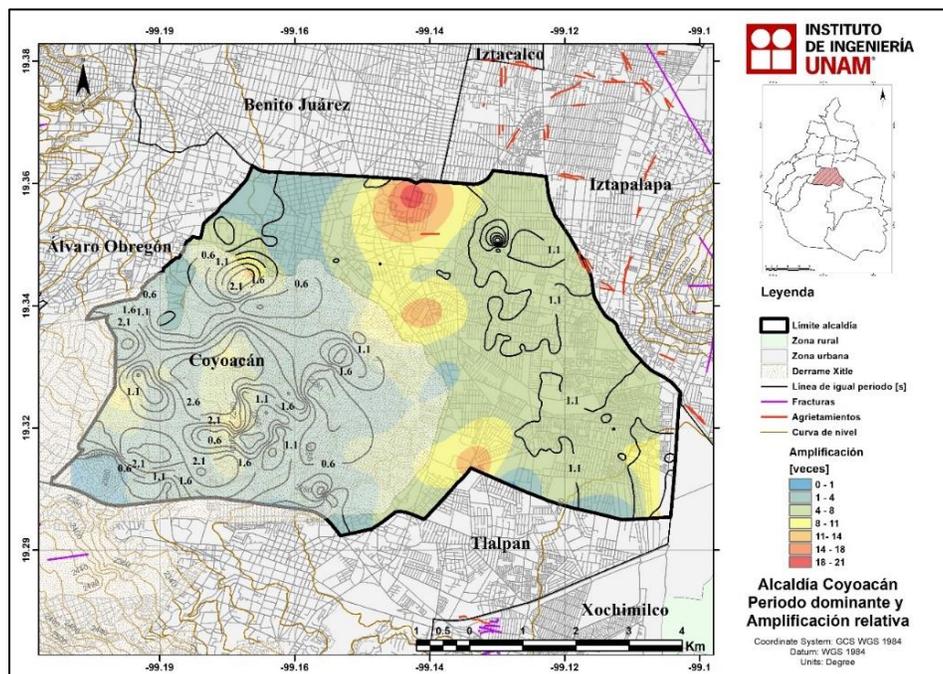


**Figura 5.19.** Izquierda) Comparación de los periodos fundamentales mostrados por SASID contra los registrados. Derecha) Correlación de daños del sismo 19 de septiembre de 2017 con el mapa de amplitud relativa. (Tomada de [Huerta- Espinoza, 2019](#)).

En este estudio, la microzonificación se realizó tomando en cuenta el trabajo de [Huerta-Espinoza \(2019\)](#), además se considera el derrame basáltico del Xitle para verificar que, aunque generalmente se considera Zona de Lomas, muestra efecto de sitio. El periodo dominante varía en la alcaldía de poniente a oriente, cambiando valores de 0.5 hasta 1.2 s cerca del Cerro de la Estrella. En la parte del derrame basáltico del Xitle, el periodo varía de 0.5 s y llega a valores de hasta 2.6 en el centro del derrame. Se verifica entonces que en el derrame el periodo dominante varía de forma significativa y que no se debe considerar sin efecto de sitio (Figura 5.20). La amplificación relativa es menor en la parte poniente de la alcaldía y llega a valores de 14 a 21 veces en el rango de periodos de 0.5 a 1.0 s, disminuyendo nuevamente hacia el Cerro de la Estrella. Sobre el derrame basáltico, hay zonas de gran amplificación en donde el periodo es grande.

Si ahora observamos la Figura 5.21, vemos que en la parte del derrame basáltico del Xitle el espesor de suelos blandos superficiales probablemente es menor a 1 metro; sin embargo, su periodo dominante del suelo, presenta una variación de 0.6 hasta 2.6 segundos. Esto solo se puede responder con un estrato de suelo blando por debajo del derrame, cuya respuesta en cuanto a su amplificación relativa se menor a los 4 veces. En las demás partes de la alcaldía, el espesor varía de poniente a oriente, con valores de 10 m en el límite con la alcaldía Álvaro Obregón, hasta llegar a los 50 m en la parte sureste, en el límite con Xochimilco.

La alcaldía se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.22). El derrame basáltico del Xitle se considera como Zona I debido a que, aunque presenta periodos dominantes y amplificaciones altas, no hubo daños por el sismo del 19 de septiembre de 2017 y tampoco existen grietas. En la Zona II se consideraron las áreas cercanas al derrame, a la Sierra de las Cruces y al Cerro de la estrella debido a que tampoco se presentaron daños posteriores al sismo. Por último, la Zona III se definió como el área de mayores daños producidos por el sismo de 2017, hacia el norte y el sur de la alcaldía. Sobre el mapa de microzonificación se muestran los sismos locales que se han presentado debajo de la alcaldía, los que también se tienen que considerar, ya que pueden producir aceleraciones grandes que pueden afectar gravemente a las construcciones.



**Figura 5.20.** Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Coyoacán.

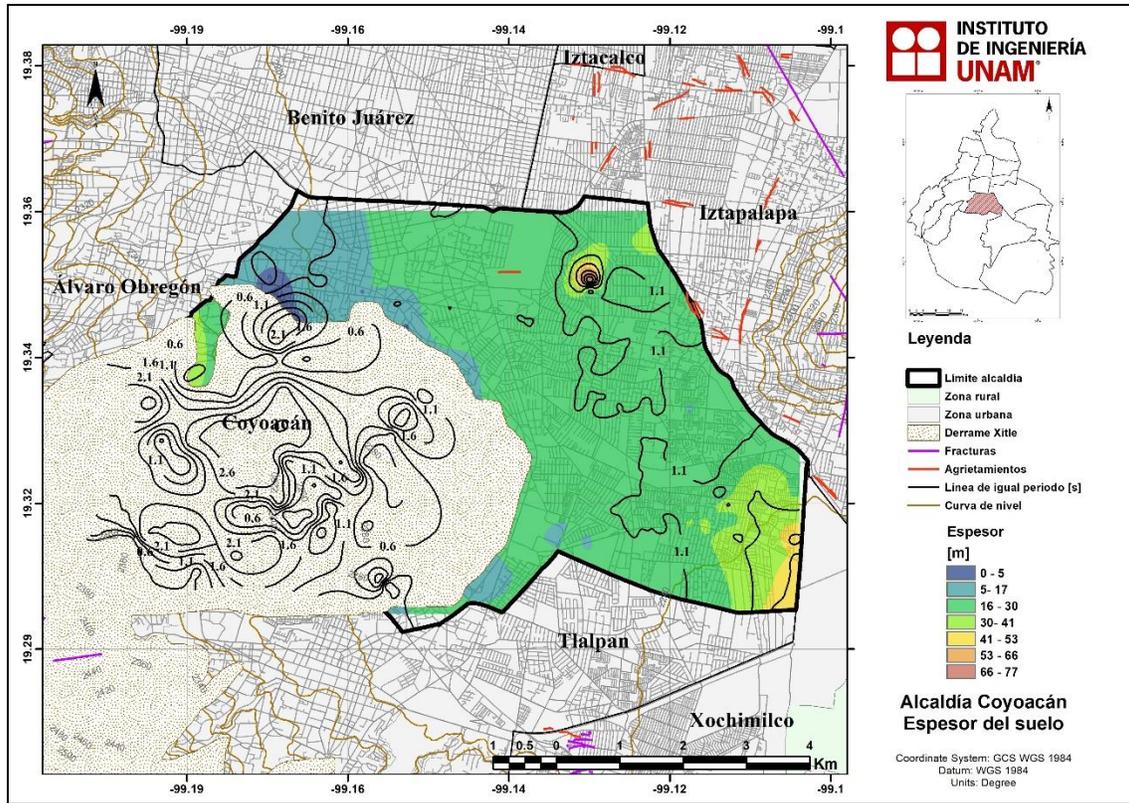


Figura 5.21. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Coyoacán.

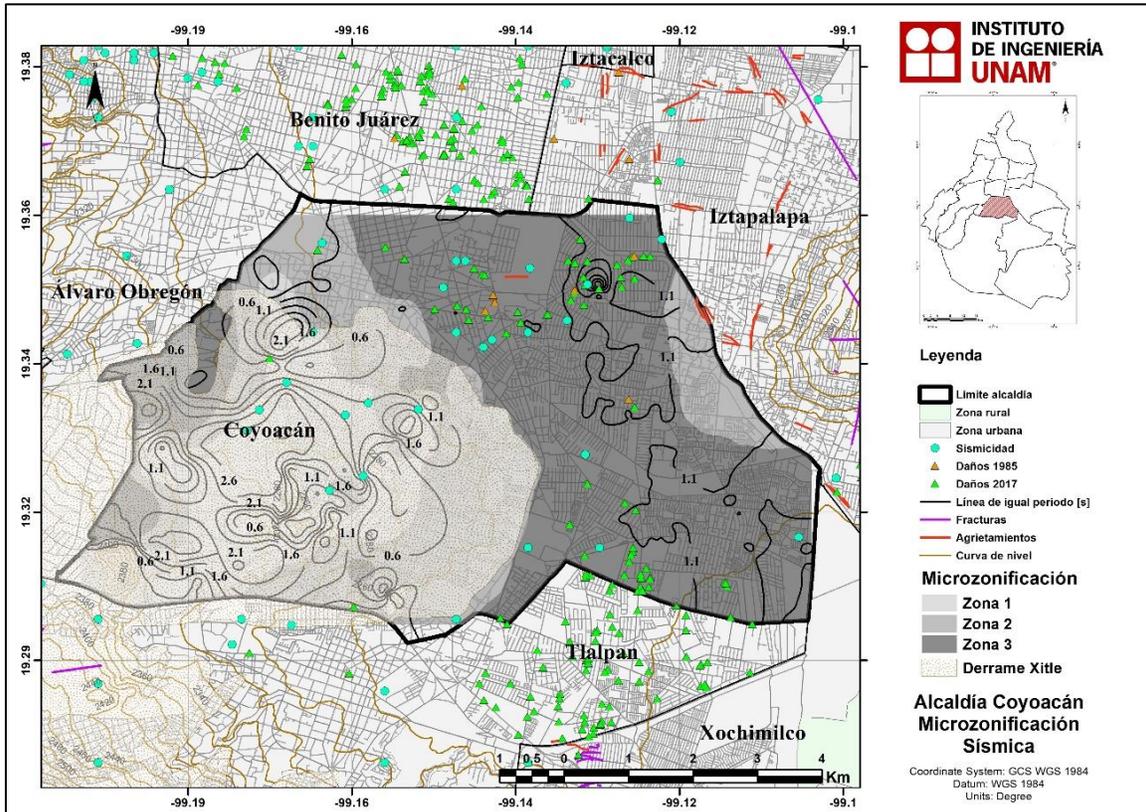


Figura 5.22. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Coyoacán.

## 5.5 Cuajimalpa de Morelos

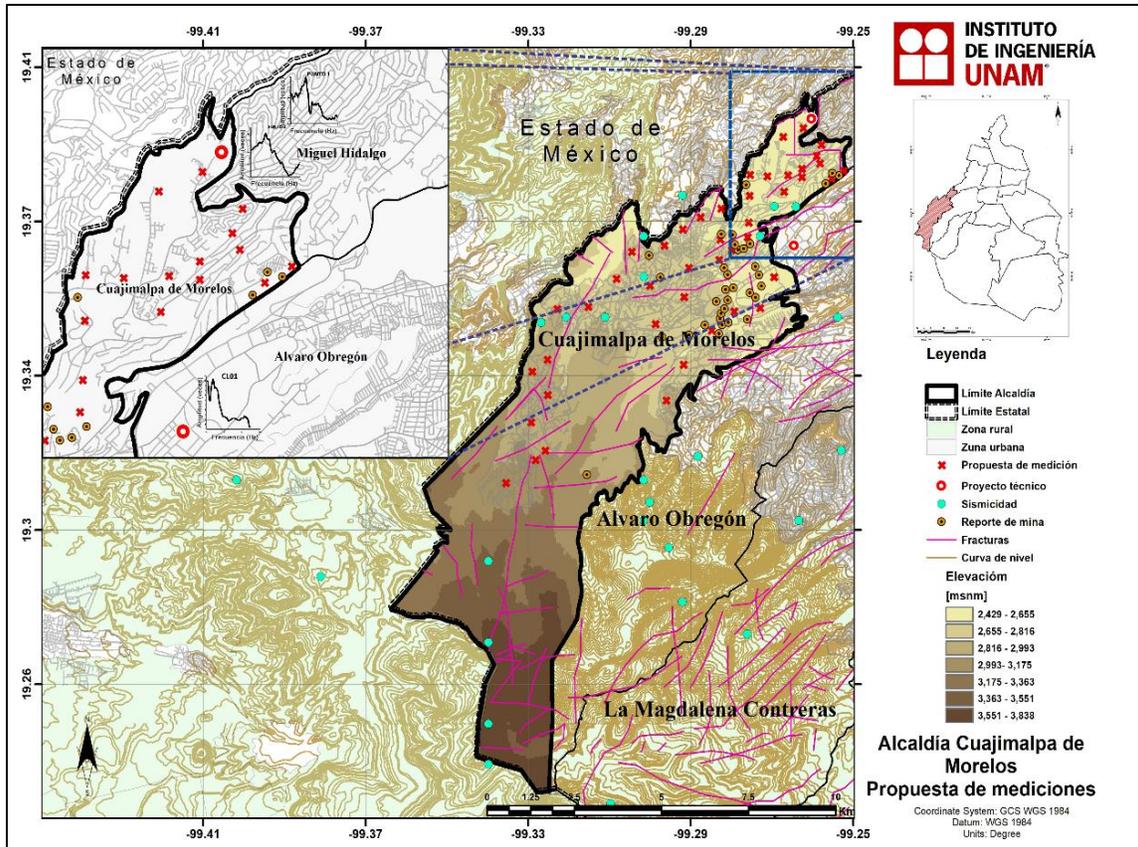
La alcaldía Cuajimalpa de Morelos tiene una superficie de 8,095.6 ha, lo que equivale al 5.5 % de la superficie de la Ciudad de México. Limita al norte con el municipio de Huixquilucan, Estado de México y la alcaldía Miguel Hidalgo, al este con las alcaldías Miguel Hidalgo y Álvaro Obregón, al sur con la alcaldía Álvaro Obregón y los municipios de Jalatlaco y Ocoyoacac del Estado de México, y al oeste con los municipios de Ocoyoacac, Lerma y Huixquilucan, del Estado de México (SPC, 2014c). De acuerdo a las NTC-DS (2017), la alcaldía se ubica en las Zona de Lomas (zonificación geotécnica) y en la Zona I (zonificación sísmica).

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Cuajimalpa de Morelos (SPC, 2014c) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: deslaves y derrumbes, fallas regionales, barrancas y taludes, y deslizamientos. En este trabajo no se presenta un mapa de peligro o riesgo sísmico, debido a que se enfoca directamente a los riesgos geológicos antes mencionados.

En esta alcaldía se han realizado tres mediciones de ruido sísmico (Figura 5.23, círculos rojos) para demostrar que, aunque está considerada como Zona de Lomas, existe un efecto de sitio en el rango de interés de la ingeniería sísmica que se tiene que considerar y, por lo tanto, se puede obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V.

En la Figura 5.23 se muestran las mediciones de ruido sísmico que se han realizado en la alcaldía y en las cercanías de esta, junto con los cocientes espectrales. Las dos mediciones realizadas en el límite noreste de la alcaldía se realizaron en un predio con el objetivo de determinar el periodo dominante del suelo, así como determinar el espectro de respuesta. Se determinó que el periodo dominante osciló entre los 2.0 y 2.5 s, con amplificaciones de hasta 4 veces. En Santa Fe, en los límites entre las alcaldías Cuajimalpa y Álvaro Obregón, también se realizó una medición de ruido sísmico con el objetivo de determinar el periodo dominante del suelo. En este sitio se registró un periodo dominante de 4.0 s con amplificación relativa de 10 veces. Además, en el mapa también se muestran los sismos locales que se han presentado en la alcaldía y en los alrededores, sismos que deben ser considerados para un análisis más profundo debido a las grandes aceleraciones que pueden generar (Singh *et al.*, 2020).

De acuerdo a los resultados anteriores, es muy probable que en la alcaldía Cuajimalpa exista un efecto de sitio que debe ser evaluado, sobre todo en lugares con sedimentos, en rellenos artificiales o en las zonas de barrancas. Además, en la zona se han construido y se planean construir edificaciones de gran altura en las que se debe considerar de forma adecuado el efecto de sitio. Por tal motivo, se proponen en la alcaldía algunas mediciones de ruido sísmico para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.23). Estas mediciones se ubican en el área urbana de la demarcación y alineadas a los riesgos geológicos en la demarcación como son los deslaves y derrumbes, fallas regionales, barrancas y taludes, y deslizamientos que muestra el Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Cuajimalpa (SPC, 2014c), así como en el área construida y de gran desarrollo; llegando en este primer análisis una cantidad de 50 sitios donde se requiere una estimación de su efecto de sitio (cruces de color rojo).



**Figura 5.23.** Mediciones realizadas en proyectos técnicos (círculo rojo) y propuestas para la alcaldía Cuajimalpa (cruces de color rojo).

## 5.6 Cuauhtémoc

La alcaldía Cuauhtémoc se localiza en la parte central de la Ciudad de México. Colinda al norte con las alcaldías Azcapotzalco y Gustavo A. Madero; al este con la alcaldía Venustiano Carranza; al sur con las alcaldías Iztacalco y Benito Juárez; y al oeste, con la alcaldía Miguel Hidalgo. Ocupa el 2.2 % de la superficie de la Ciudad de México. La alcaldía se ubica prácticamente en la Zona de Lago, de acuerdo a la zonificación geotécnica, y en las Zonas IIIa, IIIb y IIIc, de acuerdo a la zonificación sísmica, de las [NTC-DS \(2017\)](#), con una pequeña Zona de Transición o Zona II al suroeste de la demarcación. En esta alcaldía no se cuenta con información del Atlas de Peligros y Riesgos.

Para realizar la microzonificación sísmica de la alcaldía Benito Juárez se tomaron en cuenta las 143 mediciones de ruido sísmico que se han realizado, con el objetivo de obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V, además de calcular el espesor del suelo (Figura 5.24, círculos pequeños de color rojo oscuro). En algunos sitios se han realizado reportes técnicos específicos como en la calzada Manuel Villalongín No. 139, Av. Insurgentes No. 149 y en Av. Reforma No. 80 (Figura 5.24, círculos de color rojo), en los cuáles el objetivo fue determinar el periodo dominante del suelo y estimar los espectros de respuesta para temblores característicos.

El periodo dominante en la alcaldía Cuauhtémoc varía de 1.0 s hasta los 2.5 s (Figura 5.25). En la parte poniente el periodo es de 1.0 s y crece progresivamente hacia la parte oriente, en donde el periodo es mayor a los 2.0 s, llegando incluso a los 2.5 s al sureste de la alcaldía.

La amplificación relativa varía desde 2 hasta las 15 veces (Figura 5.25). La mayor parte de la demarcación presenta amplificaciones altas, desde las 8 hasta las 15 veces, siendo la zona sur la de mayor amplificación. Hay una zona de baja amplificación al centro de la alcaldía, que cruza de poniente a oriente.

El espesor del suelo varía desde los 20 m, en la zona de menor periodo dominante, y llega a ser mayor a los 50 m, en la zona periodos altos que se ubica al sureste de la alcaldía (Figura 5.26).

La microzonificación sísmica de la alcaldía se dividió en tres zonas (Figura 5.27). En la Zona I, ubicada al noroeste, el periodo dominante es menor a 1.2 s, el espesor menor a los 20 m y es en donde no se registraron daños por los sismos de 1985 y 2017, y tampoco se registraron grietas. En la Zona II el rango de periodos es de aproximadamente 1.2 a 1.5 s, el de espesores entre 20 y 30 m, y es en donde se registraron la mayoría de los daños del sismo de 2017, aunque en general se dispersan por toda la alcaldía. Por último, en la Zona III los periodos son mayores a 1.5 s, el espesor es mayor a 30m y es en donde se ubican la mayoría de los daños del sismo de 1985.

Finalmente, merece resalta en esta alcaldía el comportamiento de la amplificación relativa. Aproximadamente en su parte central de la alcaldía su valor disminuye y divide en dos áreas a esta alcaldía, donde también las curvas de igual periodo dominante sufren también un cambio (ver Figura 5.25, parte central). Si ahora observamos la distribución de daños del terremoto del 2017 (Figura 5.27, triángulos verdes) vemos que justamente en esta área o franja su distribución disminuye. Si ahora observamos la Figura 4.4, esta franja con valores de amplificación relativa bajas, puede llegar hasta el Peñón de los Baños, la cual puede reflejar una estructura enterrada, por lo que nos motiva continuar con el registro de ruido sísmico y otras técnicas geofísicas para corroborar esta anomalía.

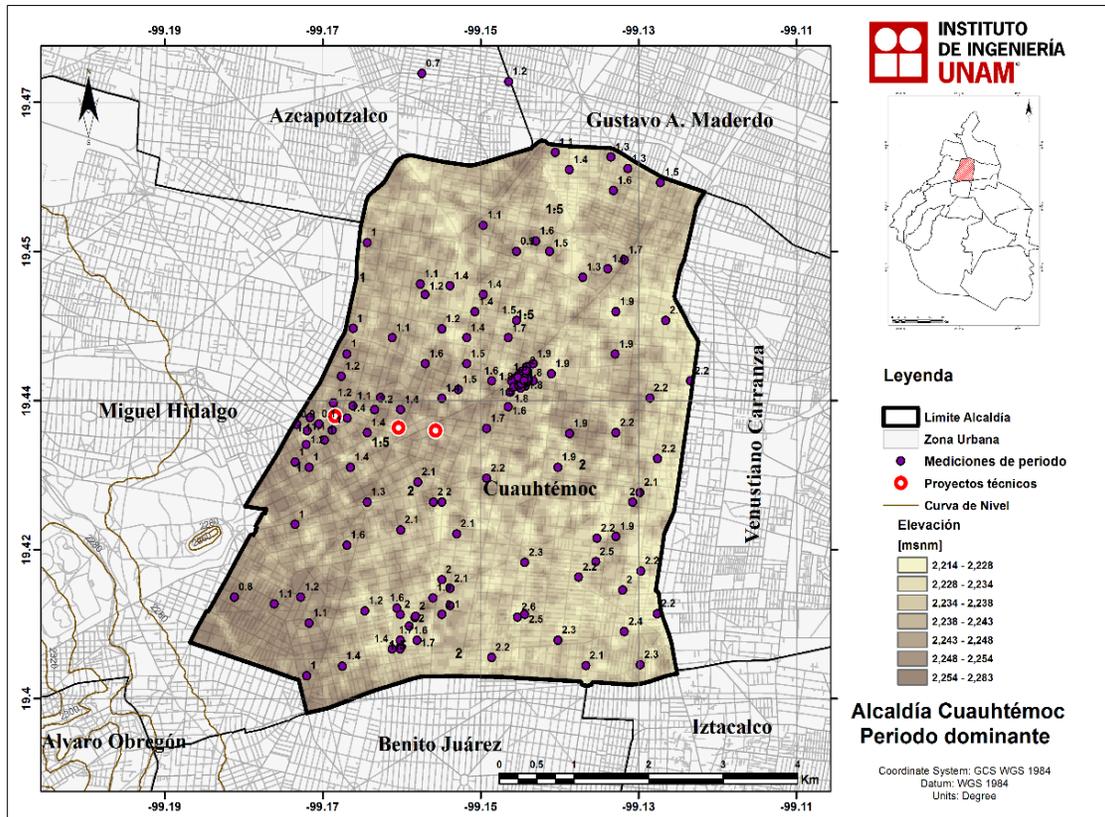


Figura 5.24. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Cuauhtémoc.

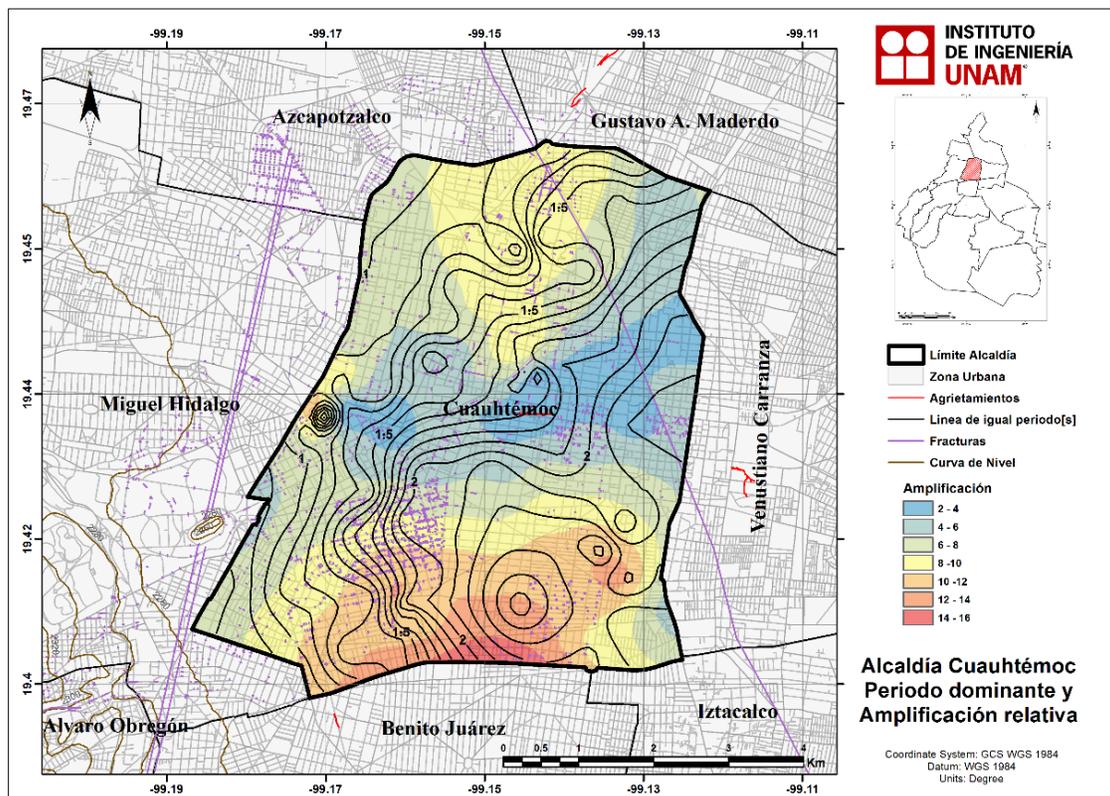


Figura 5.25. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Cuauhtémoc.

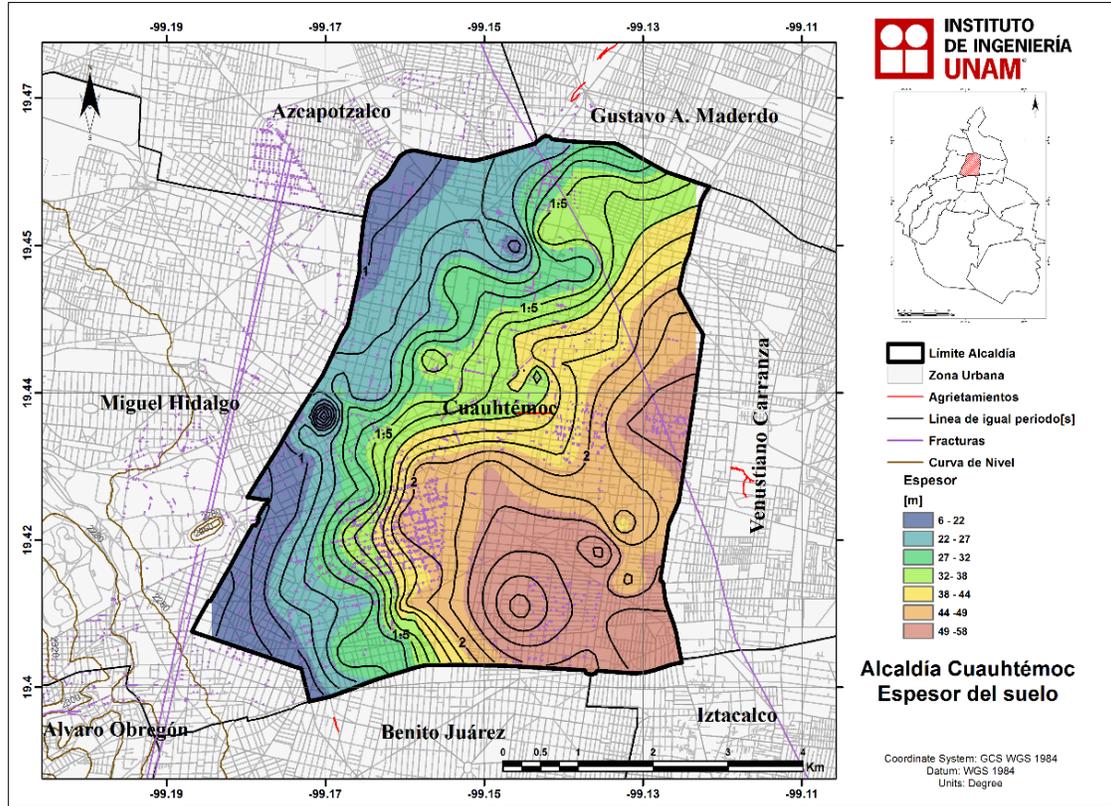


Figura 5.26. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Cuauhtémoc.

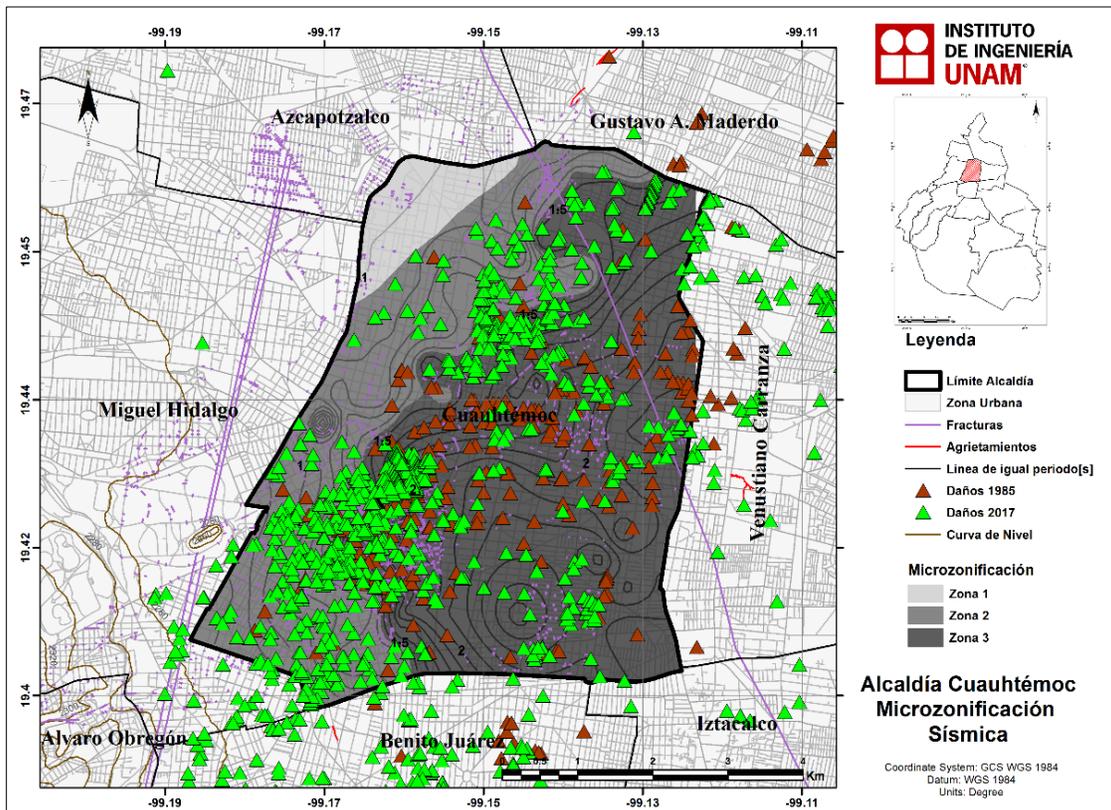


Figura 5.27. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Cuauhtémoc.

## 5.7 Gustavo A. Madero

La alcaldía Gustavo A. Madero se localiza en el extremo noreste de la Ciudad de México. Al norte y al este colinda con los municipios, Tultitlán, Coacalco de Berriozábal y Ecatepec de Morelos; al sur colinda con las alcaldías Cuauhtémoc y Venustiano Carranza, y al oeste con la alcaldía Azcapotzalco y el municipio Tlalnepantla de Baz. La alcaldía tiene una superficie de 8,708.56 ha, que representa el 5.9% del área total de la Ciudad de México; dicha superficie se divide en 7,470.56 ha de suelo urbano y 1,238 ha en suelo de conservación, es decir, el 85.78% y 14.22%, respectivamente (SPC, 2014d). De acuerdo a la NTC-DS (2017) en esta demarcación se encuentran todas las zonas de la zonificación geotécnica (Zonas de Lomas, Transición y Lago) y todas las zonas de la zonificación sísmica (Zonas I, II, IIIa, IIIb, IIIc y IIId).

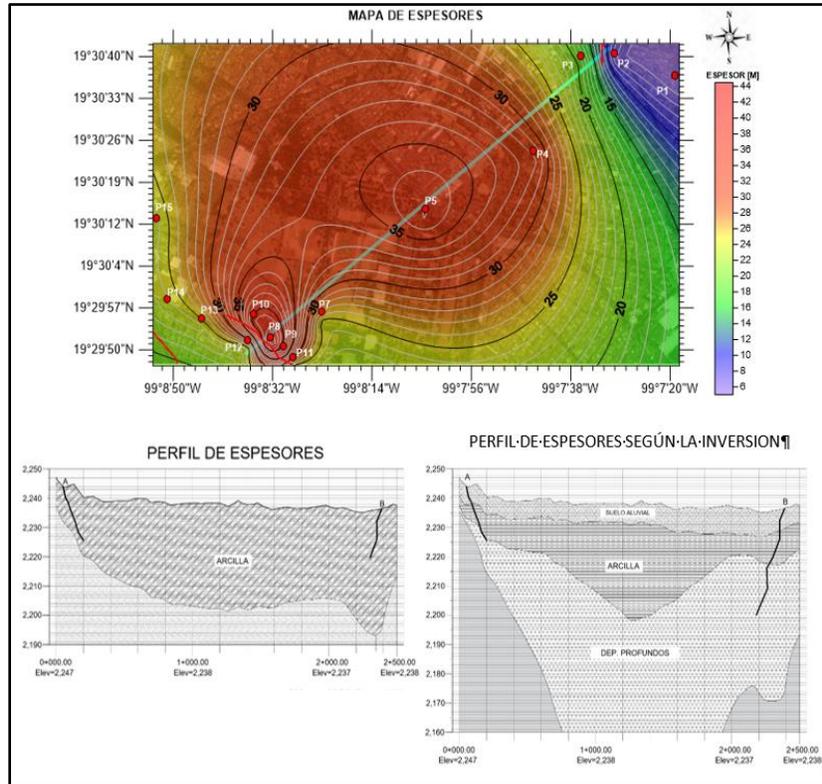
El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Gustavo A. Madero (SPC, 2014d) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: peligro sísmico, fallas y fracturas, peligro volcánico, procesos de ladera y hundimientos. El peligro sísmico se determina en este trabajo por medio de la zonificación geotécnica. Se considera que el 40% de la alcaldía se encuentra en condición de peligro sísmico alto debido a que este porcentaje se ubica en Zona de Lago. En cuanto a las fallas y fracturas, la mayoría se encuentran en los límites entre la Sierra de Guadalupe y la Zona de Lago. En total se reconocen 12 estructuras con dirección SW-NE. También se consideran los agrietamientos en suelo que afectan al 25% de la zona plana de la alcaldía.

En la alcaldía Gustavo A. Madero se realizaron 88 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.29, puntos circulares de color morado). Estas mediciones se realizaron con el fin de determinar la transición entre la Sierra de Guadalupe y la Zona de Lago. En la Unidad Profesional “Adolfo López Mateos” del IPN, al poniente del Cerro Zacatenco se realizó un proyecto específico para evaluar el periodo dominante de suelo y su relación con las grietas que afecta esta Unidad académica, además de observar la relación con las construcciones dañadas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 (Crespo-González, 2020).

La Figura 5.28, muestra la elaboración de un mapa de espesores utilizando la relación  $H=T*V_s/4$ , donde H es el espesor en metros, T es el periodo en segundos y  $V_s$  es la velocidad de cortante en  $m/s^2$  y un promedio de  $V_s=100 m/s^2$ , obtenido de un estudio de down-hole cercano a la zona en estudio, donde se estableció una profundidad de 40 metros al estrato resistente en la parte central de la cuenca. También se desarrolló un perfil estratigráfico, el cual se realizó a partir del mapa de espesores con fórmula; mientras que el segundo perfil mostrado, se obtuvo de la inversión de las curvas espectrales H/V. La principal diferencia que se puede notar en la Figura , es que este perfil muestra un detalle mayor en la estratigrafía, y en sus parámetros sísmicos, pero ambos comparten una misma depresión de arcilla haciéndose mayor en la parte central.

Por otro lado, el mapa de periodo obtenido para este estudio muestra valores que van de los 0.0 s hasta los 4.0 s (Figura ). En la parte norte de la alcaldía, en donde se ubican los cerros pertenecientes a la Sierra de Guadalupe, el periodo dominante es de 0.0 s y llega hasta los 0.5 s. En la parte suroeste, se define una estructura semicircular que sigue la tendencia del Cerro del Chiquigüite, Zacatenco, Guerrero, Los Gachupines y Tepeyac donde los periodos son mayores al centro, del orden de los 1.3 s, y hacia afuera disminuyen hasta los 0.9 s. En la zona sureste se registraron los periodos más altos llegando a los 4.0 s en la zona del antiguo lago de Texcoco. Mientras que la amplificación relativa varía en esta alcaldía desde 0 hasta 14 veces (Figura ). En la zona de la Sierra de Guadalupe la amplificación es de 0 veces y se incrementa hasta 4 veces en los límites de la zona de lacustre. Al

suroeste, en la estructura semicircular definida, la amplificación es de 7-10 veces en los límites y en el centro esta disminuye hasta las 2-4 veces. En la parte sureste la amplificación es más alta llegando hasta las 10-14 veces.



**Figura 5.28.** Mapa de espesor determinado a partir del periodo dominante y perfiles estratigráficos (Crespo-González, 2020).

El espesor del suelo varía de forma importante, desde los 0 m en los límites entre la Sierra de Guadalupe y la zona lacustre, hasta los 90 m aproximadamente, al sureste de la alcaldía (Figura 5.31). En la estructura semicircular definida por el periodo dominante, el espesor tiene valores de entre 9 y 23 m en los límites, aumentando hasta los 23-40 m en el centro. Los espesores más grandes se ubican al sureste de la demarcación llegando hasta los 90 m aproximadamente.

La microzonificación sísmica en esta alcaldía se dividió en tres zonas (Figura 5.32). La Zona I se ubica prácticamente en la zona de la Sierra de Guadalupe, en donde el periodo dominante es menor a los 0.5 s, la amplificación relativa es menor a las 2 veces y el espesor del suelo es menor a los 10 m. La Zona II abarca periodos que van de 0.5 a 1.3 s, amplificaciones de 2 hasta 6-7 veces y espesores de 10 hasta 23 m aproximadamente. En esta Zona se ubican las grietas que están en el límite de la Sierra de Guadalupe y la zona lacustre, en los límites de la estructura semicircular. Por último, en la Zona III el periodo es mayor a los 1.3 s, la amplificación es mayor a 6-7 veces y el espesor es mayor a los 20 m. Esta Zona abarca el área central de la estructura semicircular (que puede ser una caldera enterrada) y la zona sureste de la alcaldía. También se pueden apreciar en la microzonificación sísmica los sismos locales que se han producido en la alcaldía y los alrededores, los cuales tienen que ser evaluados correctamente.

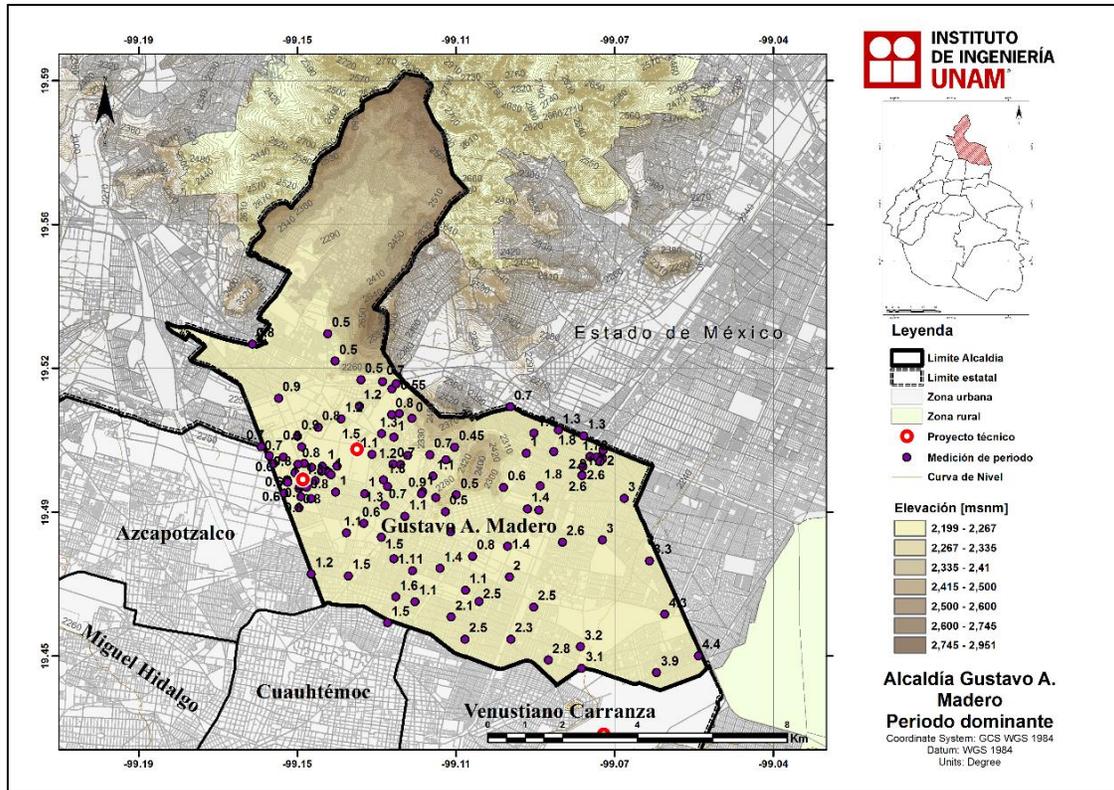


Figura 5.29. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Gustavo A. Madero.

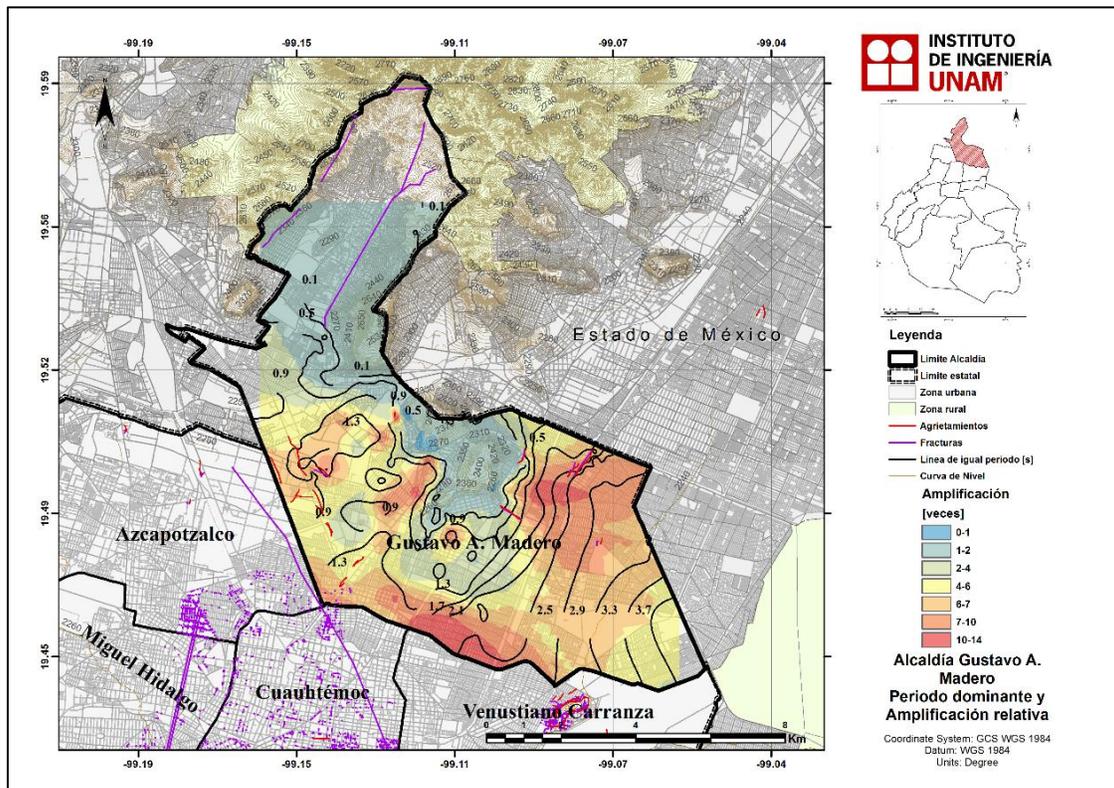


Figura 5.30. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Gustavo A. Madero.

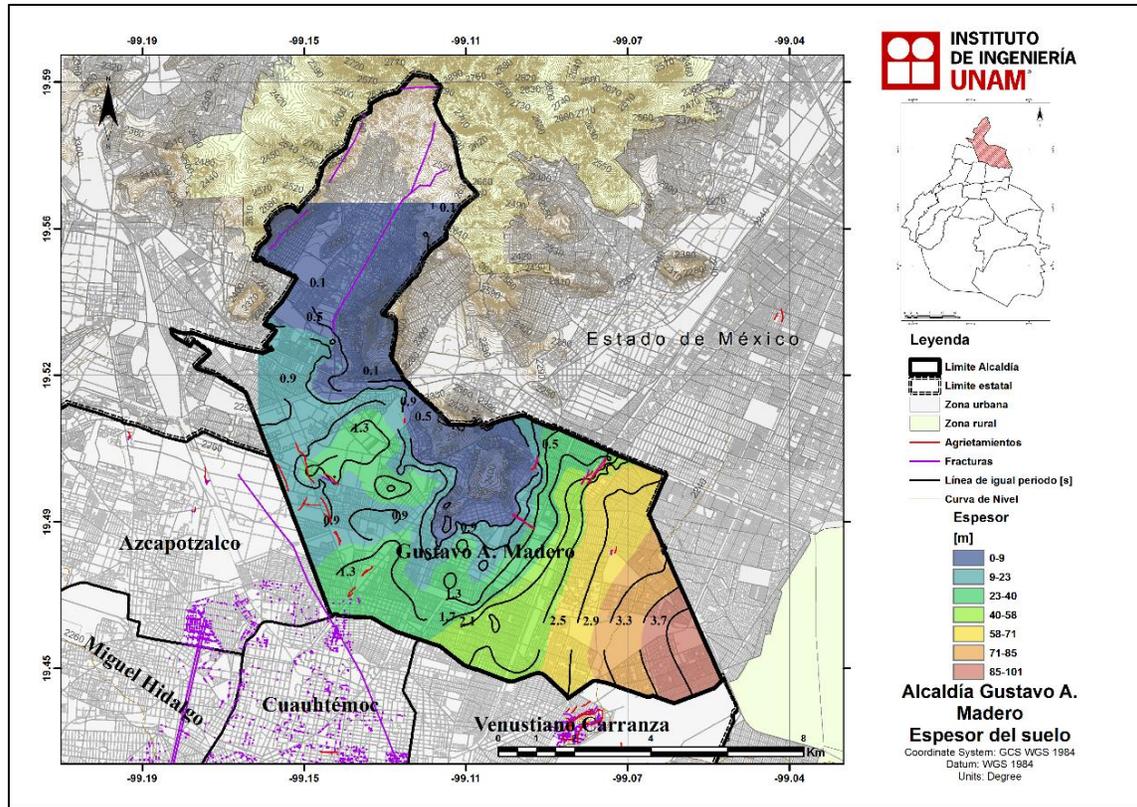


Figura 5.31. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Gustavo A. Madero.

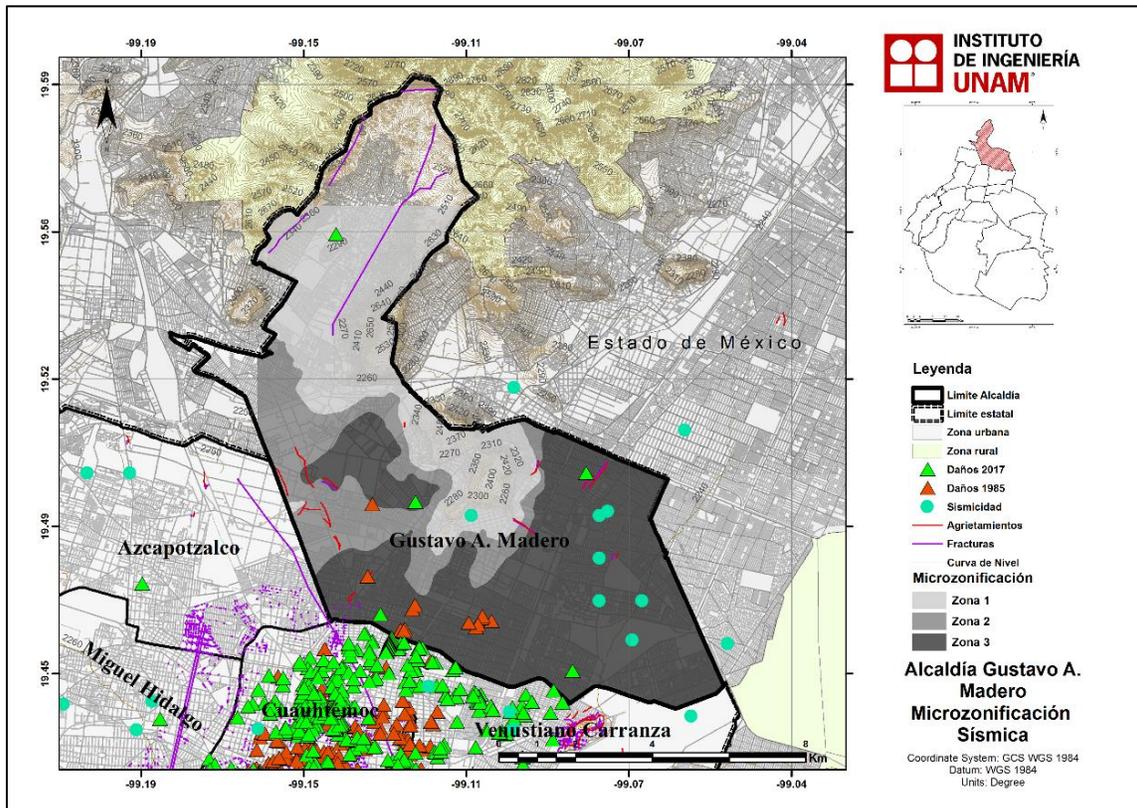


Figura 5.32. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Gustavo A. Madero.

## 5.8 Iztacalco

La alcaldía Iztacalco colinda al norte con la alcaldía Venustiano Carranza; al este con el municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México; al sureste con la alcaldía Iztapalapa; y al oeste con las alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc (SEDATU, 2016). De acuerdo con la zonificación geotécnica, esta demarcación se ubica completamente en Zona de Lago, mientras que, de acuerdo con la zonificación sísmica, se ubica en las Zonas IIIb, IIIc y III d.

El Atlas de Riesgos de la alcaldía Iztacalco (SEDATU, 2016) indica que esta alcaldía, así como la Ciudad de México, se encuentra ubicada en la zona B, de acuerdo con la regionalización sísmica de México. La zona B es considerada una zona intermedia en la que los sismos no ocurren tan frecuentemente como en la zona D, que es la zona de mayor sismicidad en México, tanto por su frecuencia de ocurrencia como por las magnitudes que alcanza. La zona B es una zona afectada por altas aceleraciones, pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. No obstante, lo anterior, debido a las condiciones del subsuelo de la Cuenca de México, puede esperarse altas aceleraciones y ha sido afectada por sismos de muchos tipos y diversas intensidades. Además, de acuerdo con la distribución de intensidades (MM, Mercalli Modificado) de la República Mexicana realizada con base en sismos ocurridos de 1845 a 1985, la alcaldía ha sido afectada, en forma general, con intensidades máximas del orden de VII (MM).

Las intensidades esperadas en la alcaldía en función de la aceleración máxima del terreno asociada a periodos de retorno, información que es fundamental para especialistas en el diseño de la construcción y modificación o refuerzo de obras civiles, son de 11, 81 y 135 Gal ( $\text{cm/s}^2$ ) para periodos de retorno de 10, 100 y 500 respectivamente. Por lo que se considera que, los sismos que son capaces de producir daños importantes en la alcaldía, es decir que pueden llegar a generar aceleraciones del terreno por encima de los 150 Gal, se presentan en periodos de retorno que rebasan los 500 años (SEDATU, 2016).

Para ayudar en la comprensión del fenómeno sísmico en la alcaldía Iztacalco, se han realizado 69 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.33, puntos circulares de color morado), con el fin de realizar la microzonificación sísmica. El periodo dominante en la alcaldía varía de 2.0 s hasta los 4.0 s (Figura 5.34). Al poniente de la demarcación el periodo es de 2.0 s y crece progresivamente hacia el oriente, alcanzando valores de hasta 4.0 s en la zona centro, para después disminuir hacia el sureste, en donde los valores llegan a los 3.2 s, en los límites con el Estado de México y la alcaldía Iztapalapa. Mientras que la amplificación relativa es menor en la parte centro y norte de la alcaldía, en donde los valores se ubican en el rango de 2 a 9 veces. Hacia el suroeste y al sureste, la amplificación es mayor y alcanza valores de entre 22 y 28 veces en los límites con el Estado de México y la alcaldía Iztapalapa (Figura 5.34).

El rango de espesores en la alcaldía es de los 34 m y llega incluso hasta los 100 m (Figura 5.35). El espesor, al poniente de la demarcación, es de 34 m y crece progresivamente hacia el oriente hasta alcanzar los valores máximos en la parte central. En los límites con el Estado de México y la alcaldía Iztapalapa, el espesor disminuye hasta los 60 m aproximadamente.

La alcaldía se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.36). En la Zona I el periodo es menor a los 2.2 s, la amplificación es baja y el espesor es menor a los 40 m. Esta zona se ubica en la parte suroeste de la alcaldía. La Zona II está caracterizada por periodos de hasta 2.6 s, amplificaciones medias y espesores de hasta 50 m, y se encuentra ubicada al sureste. Por último, la Zona III está caracterizada por periodos mayores a los 2.6 s, amplificaciones altas y espesores

mayores a los 50 m. La Zona III abarca la mayor parte de la alcaldía e incluye los pocos daños del sismo del 2017. En este mapa se pueden apreciar los sismos locales que se han presentado en la alcaldía y en los alrededores, los cuales se tienen que considerar con más detalle, debido a las altas aceleraciones que pueden ocasionar.

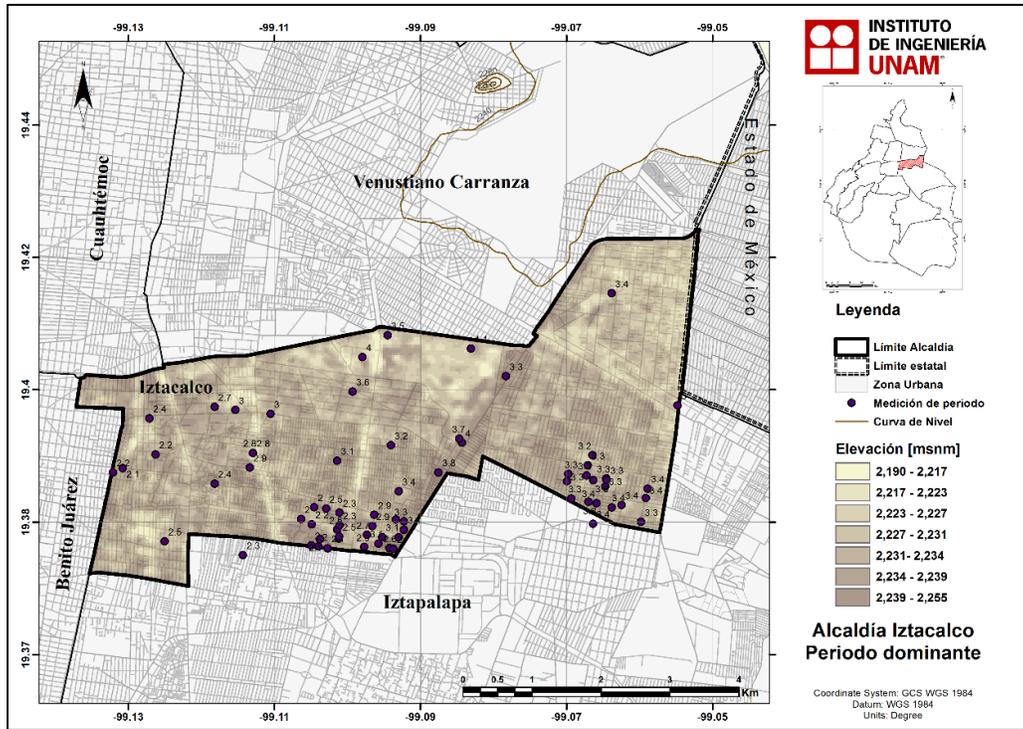


Figura 5.33. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Iztacalco.

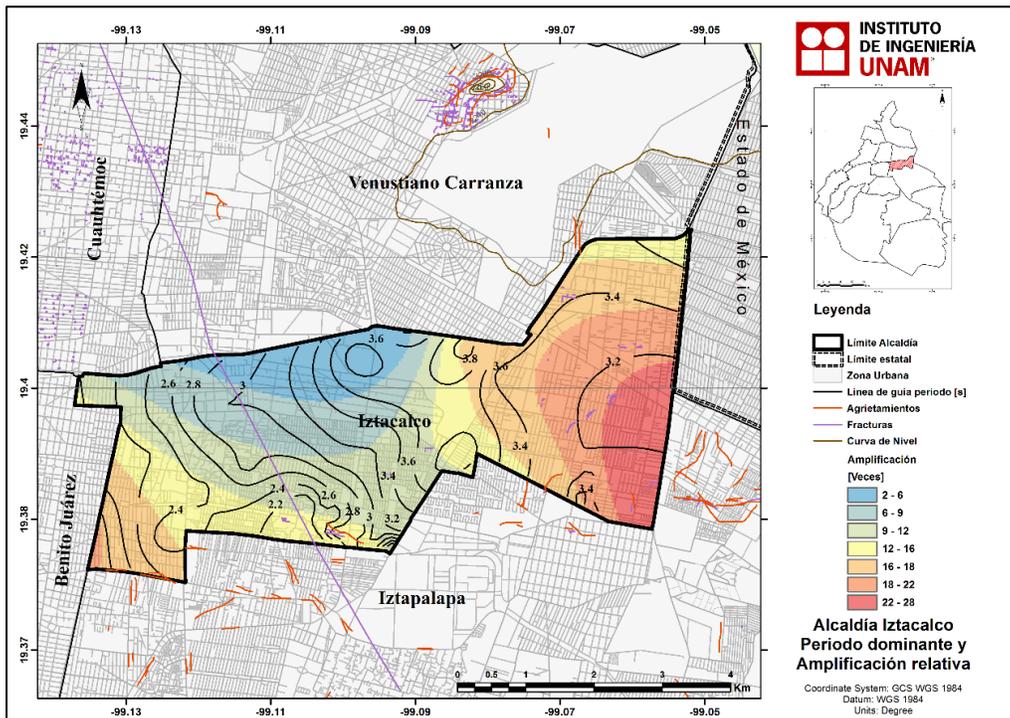


Figura 5.34. Mapa de periodo dominante y amplificación del suelo para la alcaldía Iztacalco.

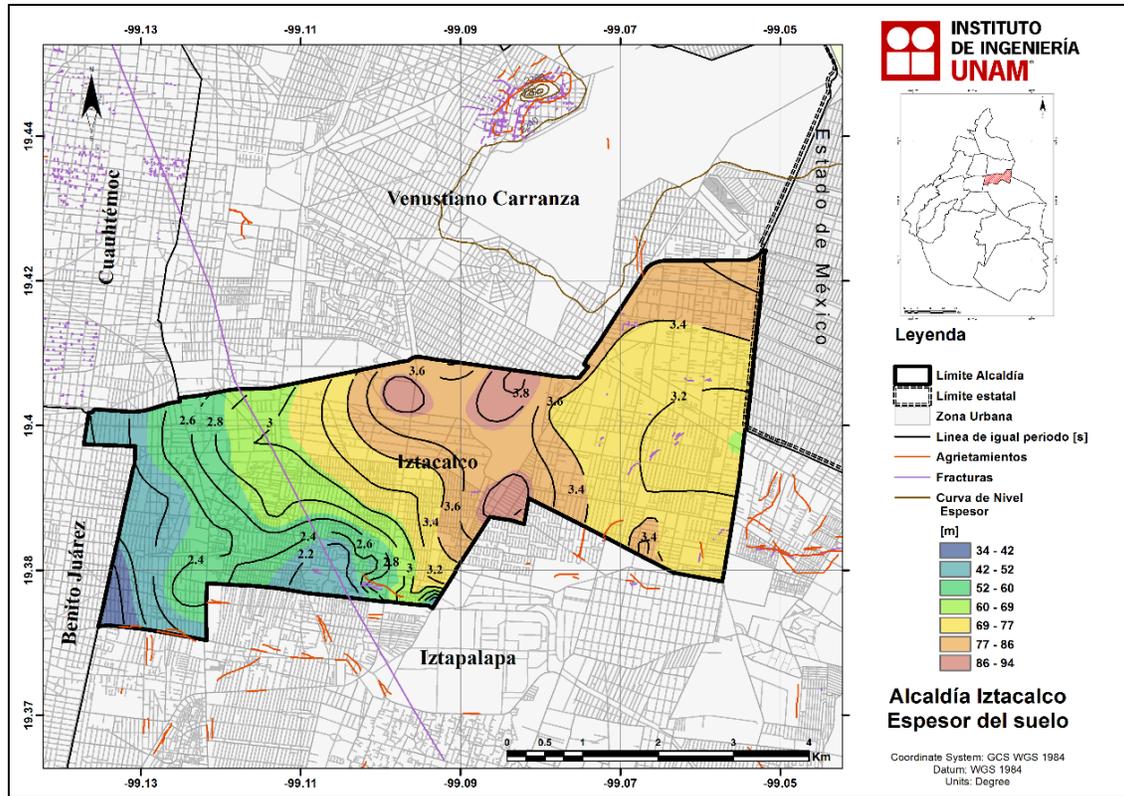


Figura 5.35. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Iztacalco.

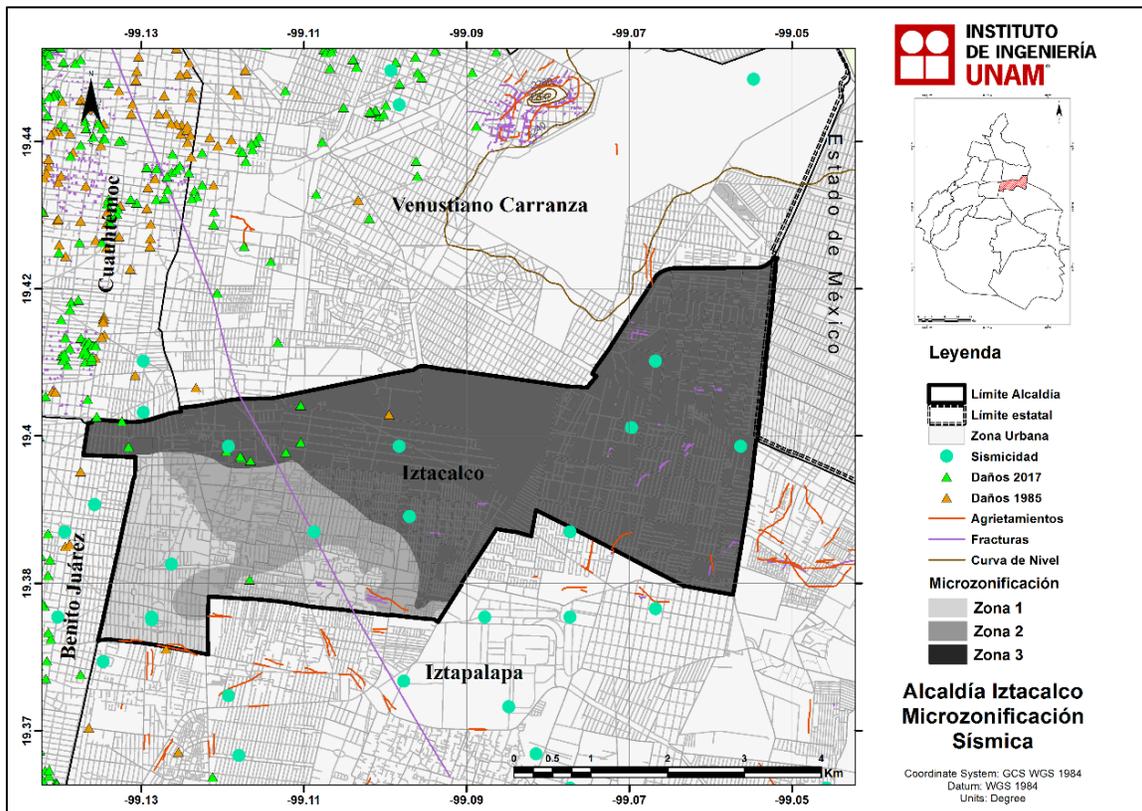


Figura 5.36. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Iztacalco.

## 5.9 Iztapalapa

La alcaldía Iztapalapa ocupa el 7.5 % del territorio de la Ciudad de México y su extensión territorial es de 11,667 ha. Colinda al norte con la alcaldía Iztacalco, al sur con las alcaldías Xochimilco y Tláhuac, al oriente con los municipios de Nezahualcóyotl y Los Reyes Acaquilpan, Estado de México, al poniente con la alcaldía Coyoacán y al norponiente con la alcaldía Benito Juárez (SPC, 2014e). De acuerdo a la NTC-DS (2017) en esta demarcación se encuentran todas las zonas de la zonificación geotécnica (Zonas de Lomas, Transición y Lago) y todas las zonas de la zonificación sísmica (Zonas I, II, IIIa, IIIb, IIIc y IIIId).

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Iztapalapa (SPC, 2014e) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: fallas y fracturas, agrietamientos y hundimientos del suelo, e inestabilidad de taludes y laderas. Los agrietamientos se presentan principalmente en los límites de la Sierra de Santa Catarina y el Peñón del Marques con la zona lacustre. El límite entre el Cerro de la Estrella y la zona de lago presenta menor cantidad de grietas.

En la alcaldía Iztapalapa se han realizado 619 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.39, puntos circulares de color morado). Es la alcaldía en dónde se han realizado mayor número de mediciones de ruido sísmico, principalmente para estudiar las zonas de grietas en la transición entre la Sierra de Santa Catarina y la zona lacustre del valle, además de estudiar también el Peñón del Marques. En esta alcaldía se han realizado estudios técnicos para evaluar el periodo dominante, como el que se muestra a continuación realizado en la UAM Iztapalapa (Figura 5.38, círculo de color rojo).

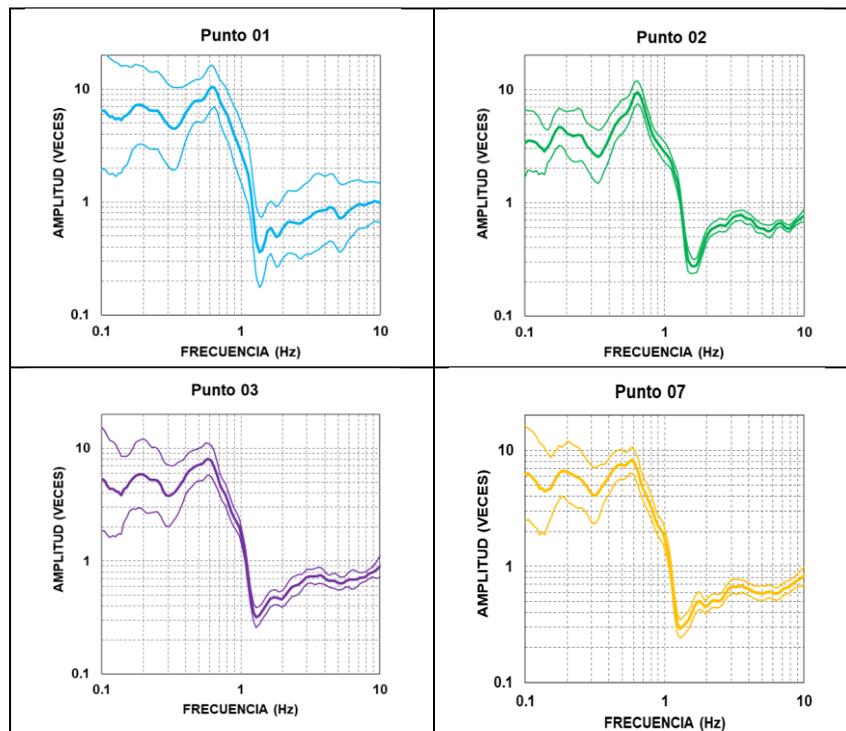
En el edificio S, ubicado dentro de Ciudad Universitaria de la UAM-Iztapalapa de la Ciudad De México, se consideró necesaria la evaluación de las frecuencias naturales de vibración del edificio y el sitio, así como la estimación de espectros de respuesta de sitio para temblores característicos. Con este objetivo se llevaron a cabo mediciones de ruido sísmico en el edificio y predio. Para el caso de las mediciones de ruido sísmico en el predio (P01, P02, P03 y P07) se tienen como resultado los siguientes cocientes espectrales. En cada grafica la línea continua oscura indica el promedio, mientras que las líneas discontinuas indican curvas medias más o menos una desviación estándar, cuyo máximo espectral muestra una variación en su frecuencia dominante de 0.40 a 0.8 Hz, con un máximo espectral hacia 0.62 Hz o 1.6 segundos y una amplificación relativa máxima promedio de 10 veces (Figura 5.38).

Para el caso de la alcaldía Iztapalapa, el periodo dominante varía en esta alcaldía de 0.0 s hasta los 3.5 s aproximadamente (Figura 5.40). El Cerro de la Estrella, la Sierra de Santa Catarina y el Peñón del Marques tienen valores de 0.0 s y crecen progresivamente hacia la zona de lago, de manera abrupta en el caso del Peñón y el volcán Yuhualixqui (al poniente de la Sierra de Santa Catarina). En los límites cercanos a la zona de cerros el periodo llega hasta los 1.5 s. El periodo es más alto en una pequeña área al sur, entre el Cerro de la Estrella y el volcán Yuhualixqui, al norte y al noreste de la demarcación, en donde alcanza los 3.5 s aproximadamente. Mientras que la amplificación relativa en las sierras y cerros de la alcaldía es de 0 veces debido a que se considera que no existe efecto de sitio. Las amplificaciones más grandes se presentan al poniente y al norte de la demarcación, en los límites con las alcaldías Benito Juárez e Iztacalco, y el Estado de México, en donde alcanzan valores de hasta 30 veces (Figura 5.40).

En el límite entre las sierras y cerros, y la zona lacustre el espesor del suelo es de 0 m y aumenta hasta llegar a los 90 m aproximadamente (Figura 5.41). La transición hasta llegar a los 50 m en el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina es gradual, mientras que la misma transición para el volcán

Yuhualixqui y el Peñón del Marques es abrupta. El espesor llega a los 70 m en el límite con la alcaldía Xochimilco y alcanza su mayor valor al norte, en el límite con el Estado de México, en donde el valor es de 90 m aproximadamente.

La alcaldía se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.42). En la Zona I se consideran los lugares en donde se considera no existe efecto de sitio, es decir, la Sierra de Santa Catarina, el volcán Yuhualixqui, el Cerro de la Estrella y el Peñón del Marques. La Zona II abarca periodos superiores a los 2.0 s, amplificaciones mayores a 10 veces y espesores superiores a los 50 m. Esta zona comprende la parte sur, en el límite con Xochimilco, y la parte norte, en el límite con Iztacalco y el Estado de México. Por último, la Zona III abarca periodos menores a los 2.0 s, amplificaciones moderadas y espesores menores a los 50 m. Las grietas que se presentan en la Sierra de Santa Catarina y el Peñón del Marques se aglomeran en la Zona III, así como los daños producidos por el sismo de 19 de septiembre de 2017  $M_w 7.1$ , ubicados al sureste del Peñón. Las grietas de la parte noroeste de la alcaldía se ubican en la Zona II, aunque estas pueden tener otro tipo de mecanismo de generación no considerado en este trabajo.



**Figura 5.38.** Cocientes espectrales para el estudio de la UAM Iztapalapa.

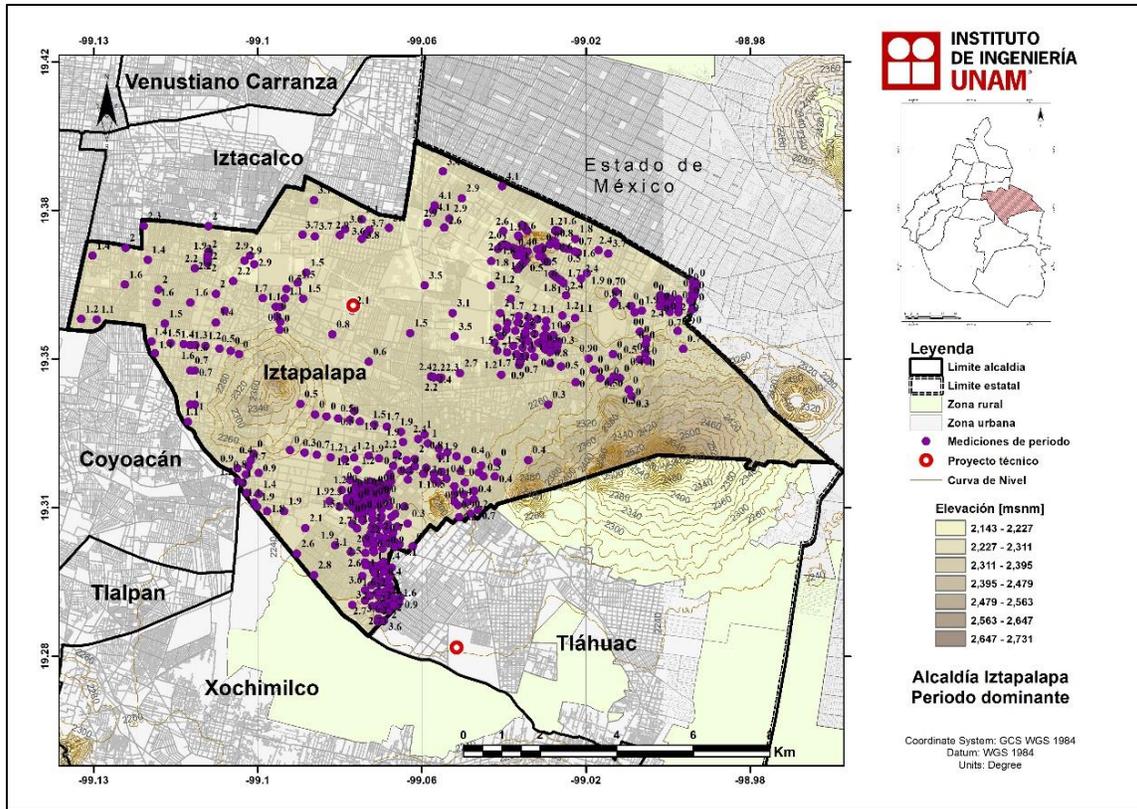


Figura 5.39 Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Iztapalapa.

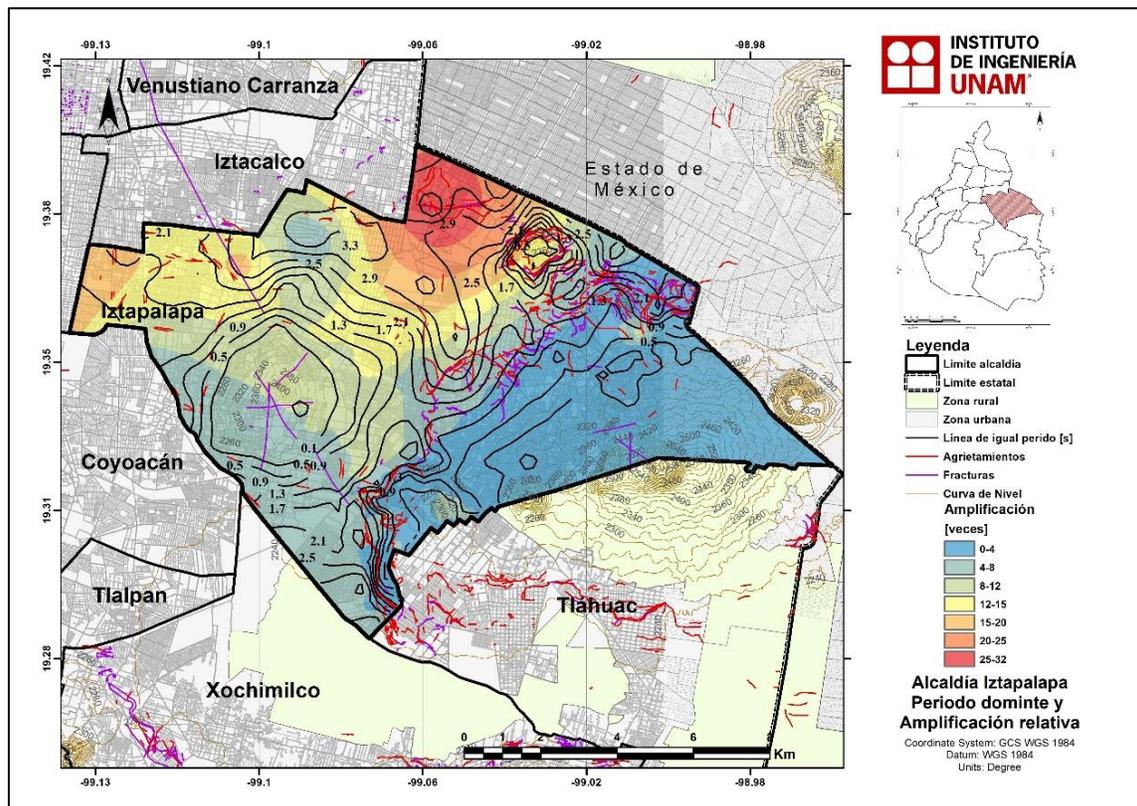


Figura 5.40. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Iztapalapa.

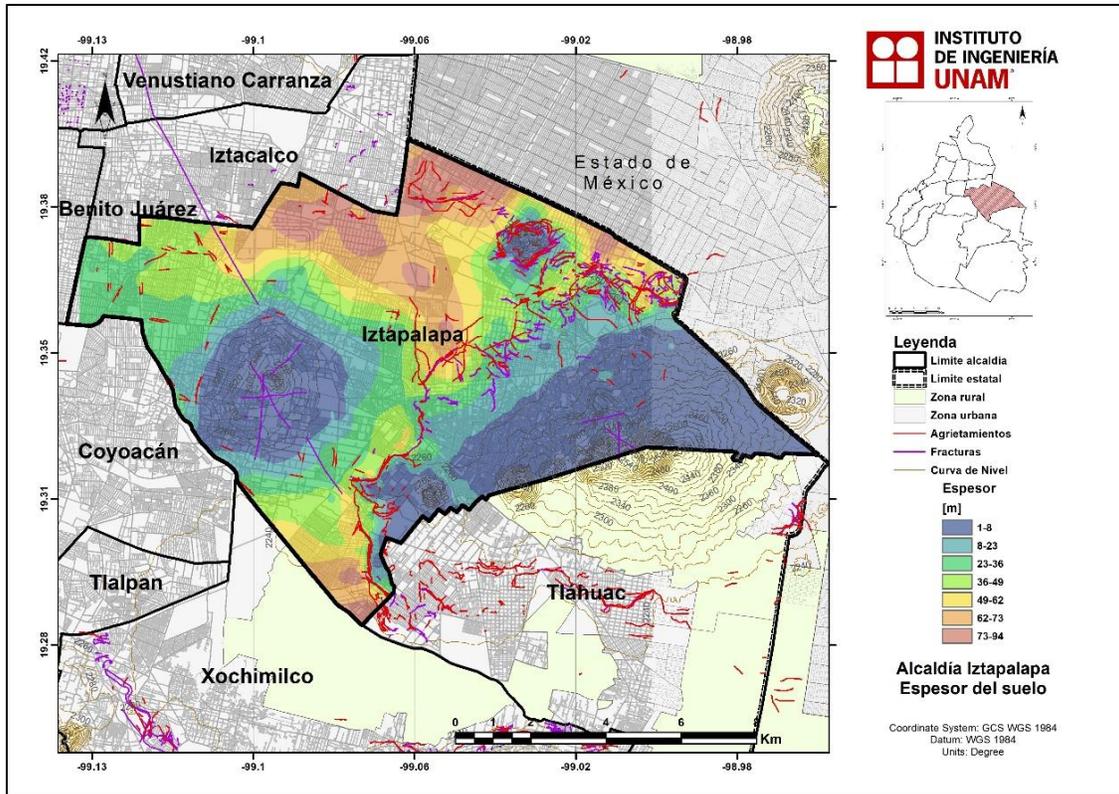


Figura 5.41. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Iztapalapa.

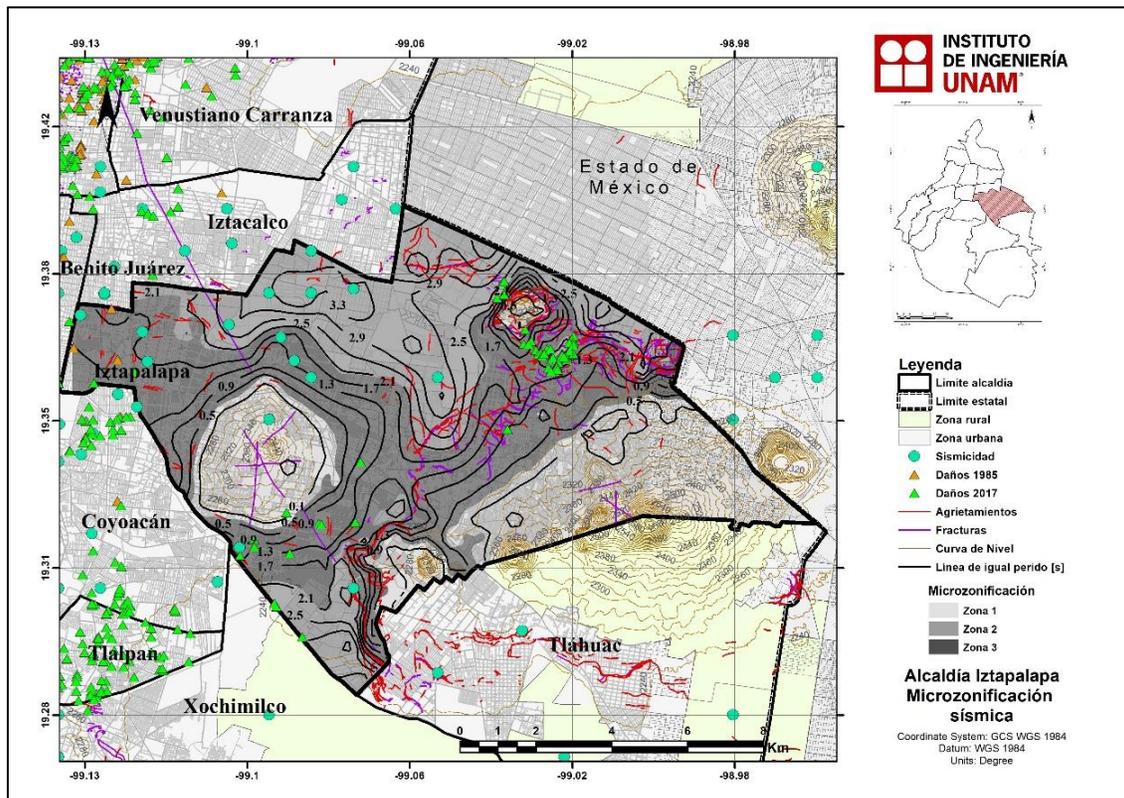


Figura 5.42. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Iztapalapa.

### 5.10 La Magdalena Contreras

La Magdalena Contreras está ubicada al suroeste de la Cuenca de México; presenta una superficie de 6,337 ha, lo que representa el 5.1 % de la superficie de la Ciudad de México. Esta demarcación colinda al norte con la alcaldía Álvaro Obregón; al este con las alcaldías Álvaro Obregón y Tlalpan; al sur con la Delegación Tlalpan y al oeste con el Estado de México y la alcaldía Álvaro Obregón (SPC, 2014f). En las NTC-DS (2017) esta alcaldía se ubica completamente en Zona de Lomas y Zona I, de acuerdo con la zonificación geotécnica y la zonificación sísmica, respectivamente.

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía La Magdalena Contreras (SPC, 2014f) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: inestabilidad de taludes y fallas geológicas, además de algunas fracturas que están presentes en la alcaldía, en mayor medida hacia la zona sur. También son relevantes las zonas de minas que se registran en la zona urbana.

Hasta ahora no se han realizado mediciones de ruido sísmico en esta alcaldía para evaluar si existe efecto de sitio y poder caracterizarlo con el cociente espectral H/V. Por lo tanto, se proponen mediciones en la zona urbana de la demarcación y en la zona de minas para determinar el periodo dominante y la amplificación relativa del sitio (Figura 5.43). Además, es necesario analizar la sismicidad localizada en la Sierra de Chichinautzin que puede afectar a las viviendas y estructuras de la alcaldía.

De acuerdo a los resultados anteriores, es muy probable que en la alcaldía La Magdalena Contreras exista un efecto de sitio que debe ser evaluado, sobre todo en lugares con sedimentos, en rellenos artificiales o en las zonas de barrancas. Además, en la zona se han construido y se planean construir edificaciones de gran altura en las que se debe considerar de forma adecuado el efecto de sitio. Por tal motivo, se proponen en la alcaldía algunas mediciones de ruido sísmico para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.43). Estas mediciones se ubican en el área urbana de la demarcación y alineadas a los riesgos geológicos en la demarcación que muestra el Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía La Magdalena Contreras (SPC, 2014f); llegando en este primer análisis una cantidad de 40 sitios donde se requiere una estimación de su efecto de sitio (cruces de color rojo).

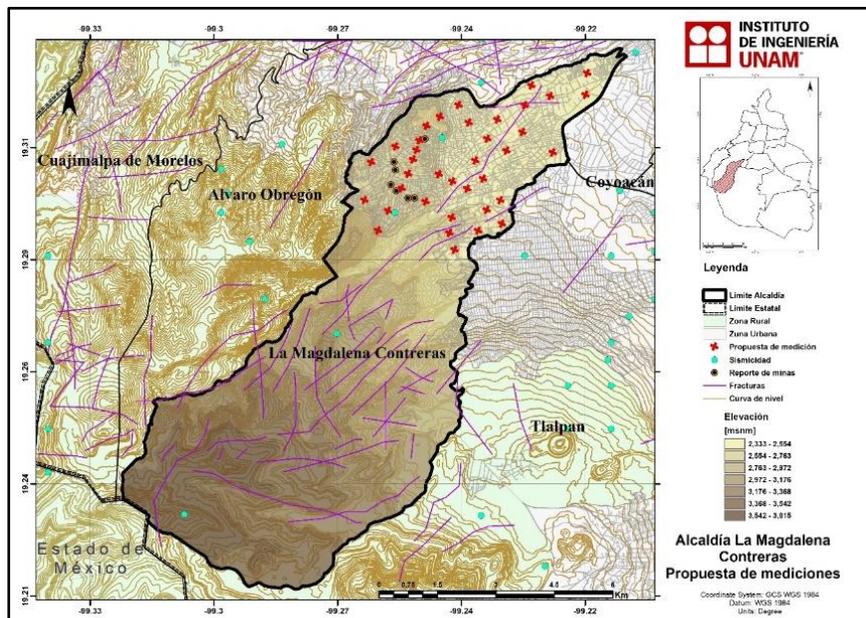


Figura 5.43. Mediciones propuestas para la alcaldía La Magdalena Contreras (cruces de color rojo).

### 5.11 Miguel Hidalgo

La alcaldía Miguel Hidalgo cuenta con una superficie de 46.8 km<sup>2</sup>, lo que representa el 3.1% de la superficie total de la Ciudad de México. Tiene colindancias al norte con el Estado de México y la alcaldía Azcapotzalco; al este con las alcaldías Azcapotzalco, Cuauhtémoc y Benito Juárez; al sur con las alcaldías Benito Juárez, Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos; al oeste con la alcaldía Cuajimalpa de Morelos y el Estado de México (SEDATU, 2018). En las NTC-DS (2017) esta alcaldía se ubica en las Zonas de Lomas y de Transición, con una pequeña parte de Zona de Lago al oriente. En la zonificación sísmica, las zonas que abarca son la I y la II, con una pequeña área al oriente de la demarcación de Zona III.

En el Atlas de Riesgos Naturales de la alcaldía Miguel Hidalgo (SEDATU, 2018) se considera la amenaza o el peligro sísmico mediante la regionalización sísmica de la república mexicana, los daños del sismo del 19 de septiembre de 2017, además de los enjambres de sismos locales ocurridos en 2017. La zonificación, en términos de intensidad o peligro, se realizó únicamente con base en la zonificación sísmica de la Ciudad de México: peligro bajo para la Zona I, peligro medio para La Zona III y peligro alto para la Zona III (Figura 5.44).

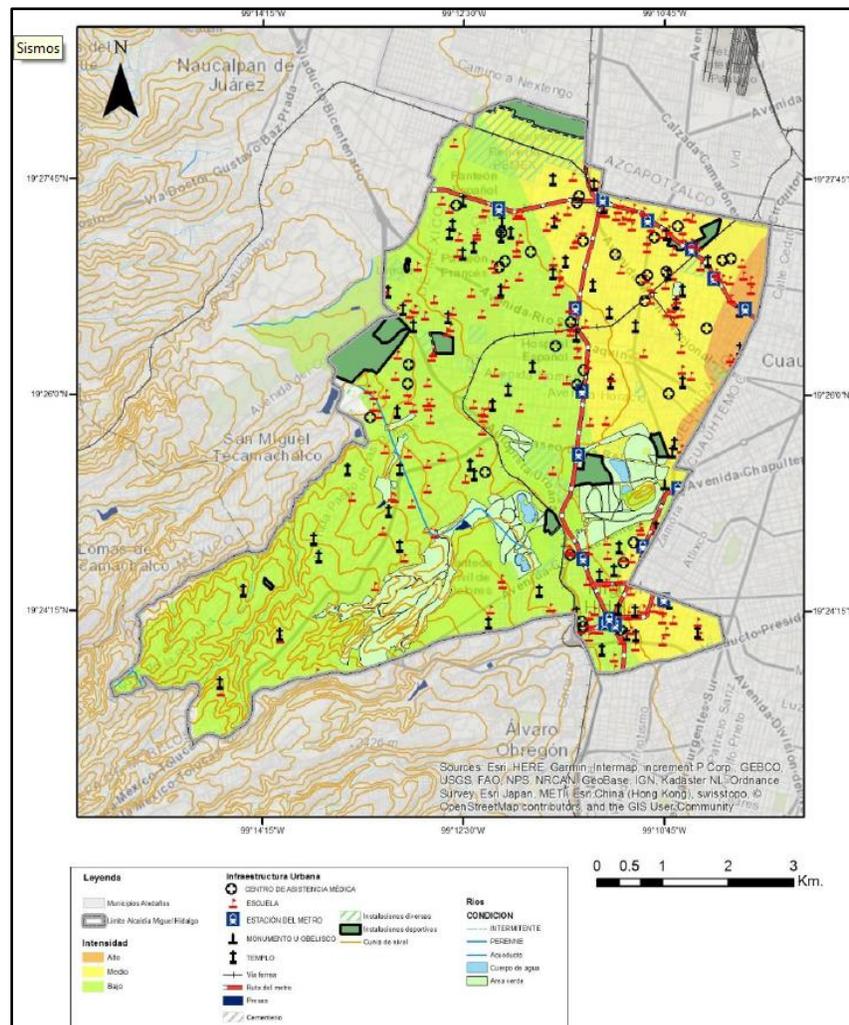


Figura 5.44. Intensidad sísmica dentro de la alcaldía Miguel Hidalgo (SEDATU, 2018).

En la alcaldía Miguel Hidalgo se han realizado 57 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.45). La mayor parte de las mediciones se realizaron en la zona lacustre de la alcaldía, debido a que se considera que en la parte de la Sierra de las Cruces no existe efecto de sitio, aunque es necesario estudiar la zona a detalle para corroborar tal aseveración.

El periodo dominante varía de 0.1 s hasta valores de 1.0 s (Figura 5.46). El periodo es de 0.1 s en el límite entre la Sierra de las Cruces y la zona lacustre, al poniente de la alcaldía, y crece progresivamente hacia el oriente hasta alcanzar valores de 1.0 s en el límite con la alcaldía Cuauhtémoc.

La amplificación relativa cambia en la alcaldía de valores de 2 veces y llega hasta 9-13 veces (Figura 5.46). La amplificación es baja en el límite entre la Sierra de las Cruces y el lago, y crece de manera gradual hacia el oriente de la alcaldía, en el límite con Cuauhtémoc, en donde alcanza los valores máximos de 9 a 13 veces. Al norte se aprecia una estructura, de baja amplificación, dirección SW-NE. En la Sierra de las Cruces la amplificación se considera nula.

El espesor del suelo varía en un rango de 0 hasta 30 m (Figura 5.47). Al poniente de la alcaldía, en el límite entre sierra y lago, el espesor es de 0 m, y crece progresivamente hacia el noreste hasta alcanzar los 30 m en el límite con la alcaldía Cuauhtémoc. Al sureste, se aprecia el Cerro de Chapultepec, cuyas curvas de espesor cambian rápidamente hacia la zona de lago. En la parte norte de la demarcación hay una estructura bien definida, en dirección SW-NE, cuyo espesor alcanza los 13 m.

La alcaldía se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.48). La Zona I se definió como el área que abarca la Sierra de las Cruces, hacia el suroeste de la demarcación, en la cual se considera no existe efecto de sitio ya que no se tiene información de la zona. En la Zona II el periodo dominante varía de 0.1 a 0.6 s, la amplificación es baja y moderada y el espesor llega hasta los 10 m. Esta zona define tres estructuras en dirección SW-NE, una de las cuales es el Cerro Chapultepec. Por último, la Zona III está definida por periodos superiores a los 0.6 s, amplificaciones altas y espesores mayores a los 10 m. Los daños ocasionados por el sismo del 19 de septiembre de 2017  $M_w 7.1$  se presentan al sureste de la alcaldía y se incluyen en la Zona III.

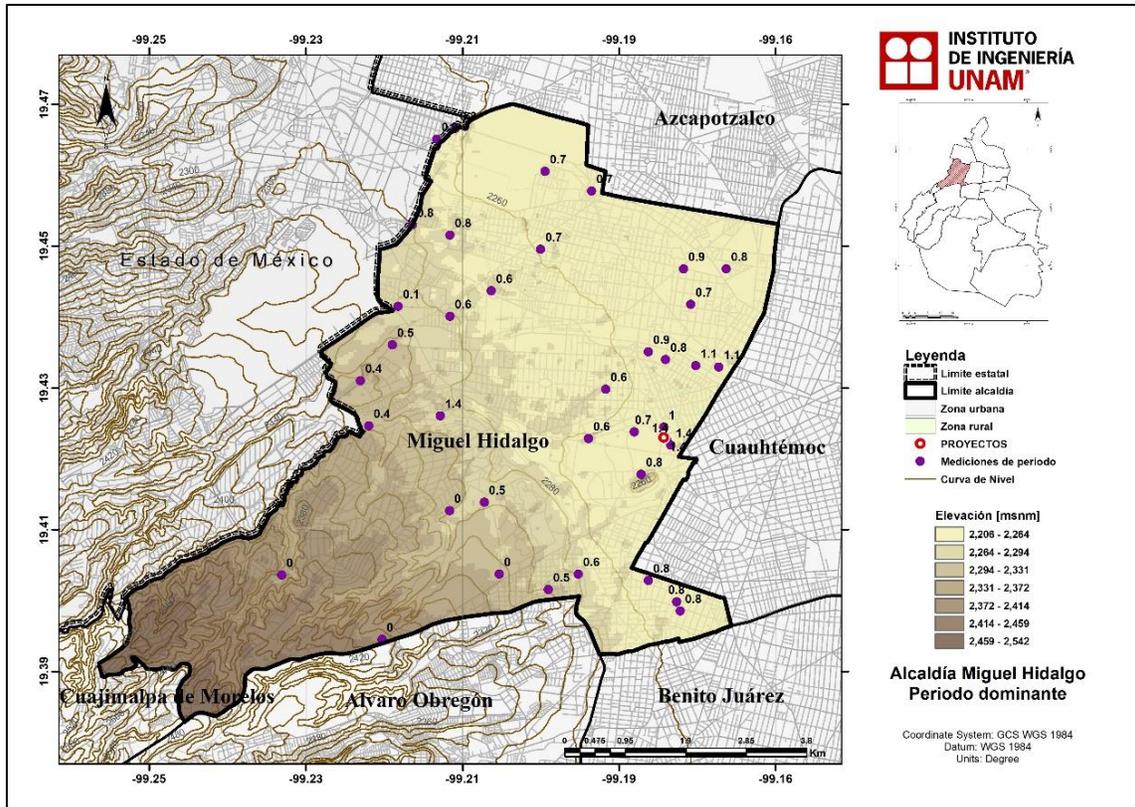


Figura 5.45. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Miguel Hidalgo.

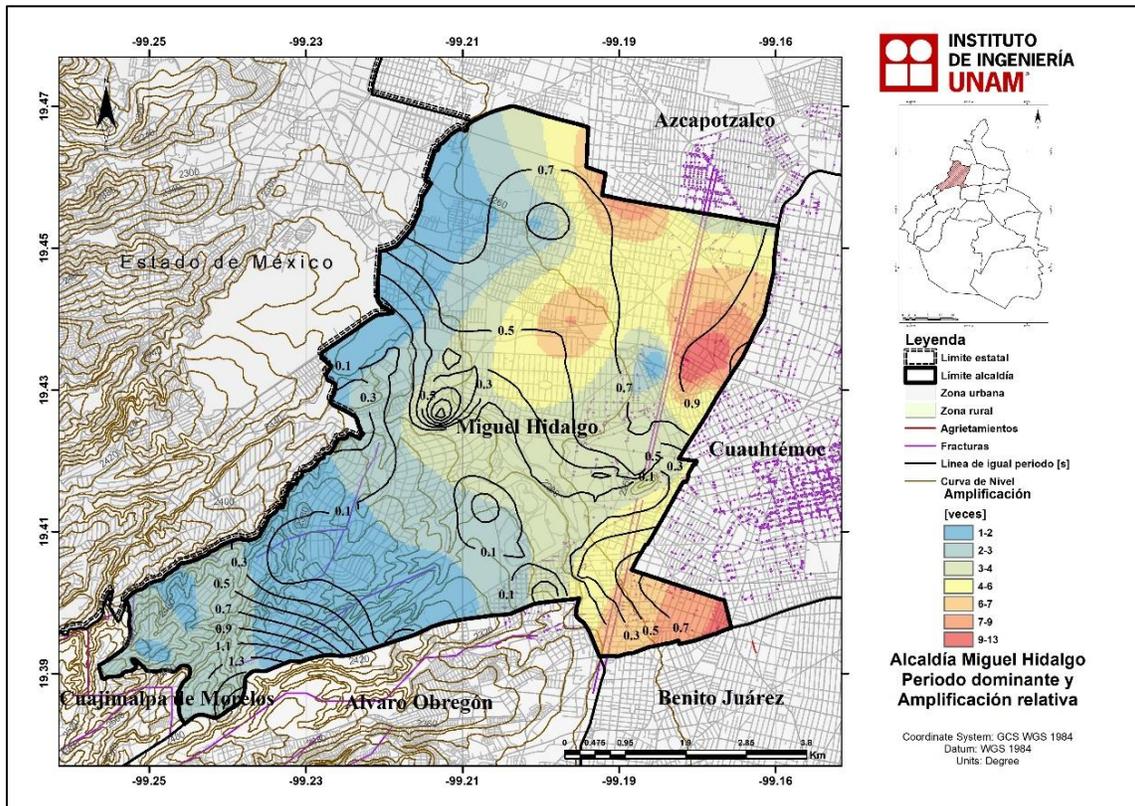


Figura 5.46. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía

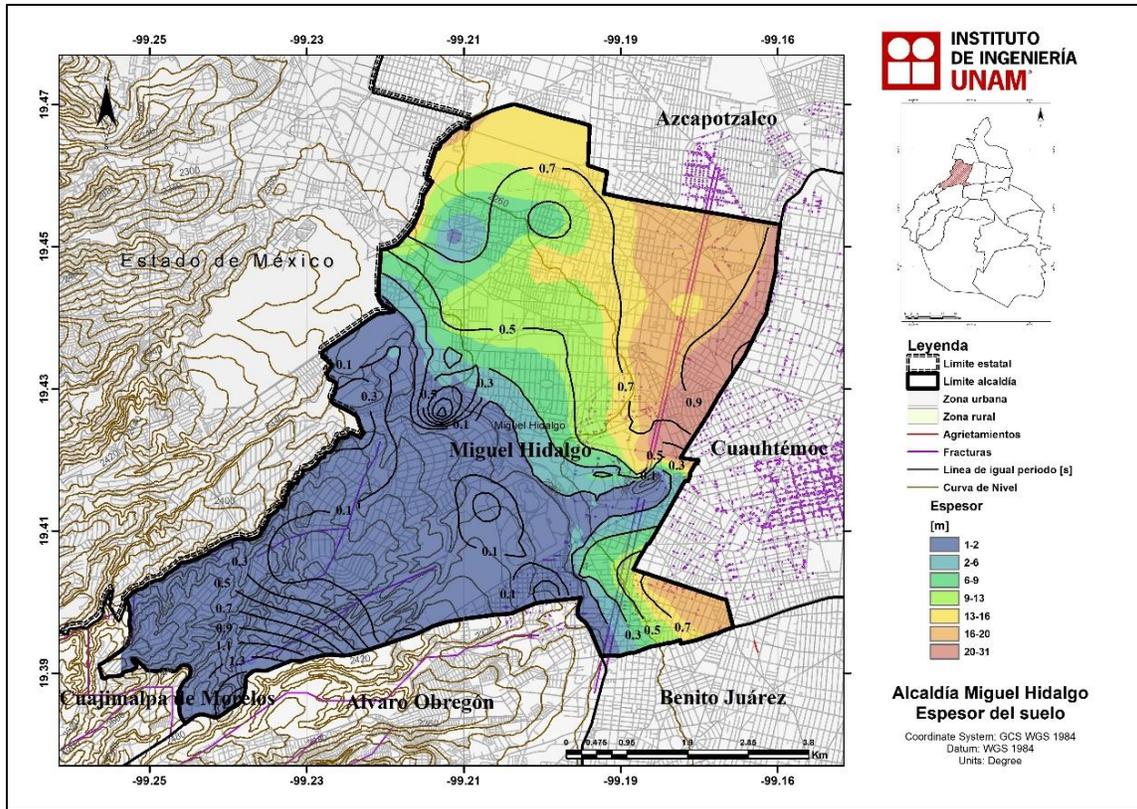


Figura 5.47. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Miguel Hidalgo.

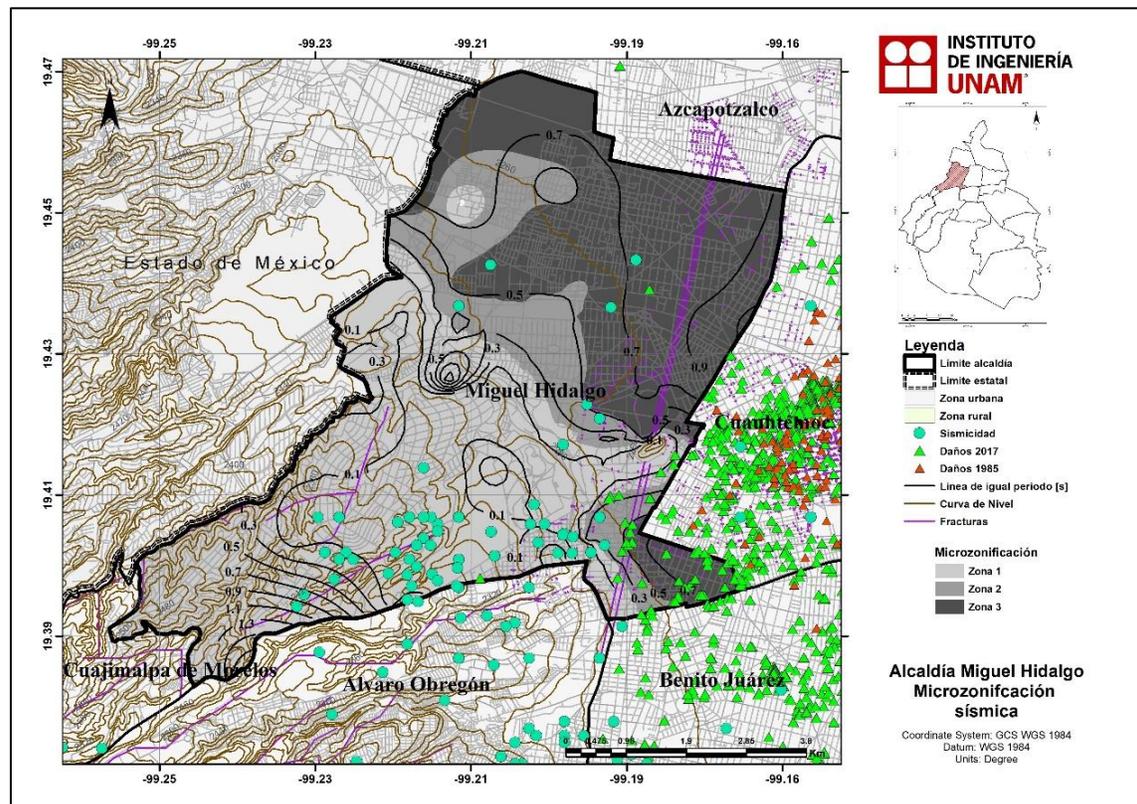


Figura 5.48. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Miguel Hidalgo.

### 5.12 Milpa Alta

La alcaldía Milpa Alta se localiza al sureste de la Ciudad de México y su territorio abarca una superficie de 28,375 ha. Milpa Alta limita al norte con las alcaldías Tláhuac y Xochimilco, al oeste con la alcaldía Tlalpan, al este con los municipios mexiquenses de Chalco, Tenango del Aire y Juchitepec, y al sur con los municipios de Tlalnepantla y Tepoztlán, Estado de Morelos (SPC, 2014g). De acuerdo con la zonificación geotécnica, esta alcaldía se ubica en Zona de Lomas, y de acuerdo con la zonificación sísmica, se ubica en la Zona I.

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Milpa Alta (SPC, 2014g) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: fallas geológicas, hundimientos, deslizamientos, erosión del suelo y agrietamiento del suelo.

En la alcaldía Milpa Alta sólo se han realizado 4 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V, en la zona noreste de la alcaldía, en el límite de la Sierra de Chichinautzin y la zona lacustre (Figura 5.49). Por lo tanto, no es posible realizar la microzonificación ya que no se cuentan con suficientes datos. El cociente espectral de los puntos que se han medido muestran dos respuestas principales; una a altas frecuencias, arriba de los 2 Hz, y otra a bajas frecuencias, alrededor de 0.2 Hz. Se propone realizar la medición de ruido sísmico en el área entre las Sierra de Chichinautzin, al sur de la alcaldía, y el volcán Teuhtli, al norte de la misma, ya que allí se ubican las construcciones, además de que existen fracturas en la zona. También es necesario evaluar la sismicidad local que puede ocasionar daños a las viviendas y construcciones de la alcaldía. Estas mediciones se ubican en el área urbana de la demarcación; llegando en este primer análisis una cantidad de 50 sitios donde se requiere una estimación de su efecto de sitio (cruces de color rojo).

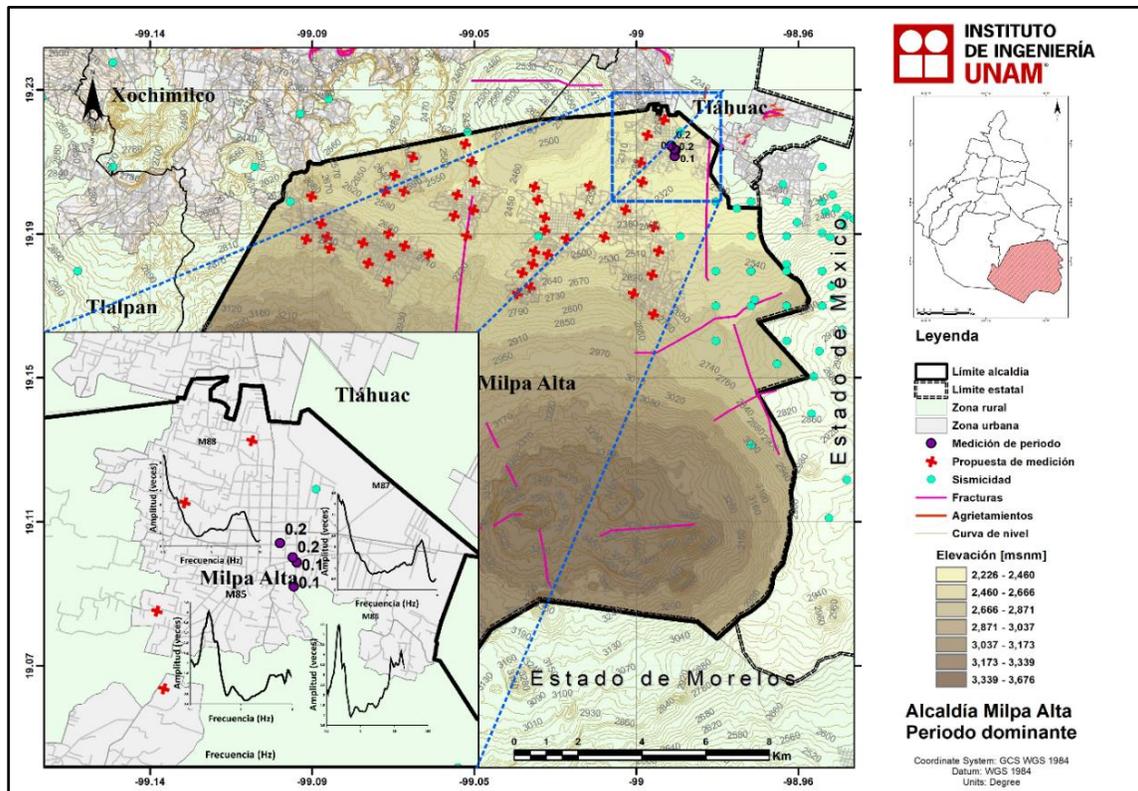


Figura 5.49. Mediciones realizadas y propuestas para la alcaldía Milpa Alta (cruces de color rojo).

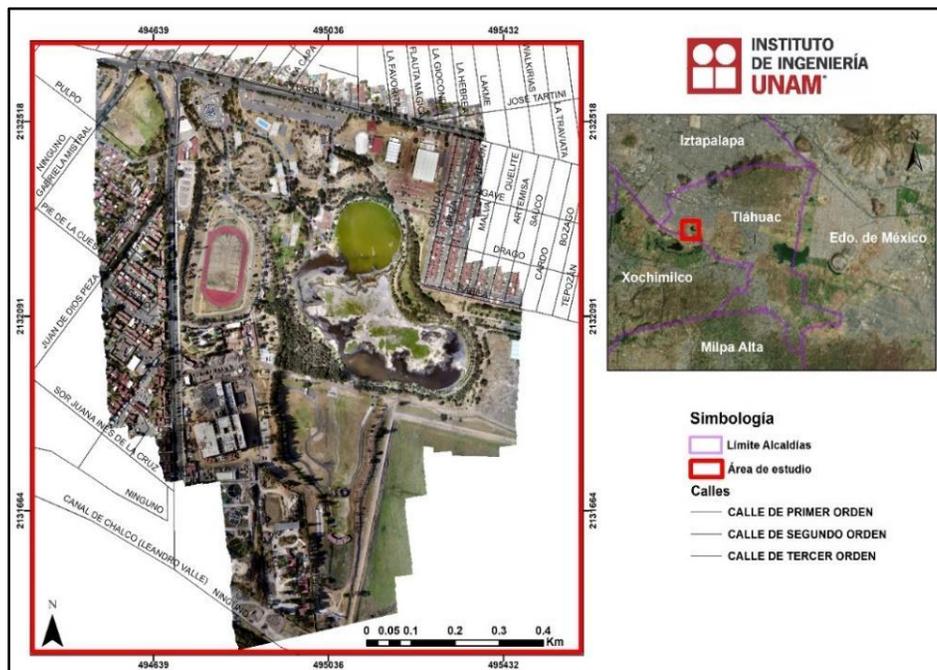
### 5.13 Tláhuac

La alcaldía Tláhuac se localiza al sureste de la Ciudad de México, tiene una superficie aproximada de 89,900 ha. Colinda al norte con la alcaldía Iztapalapa, al sur con la alcaldía Milpa Alta, al oeste con la alcaldía Xochimilco y al este con el municipio de Valle de Chalco Solidaridad y una pequeña porción del municipio de Chalco, Estado de México (SPC, 2014h). En esta demarcación están presentes todas las zonas geotécnicas (Zona de Lomas, Transición y Lago) y todas las zonas sísmicas (I, II, IIa, IIb, IIc y IIId).

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Tláhuac (SPC, 2014h) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: el hundimiento, el fracturamiento y las grietas. Estas últimas se ubican en los límites entre la Sierra de Santa Catarina y la Sierra de Chichinautzin con la zona lacustre.

En la alcaldía Tláhuac se han realizado 489 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.52). La gran mayoría de las mediciones se hicieron para evaluar las zonas de grietas que aparecieron después del sismo del 19 de septiembre de 2017. Por ejemplo, en el Bosque de Tláhuac se realizó un proyecto técnico específico para evaluar el periodo dominante, la amplificación relativa y el espesor del suelo, y la relación de estos parámetros con las grietas que se observaron (Álvarez-Monroy *et al.*, 2019). Enseguida se presenta un resumen del proyecto.

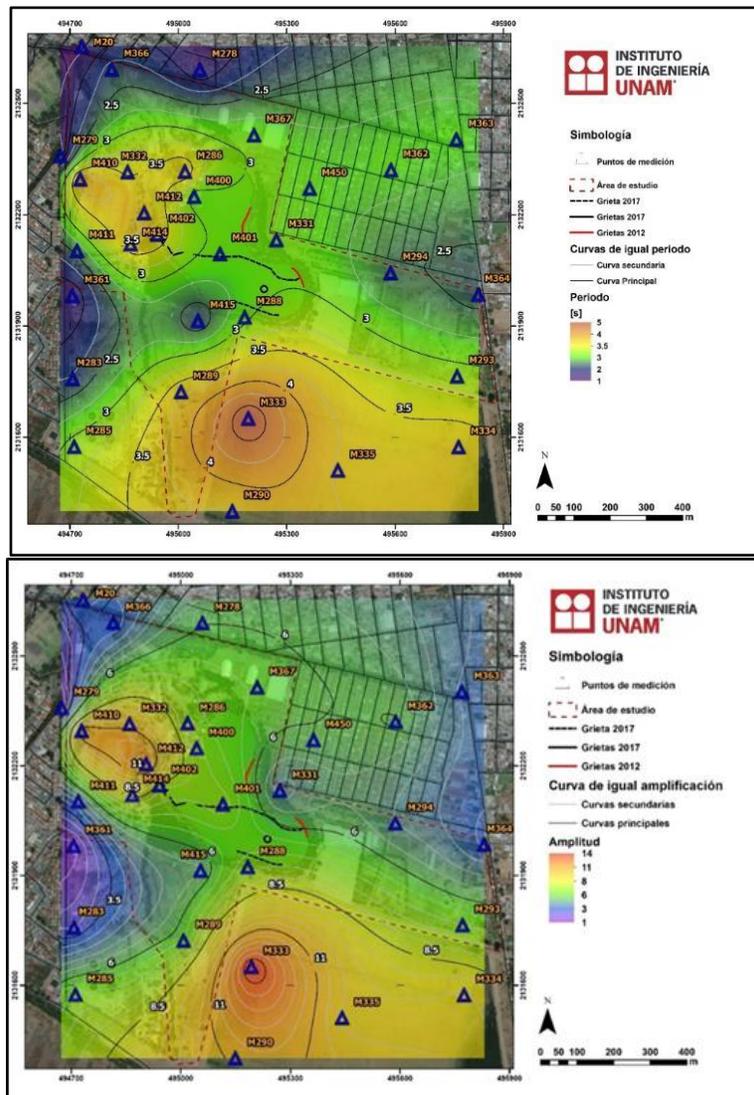
El bosque de Tláhuac comprende aproximadamente 0.63 km<sup>2</sup>, aunque en el estudio se extendió la zona para abarcar la colonia La Draga, el vaso de regulación y la planta de tratamiento, por lo que el área total es de aproximadamente 1.40 km<sup>2</sup> (Figura 5.50). Este trabajo tuvo como objetivo particular realizar un estudio geosísmico en el Bosque de Tláhuac para brindar información acerca de las causas del agrietamiento que se suscitó en el lago del Bosque de Tláhuac después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1).



**Figura 5.50.** Ubicación de la zona de estudio en la alcaldía Tláhuac, Ciudad de México. El mapa del Bosque de Tláhuac se obtuvo mediante los vuelos del Dron (Tomada de Álvarez-Monroy *et al.*, 2019).

En la Figura 5.51 se presenta el mapa de periodos dominantes del suelo determinado a partir del cociente espectral H/V. En la zona de estudio hay dos áreas en donde el periodo es mayor a los 3.0 s. La primera se encuentra en la parte noroeste, en donde se ubica el estadio, y los valores de periodo llegan hasta los 3.5 s. La segunda se encuentra en la parte sureste, en la laguna de regulación, donde se ubica el periodo más grande que corresponde al punto M333 ( $T = 4.76$  s). La curva de 3.0 s marca las zonas donde existe un cambio abrupto en los periodos dominantes del suelo. Las grietas se presentaron en la zona centro del área de estudio, justo en la zona del lago, en donde el valor de periodo es de 3 s y que cambia de forma abrupta hacia el noroeste y el sureste.

En la Figura 5.51 se presenta el mapa de amplificación relativa del suelo determinado a partir del cociente espectral H/V. La amplificación del suelo en la zona de estudio sigue la misma distribución que el periodo dominante. Existen dos zonas donde la amplificación del suelo es mayor: la primera, hacia el noroeste, se alcanzan amplificaciones de hasta 11 veces, y la segunda, hacia el sureste, se alcanzan amplificaciones de hasta 14 veces. Las grietas se ubican en una zona donde la amplificación relativa está en un rango de 6 a 8 veces.



**Figura 5.51.** Mapas de periodo dominante (arriba) y amplificación relativa (abajo) del Bosque de Tláhuac. (Tomada de Álvarez-Monroy *et al.*, 2019)

El periodo dominante en la alcaldía Tláhuac va desde los 0.1 s y alcanza valores superiores a los 5.0 s (Figura 5.53). En la zona de la Sierra de Santa Catarina y la Sierra de Chichinautzin se considera que no hay efecto de sitio, por lo que no hay periodo. En el límite entre estas sierras y la zona lacustre el periodo es de 0.1 s y se incrementa progresivamente hacia la zona de lago, de manera abrupta. Al poniente de la alcaldía, en los límites con Iztapalapa, se define una estructura que parte del volcán Yuhualixqui, entre 1.0 y 2.0 s, que llega hasta el límite con Xochimilco. En las zonas de los antiguos lagos de Xochimilco y Chalco, el periodo es mayor llegando incluso a los 5.5 s en los límites con el municipio de Chalco, Estado de México.

La amplificación relativa comienza en el límite entre las sierras y el lago con valor de 2 veces y llega hasta las 14-17 veces (Figura 5.53). En la zona de lomas la amplificación es nula. Al poniente de la alcaldía la amplificación oscila de manera que no se puede determinar un patrón característico como en otras zonas de la Ciudad de México. La amplificación más alta se ubica en las partes centrales de los antiguos lagos.

El espesor del suelo comienza en el límite de las sierras con la zona de lago con un valor de 0 m y crece de manera progresiva hacia la zona lacustre (Figura 5.54). El espesor del suelo en la zona de lomas es nulo. El cambio de espesor es abrupto en los límites con las sierras. La estructura al poniente de la demarcación oscila entre 13 y 50 m de espesor. Los espesores más altos se ubican en la zona central de los antiguos lagos, llegando incluso a más de 100 m en la parte del lago de Chalco.

La alcaldía se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.55). En la Zona I se ubican la Sierra de Santa Catarina y la Sierra de Chichinautzin. La Zona II, para esta alcaldía en específico, se considera en la zona de periodo dominante mayor a los 3.0 s, amplificación relativa mayor y espesor del suelo a partir de los 70 m. Por último, la Zona III se considera entre los periodos 0.5 y 3.0 s, amplificaciones medias y espesor del suelo entre 10 y 70 m, debido a que en esta área se ubican los agrietamientos y las construcciones que se dañaron durante el sismo de 2017.

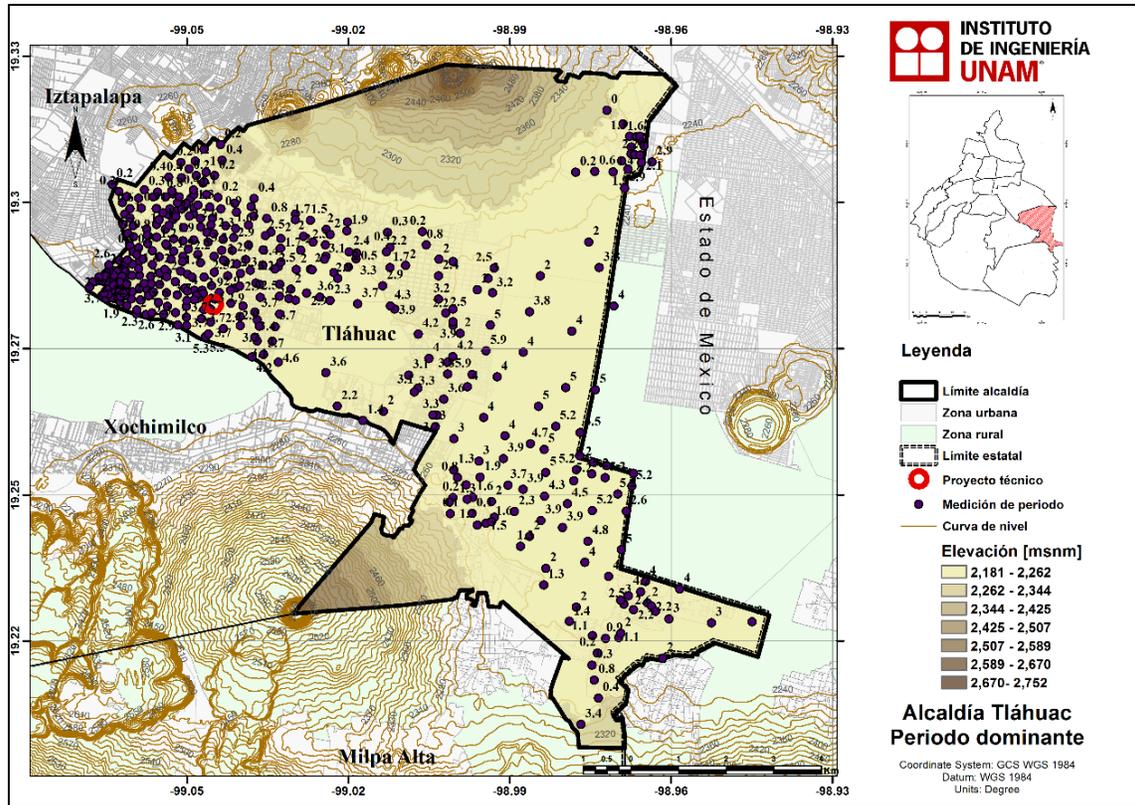


Figura 5.52. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Tláhuac.

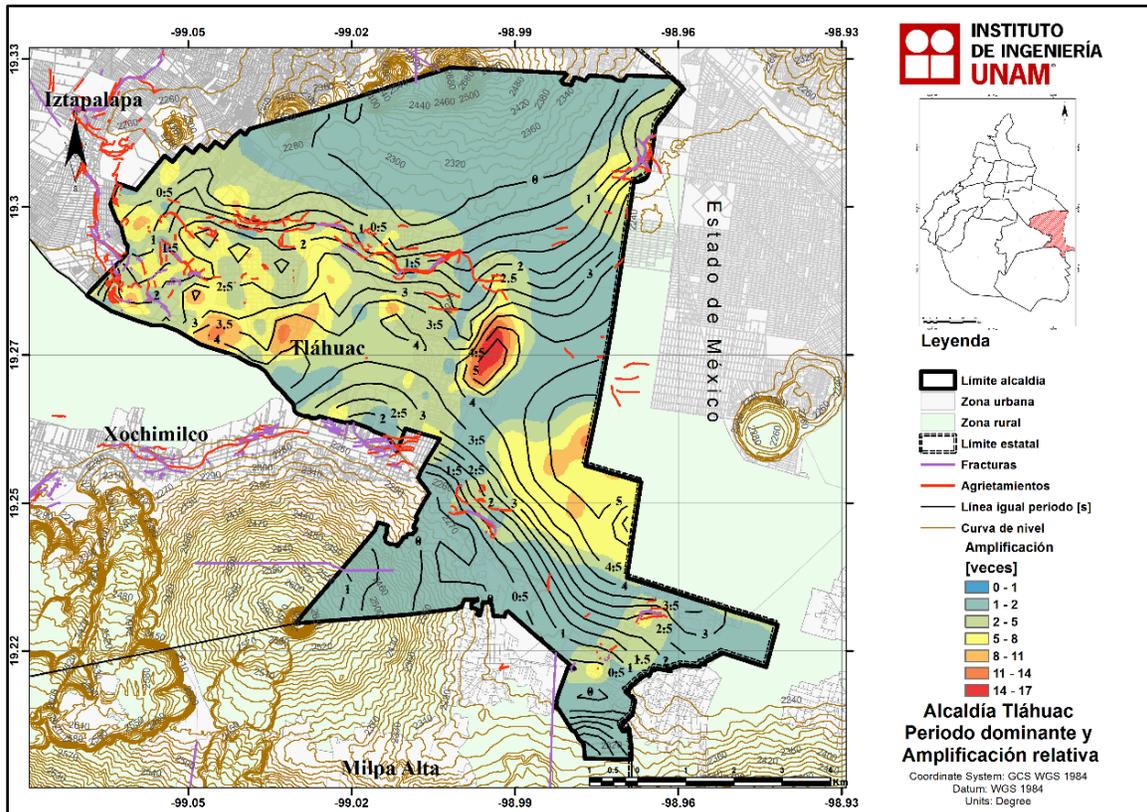


Figura 5.53. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Tláhuac.

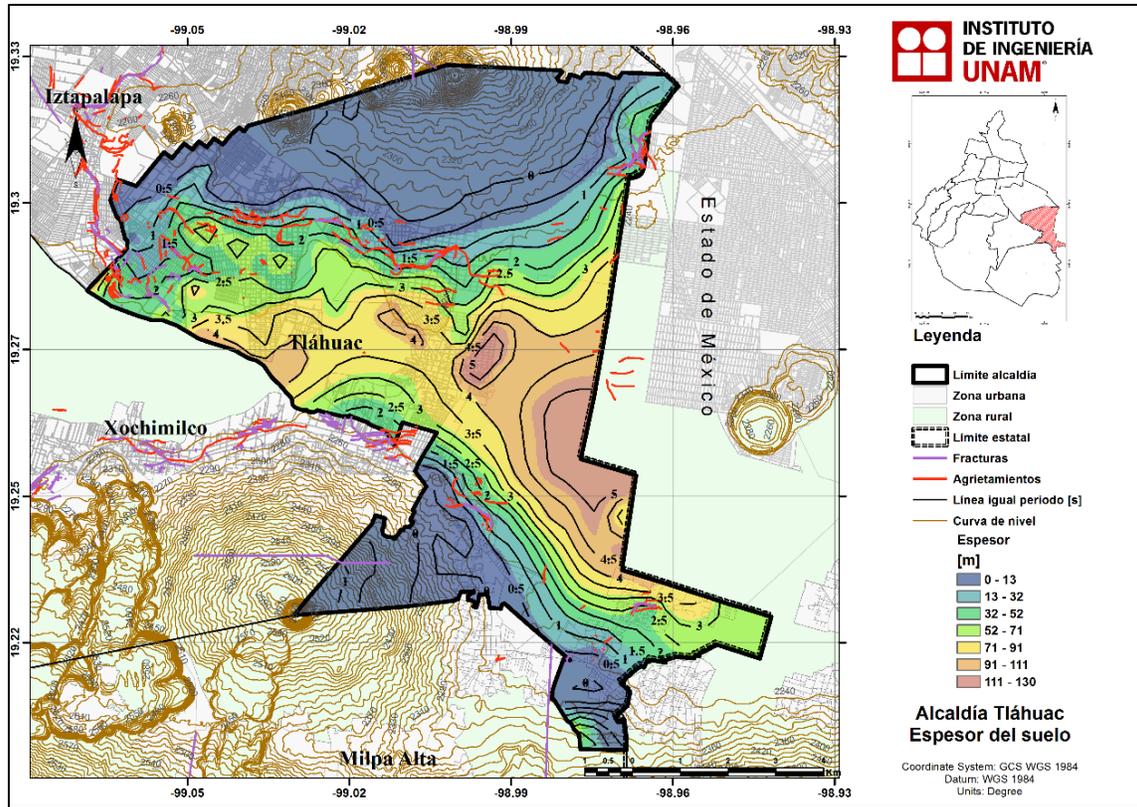


Figura 5.54. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Tláhuac.

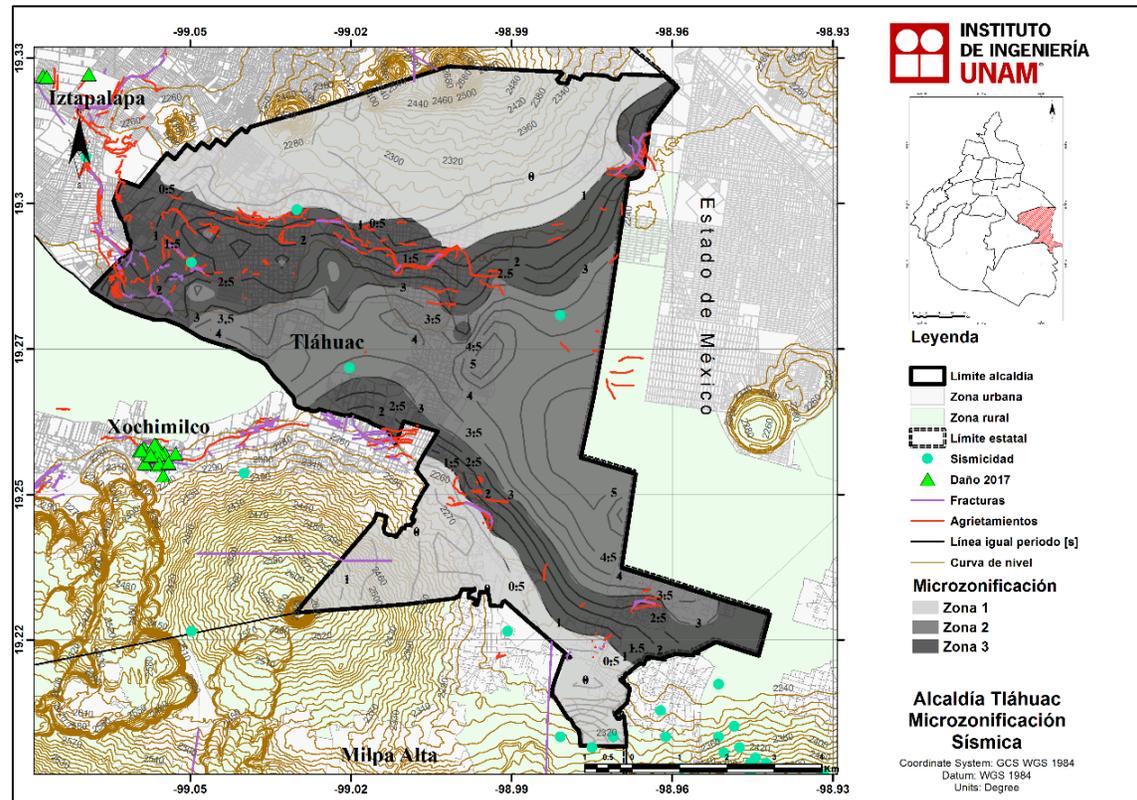


Figura 5.55. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Tláhuac.

## 5.14 Tlalpan

Tlalpan tiene una superficie de 30,449 ha, la cual equivale al 20.52 % de la superficie de la Ciudad de México. Colinda al norte con las alcaldías La Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Coyoacán; al este con las alcaldías Xochimilco y Milpa Alta; al sur con el Estado de Morelos y al oeste con el Estado de México (SPC, 2014i). En esta demarcación están presentes todas las zonas geotécnicas (Zona de Lomas, Transición y Lago) y las zonas sísmicas I, II, IIa, IIIb, y IIIc.

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Tlalpan (SPC, 2014i) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: fallas regionales, fracturas del terreno, agrietamientos del suelo, caída de rocas, deslizamiento e inestabilidad del terreno. Los agrietamientos se presentan en los límites de la sierra de Chichinautzin y la zona lacustre.

En la alcaldía Tlalpan se han realizado 29 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.56). Las mediciones se realizaron al noreste de la alcaldía, en los límites entre la Sierra de Chichinautzin y la zona lacustre. En la zona poblada de la Sierra de Chichinautzin se proponen varias mediciones de ruido sísmico para determinar el efecto de sitio en la parte centro de la alcaldía.

Aunque es una zona pequeña de la alcaldía, el periodo dominante varía de forma significativa desde los 0.1 s, en el límite de la sierra con la zona de lago, y cambia de forma abrupta hasta llegar a ser mayor a los 3.0 s, en el límite con las alcaldías Tláhuac y Coyoacán (Figura 5.57). En la zona de lomas, que abarca toda la parte centro y sur, se considera que no hay efecto de sitio.

La amplificación relativa cambia de la misma forma que el periodo, siendo del orden de 2 a 4 veces en los límites con la Sierra de Chichinautzin, y llegando hasta las 11-14 veces en los límites con las alcaldías Tláhuac y Coyoacán (Figura 5.57). La amplificación en la zona de lomas es nula.

El espesor varía de los 0 m, en los límites entre sierra y lago, hasta llegar a los 60 m aproximadamente en los límites con las alcaldías Tláhuac y Coyoacán, siguiendo la misma tendencia que el periodo (Figura 5.58). Al igual que el periodo y la amplificación, el espesor es nulo en la zona de lomas.

La alcaldía Tlalpan se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.59). La Zona I corresponde a la Sierra de Chichinautzin y hasta llegar a la zona lacustre. La Zona II abarca periodos dominantes de 0.1 hasta 0.5, amplificaciones bajas de 2 a 4 veces y espesor de 0 hasta 10 m. La Zona III se considera a partir de los 0.5 s, de amplificaciones superiores a 4 veces y de espesores mayores a 10 m. La Zona III concuerda con la zona de grietas y afectaciones ocasionadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017. En el mapa también se muestra la sismicidad local de los sistemas de fallas de la Sierra de Chichinautzin que tiene que ser analizada en detalle para esta alcaldía, debido a que se pueden generar aceleraciones muy grandes.

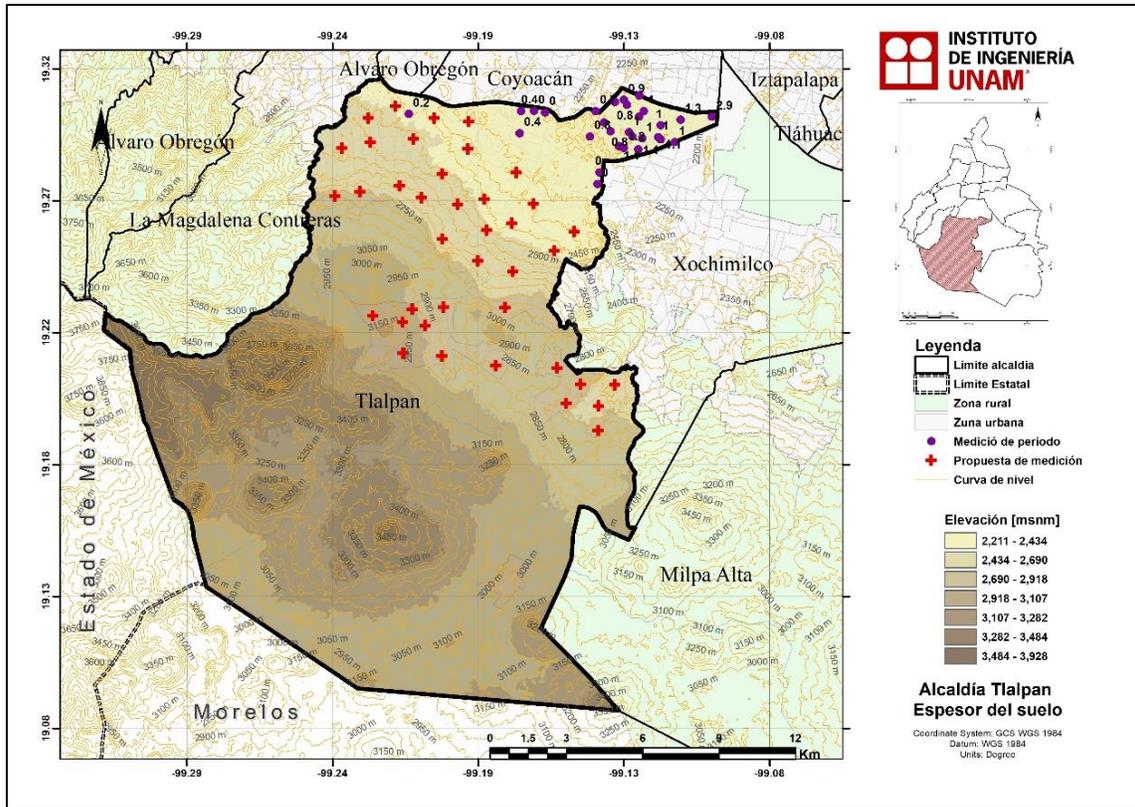


Figura 5.56. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Talpan.

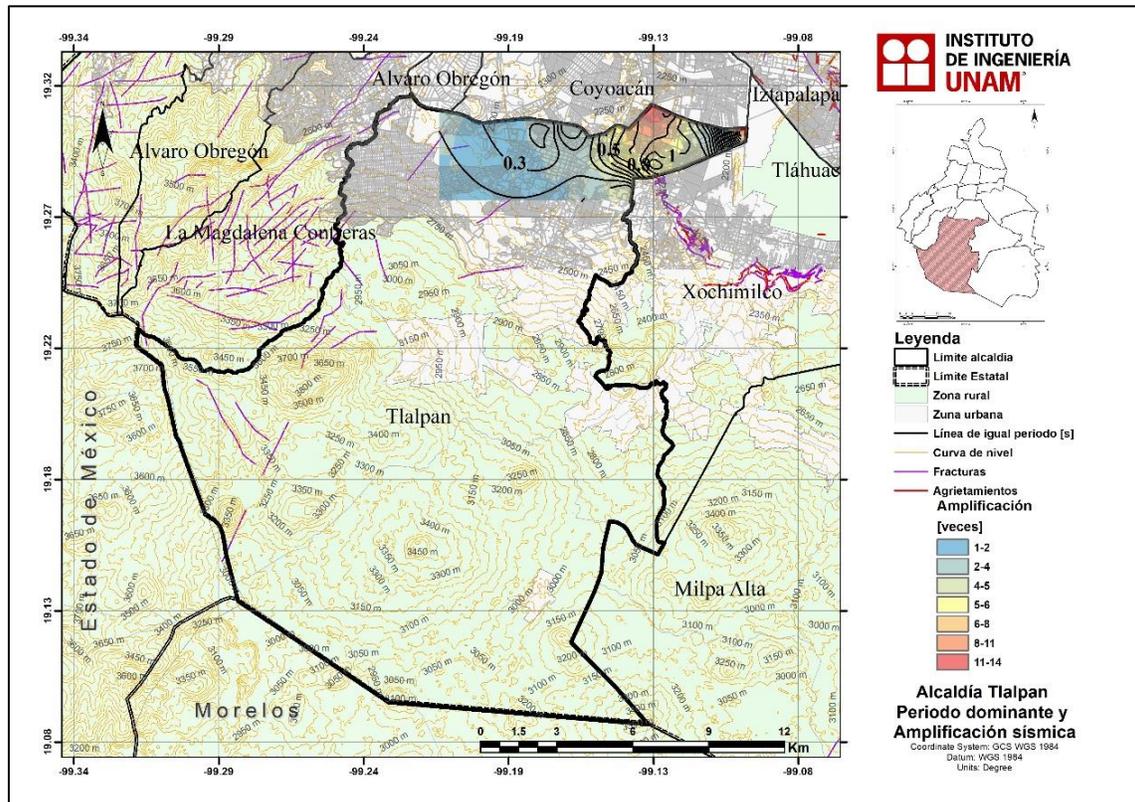


Figura 5.57. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Talpan.

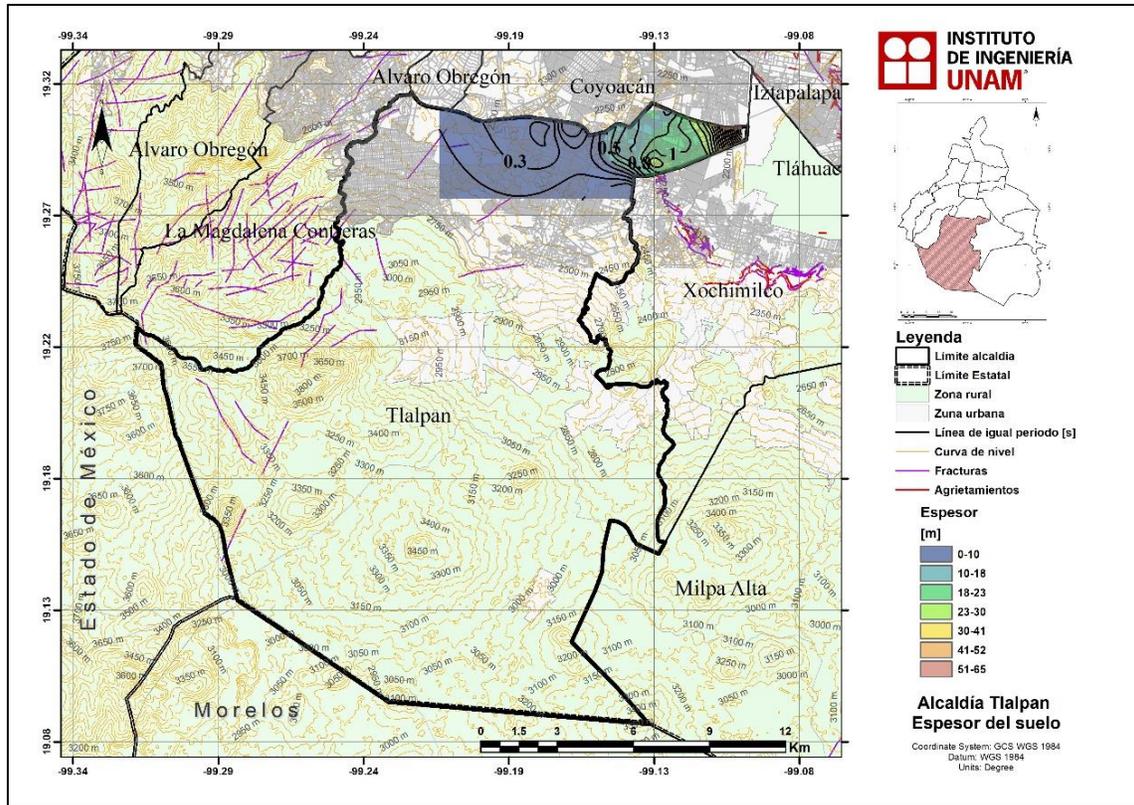


Figura 5.58. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Tlalpan.

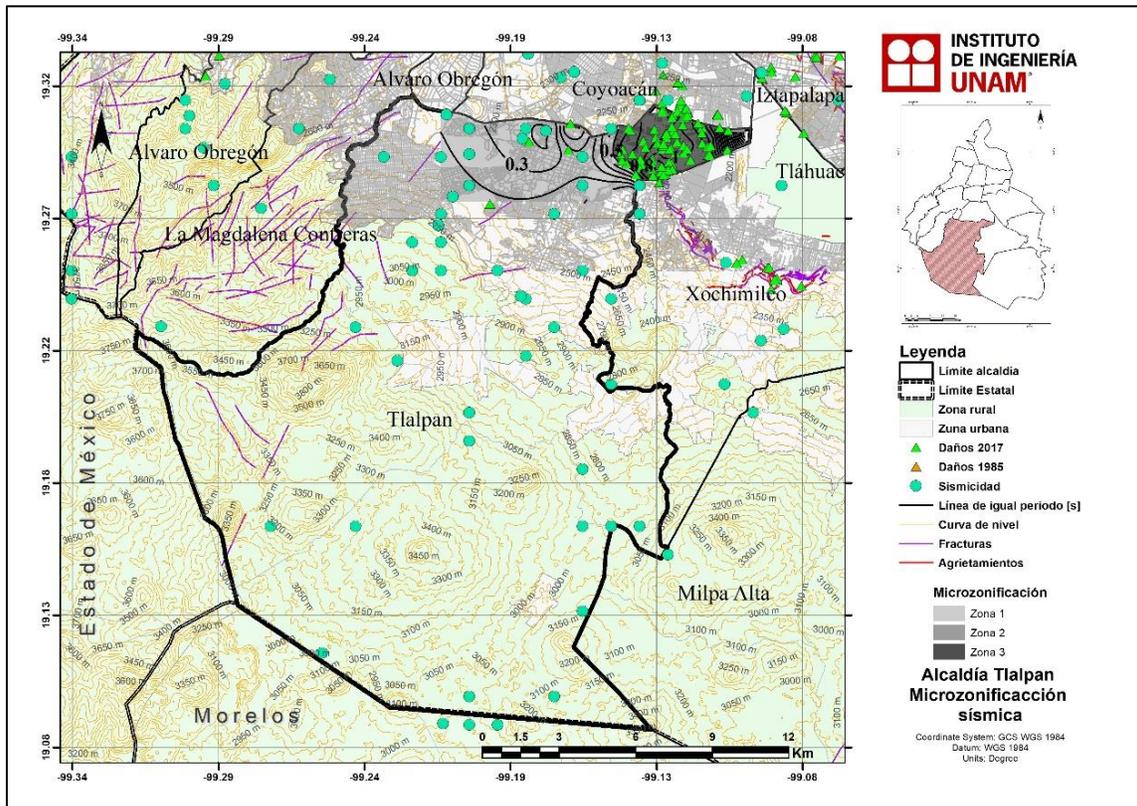


Figura 5.59. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Tlalpan.

## 5.15 Venustiano Carranza

La alcaldía Venustiano Carranza tiene una superficie de 3.34 ha y ocupa el 2.24 % del territorio de la Ciudad de México. Colinda al norte con la alcaldía Gustavo A. Madero, al poniente con la alcaldía Cuauhtémoc, al sur con la alcaldía Iztacalco y al oriente con el Estado de México (SPC, 2014j). De acuerdo con la zonificación geotécnica, en esta demarcación están presentes la Zona de Lomas y Zona de Lago, mientras que la zonificación sísmica considera las Zonas I, IIIc y IIIId.

El Atlas de Peligros y Riesgos para la alcaldía Venustiano Carranza (SPC, 2014j) establece que los riesgos geológicos en la demarcación son: fallas geológicas, hundimientos y grietas de tensión. Las grietas se ubican principalmente en la transición entre el Peñón de los Baños y la zona lacustre.

En la alcaldía Venustiano Carranza se han realizado 109 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.61). En algunos sitios se han realizado estudios detallados en esta demarcación, como en la terminal 2 del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, afectada por las grietas y el hundimiento. Enseguida se muestra un resumen del trabajo que se realizó.

Para el proyecto se realizó una estimación de la variación del periodo dominante en el área de estudio, para ello se tomó en cuenta los trabajos del mapa de isoperiodos publicado por [Martínez-González et al. \(2015\)](#) para la CDMX, donde en la Figura 5.60 se muestra el mapa de periodos en el Aeropuerto Benito Juárez. Los puntos denotados con círculos blancos de centro negro indican puntos de medición donde se estimaron los periodos dominantes. Con esas mediciones se configuraron las curvas rojas que revelan para la Terminal 1 (T1) una variación espacial del periodo de 0.5 a 2.75 segundos si se interpolan las curvas correspondientes a 2.5 y a 3.0 segundos. La variación transversal del periodo en la planta de la T1 tiende a aumentar hacia el sureste.

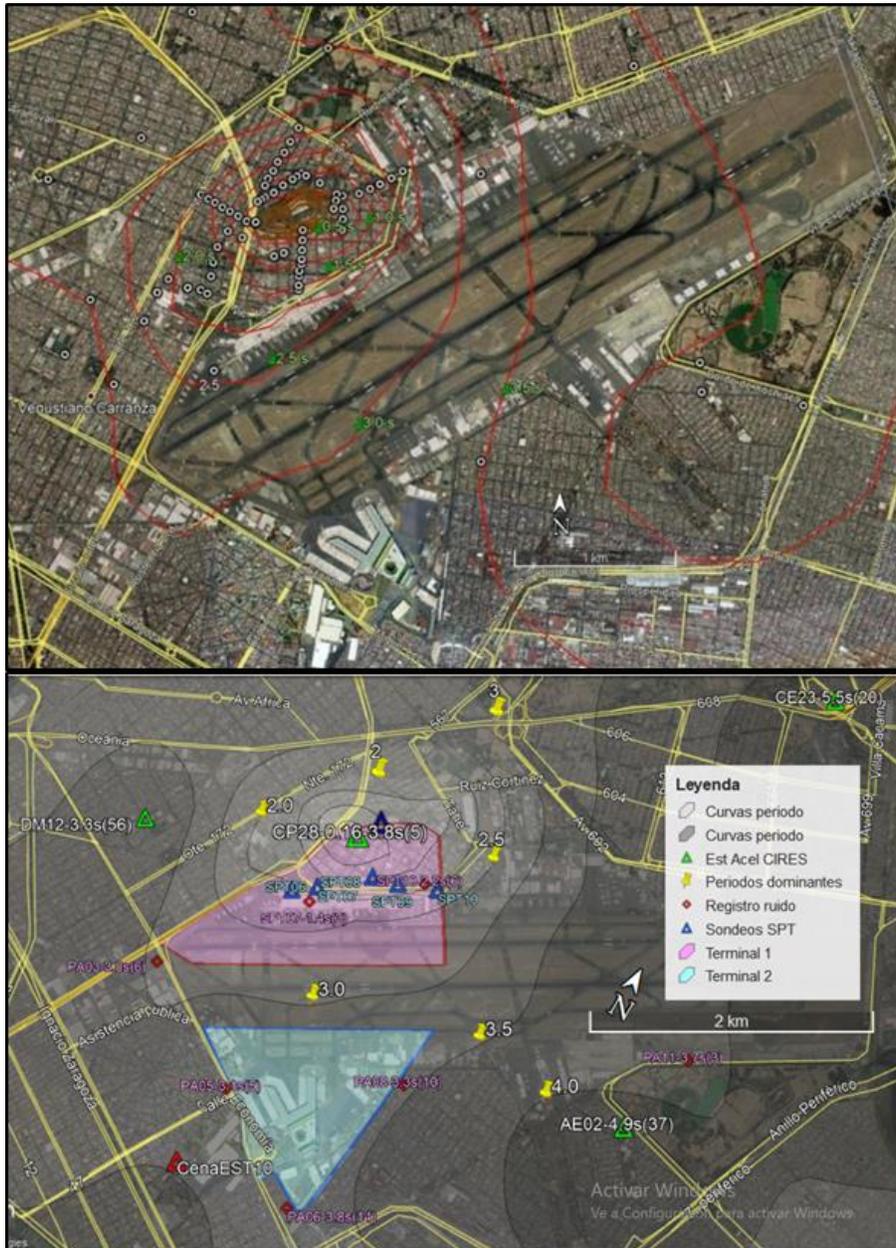
[Lermo et al. \(2019\)](#) actualizó este mapa de isoperiodos para la CDMX. En la Figura 5.60 se muestra, los dos polígonos del área de estudio para las Terminales 1 (polígono de color rosa) y 2 (polígono de color azul), así como las curvas de igual periodo con líneas de color oscuro y con un cambio de color gris cuando la zona tiene un mayor periodo. También se muestran los cinco sondeos geotécnicos anteriormente realizados con triángulos azul oscuro (SPT06 al SPT10) y con rombos rojos siete puntos donde se han calculado cocientes espectrales de ruido sísmico de las amplitudes espectrales del promedio de los componentes horizontales y el espectro vertical.

El periodo dominante de la alcaldía Venustiano Carranza varía de 0.1 hasta los 4.0 s (Figura 5.62). En el Peñón de los Baños se considera que no hay efecto de sitio. La curva de 0.1 s comienza en el límite entre el cerro y la zona lacustre y cambia de forma abrupta hasta los 2.5 s alrededor del Peñón. De noroeste a sureste, el periodo cambia gradualmente, a excepción de la zona del cerro, desde 2.0 y hasta 4.0 s.

La amplificación se ubica en un rango de 2 hasta 15-17 veces en toda la alcaldía. La amplificación en el Peñón de los Baños es nula. Alrededor del cerro la amplificación no supera las 6 veces, y es mayor hacia el noroeste y sureste, en donde alcanza los valores máximos (Figura 5.62).

El espesor tiene una amplia variación desde 0 m hasta el valor máximo, de aproximadamente 100 m. En el Peñón de los Baños el espesor es cero (Figura 5.63). El espesor cambia abruptamente alrededor del cerro, va de 0 m en el límite con el cerro hasta llegar a 50 m. En la parte noroeste el espesor tiene valores de 40 m aproximadamente y cambia gradualmente hacia el sureste, en donde llega al valor máximo.

La alcaldía Venustiano Carranza se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.64). El Peñón de los Baños se definió como Zona I. La Zona II se ubica entre periodos que van de 0.1 s hasta 2.5 s hacia el poniente y 3.5 s hacia el oriente, en donde hay amplificaciones bajas y espesores desde 0 m hasta 60m hacia el poniente y 70 m hacia el oriente. En la Zona II se ubican las grietas que aparecen en el límite entre el Peñón de los Baños y la zona lacustre. Por último, la Zona III se definió con base en los daños ocasionados por los sismos de 1985 y 2017 en la parte noroeste de la alcaldía, en amplificaciones grandes, y en periodo dominante y espesor máximo en la parte sureste de la alcaldía.



**Figura 5.60.** Parte superior) Mapa de isoperiodos actualizado para la Ciudad de México. Valores en segundos (tomado de [Martínez-González et al., 2015](#)). Parte inferior) Distribución de curvas de igual periodo alrededor del Aeropuerto, modificado (Tomada de [Lermo et al., 2020](#))

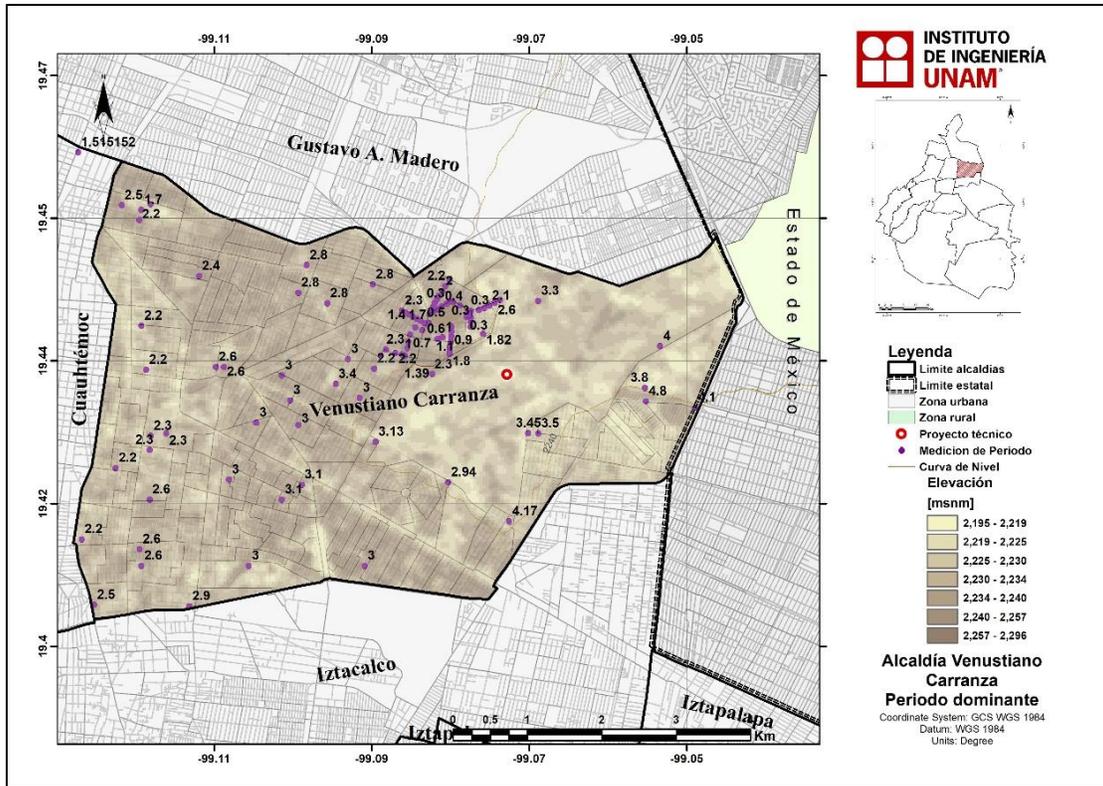


Figura 5.61. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Venustiano Carranza.

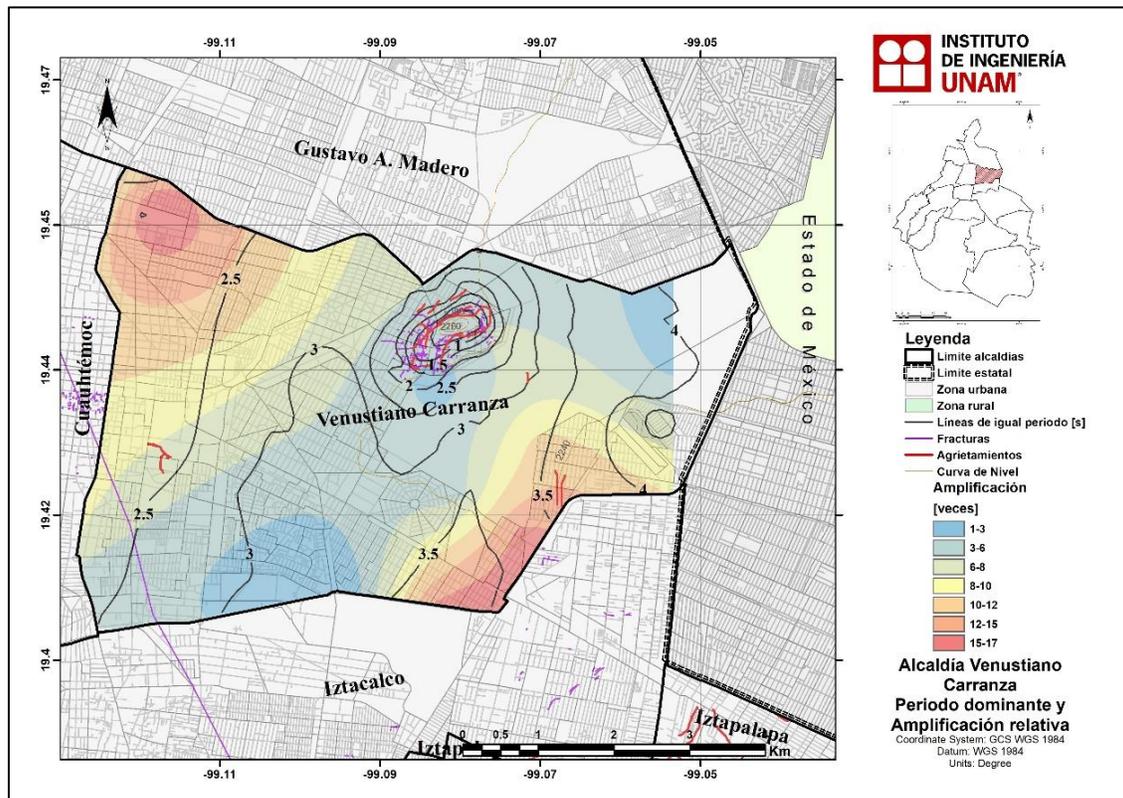


Figura 5.62. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Venustiano Carranza.

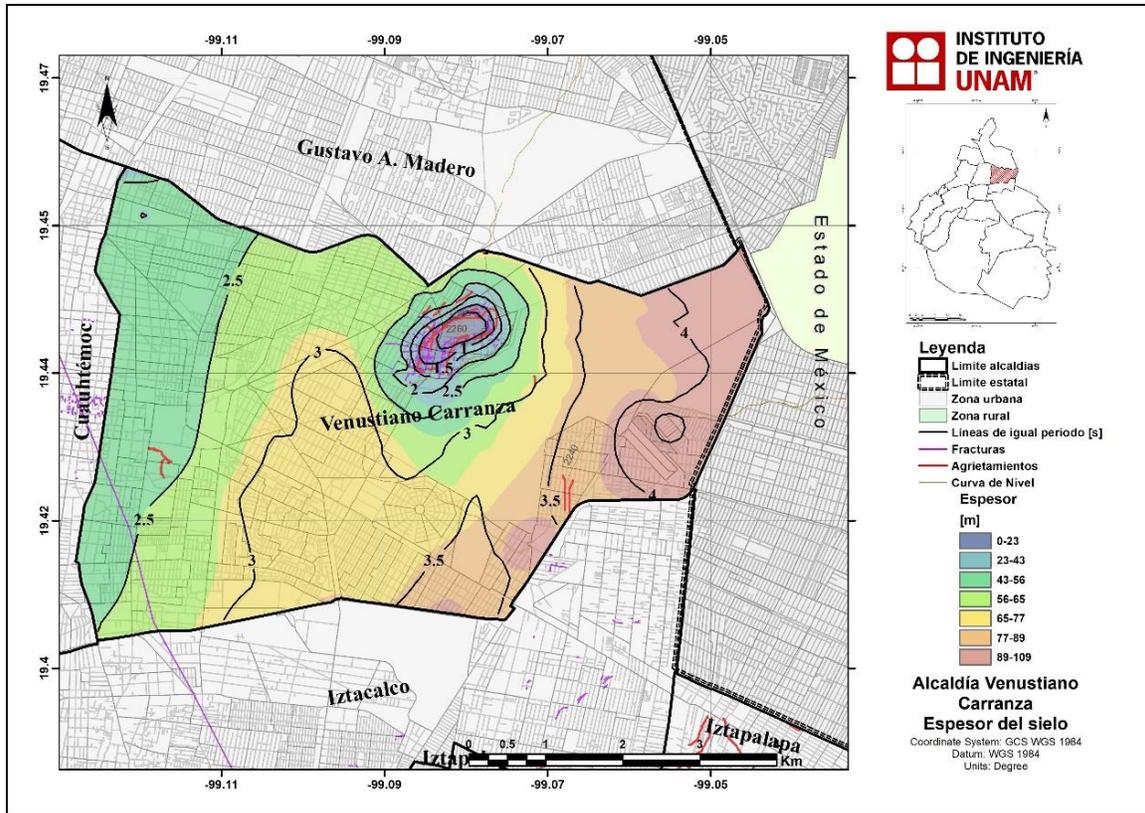


Figura 5.63. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Venustiano Carranza.

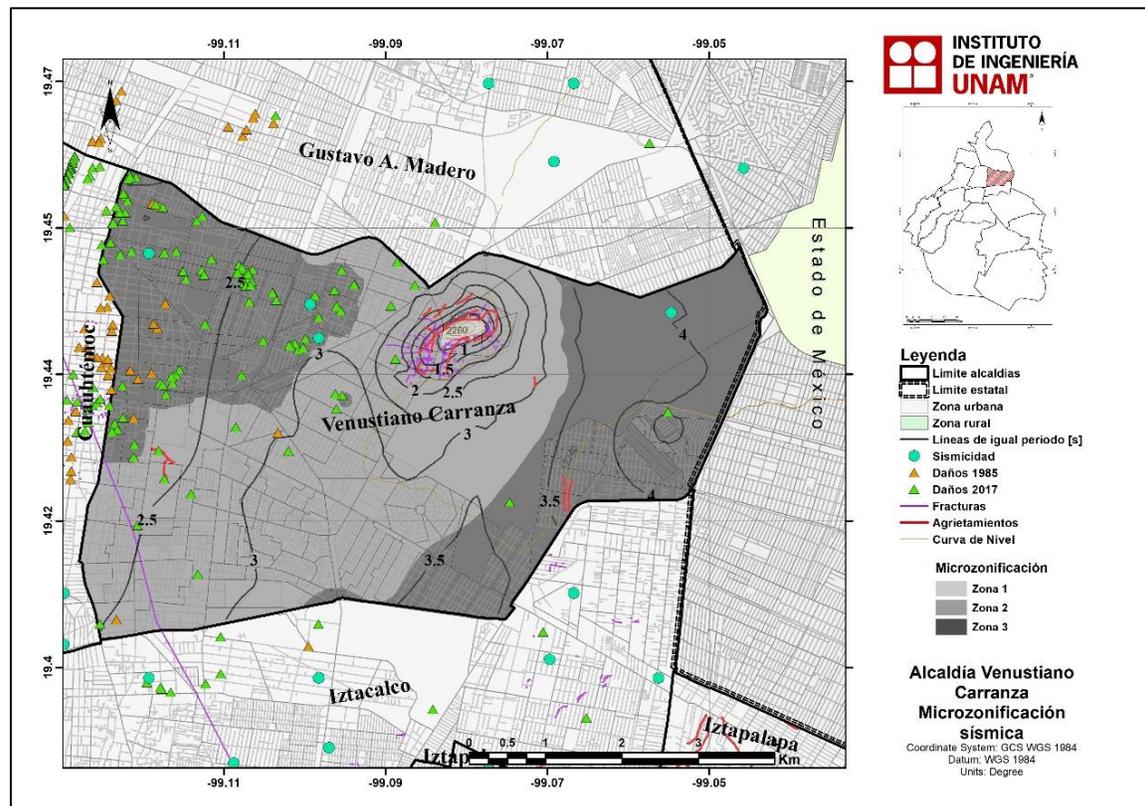


Figura 5.64. Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Venustiano Carranza.

## 5.16 Xochimilco

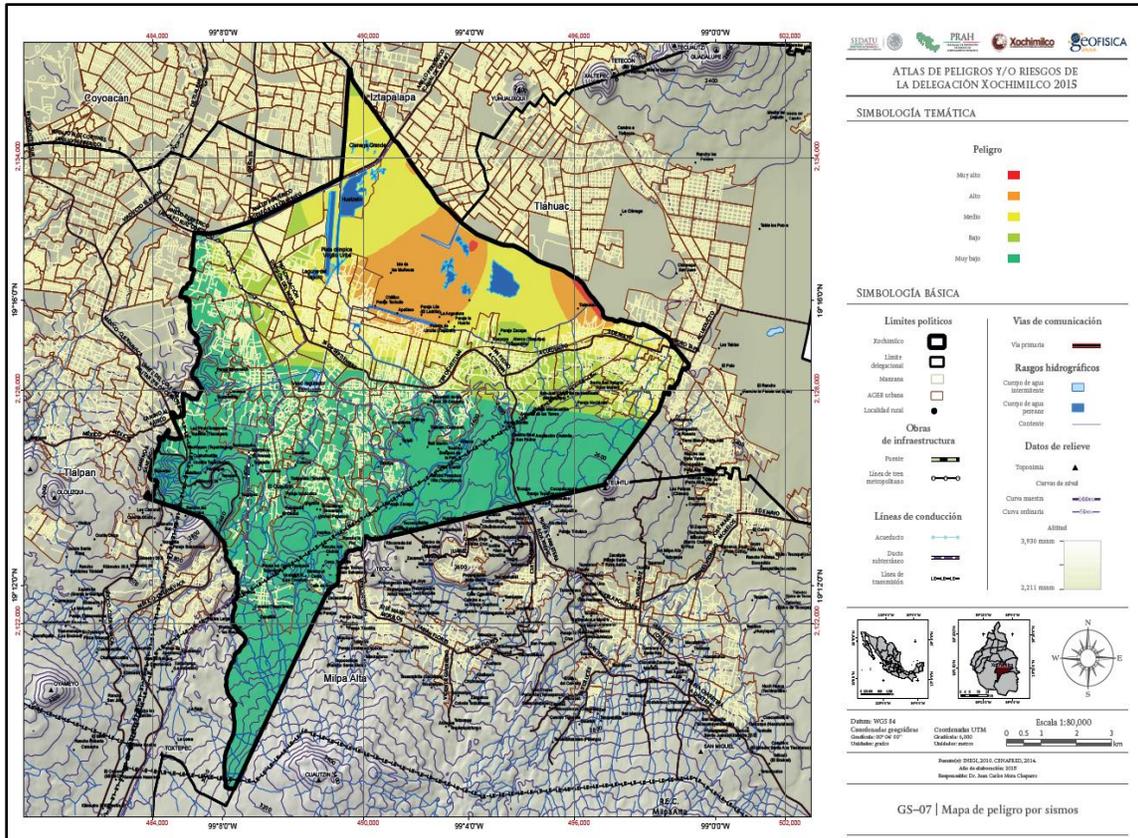
La alcaldía Xochimilco se ubica al sur de la Ciudad de México. Limita al noroeste con la alcaldía Coyoacán, al noreste con la alcaldía Iztapalapa, al este con la alcaldía Tláhuac, al sureste con la alcaldía Milpa Alta y al suroeste con la alcaldía Tlalpan. Tiene una superficie de 12, 517.8 ha, que equivale al 8.4 % de la superficie de la Ciudad de México. La zona norte de la alcaldía Xochimilco corresponde al antiguo lecho lacustre y la zona sur a la Sierra de Chichinautzin (SEDATU, 2015b). En esta demarcación están presentes todas las zonas geotécnicas (Zona de Lomas, Transición y Lago) y todas las zonas sísmicas (I, II, IIa, IIIb, IIIc y III d).

En el Atlas de Peligros y/o Riesgos de la alcaldía Xochimilco (SEDATU, 2015b) se presenta el análisis de peligro sísmico, el cual considera la regionalización sísmica de la república mexicana, el análisis de la sismicidad histórica, la zonificación sísmica y la distribución de mediciones de ruido sísmico realizadas en la demarcación. En cuanto a la regionalización sísmica, la Ciudad de México se ubica en la Zona B, es decir, que los registros de sismos son de recurrencia media y la zona es afectada por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70 % de la aceleración de la gravedad. La recopilación de la sismicidad histórica en la alcaldía se basó completamente en el trabajo de Chavacán (2007). La sismicidad en esta zona es escasa, aunque hay eventos cercanos que corresponden a la Sierra de Chichinautzin. De acuerdo a la zonificación sísmica, en la alcaldía Xochimilco están presentes los tres tipos de zonas. Por último, se realizó una recopilación de 38 datos de periodo dominante de los trabajos de Angulo *et al.* (2011) y Lermo y Chávez-García (1994), obtenidos mediante el cociente espectral H/V.

El mapa de peligro sísmico, del Atlas de Peligros y/o Riesgos de la alcaldía Xochimilco, se realizó considerando únicamente el periodo dominante, en donde se considera que los periodos altos (> 4.0 s) tienen un peligro alto y, conforme el periodo disminuye, el peligro es menor (Figura 5.65). En este mapa se observa que las áreas de mayor peligro se ubican en el lago de Xochimilco y la zona de chinampas, mientras que la zona de menor peligro está ubicada al sur, en la Sierra de Chichinautzin. En este caso, la zonificación puede ser mejorada con la información que se tiene para este trabajo, sobre todo datos de periodo dominante.

En la alcaldía Xochimilco se han realizado 264 mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo dominante y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V (Figura 5.67). La gran mayoría se realizaron para analizar las grietas que aparecieron en los límites entre la Sierra de Chichinautzin y la zona del antiguo lago de Xochimilco después del sismo del 19 de septiembre de 2017. Como ejemplo, a continuación, se presenta un resumen del proyecto realizado en la carretera Xochimilco-Tulyehualco que se dañó debido a los agrietamientos.

Después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw7.1), la zona de Xochimilco que limita con la sierra de Chichinautzin fue seriamente afectada por derrumbes, daños a estructuras y la aparición de un mayor número de grietas en colonias como Santa María Nativitas y San Gregorio Atlapulco. En la carretera Vieja Xochimilco-Tulyehualco, se reportó la aparición de grietas que causaron daños considerables, por lo que la carretera tuvo que cerrarse para su reparación. Por tal razón en este sitio se realizaron sondeos geotécnicos, a una profundidad de hasta 50 m, para evaluar las causas de los agrietamientos.

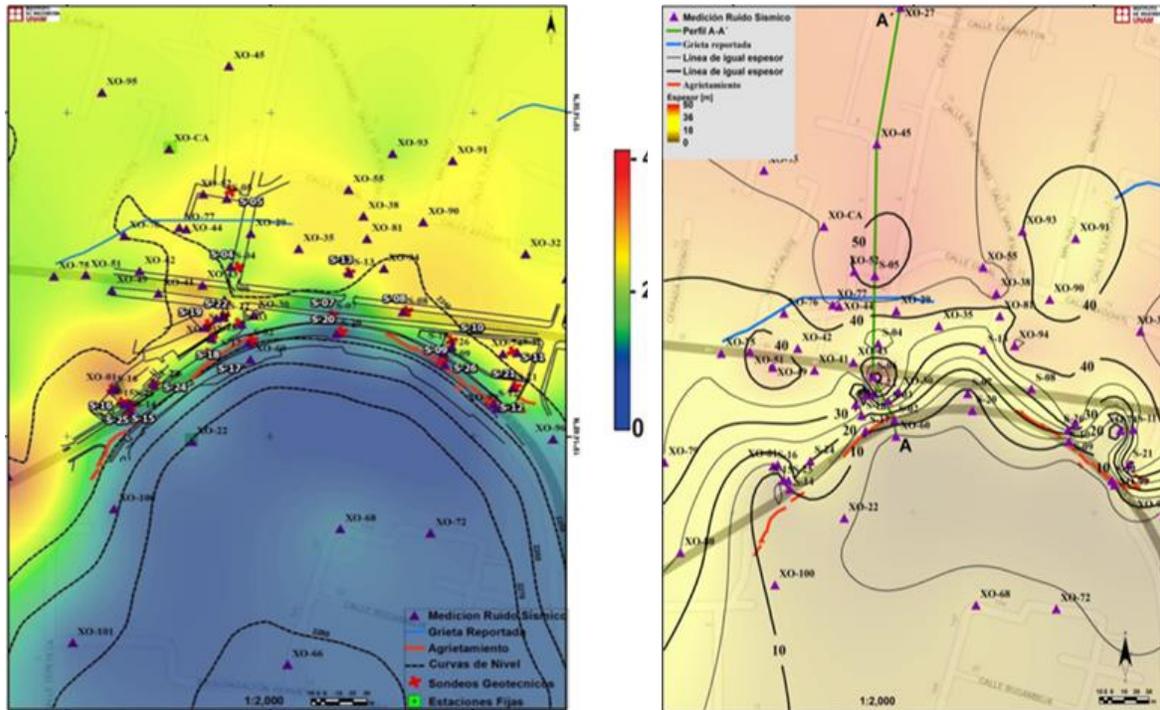


**Figura 5.65.** Mapa de peligro sísmico para la alcaldía Xochimilco propuesto en el Atlas de Peligros y/o Riesgos. (Tomada de SEDATU, 2015b).

Machado-González *et al.* (2019), realizaron un estudio de peligro sísmico para encontrar el origen de los agrietamientos en la zona de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, y estimar el comportamiento dinámico de esos suelos. En la Figura 5.66 (izquierda) se observa el mapa de periodos dominantes del suelo determinado mediante la evaluación de los cocientes H/V. La parte sur de la zona de estudio presenta periodos menores a 0.5 s, por lo que se considera como Zona de Lomas. Del límite que marca la carretera hacia el norte hay un cambio abrupto en los valores de periodo, pasando de Zona de Lomas (0-0.5 s) a Zona de Lago (>1.0 s) con una Zona de Transición (0.5-1.0 s) casi inexistente. Al oeste, el periodo cambia de 0.5 s a 4.0 s en una distancia menor a los 50 m y que al centro, en un tramo de 100 m aproximadamente, el periodo varía de forma más suave justo en donde no se presenta agrietamiento. Por lo tanto, el agrietamiento se presenta justo en la zona de cambio abrupto de periodo dominante del suelo. Hacia el norte los periodos son mayores a 1.0 s, por lo que se considera como Zona de Lago.

En la Figura 5.66 (derecha) también se observa el mapa de espesores determinado mediante las inversiones de las curvas H/V, para realizarlo se tomó como parámetro el contraste de impedancias entre capas que depende si es zona de Loma, Transición o Lago. Para la parte sur (Zona de Loma) se diferencié entre el contraste de la capa de piedemonte y la brecha basáltica proveniente de la Sierra del Chichinautzin. El espesor de la capa conformada entre el piedemonte y la brecha va de 1 a 13 m de profundidad. La zona intermedia ubicada en la Zona de Transición, se definió por el contraste entre la capa de arcilla y la brecha basáltica, los espesores calculados van de los 20 a los 35 m de. Entre estas 2 zonas se presenta el agrietamiento relacionado a la transición abrupta. La zona de lago ubicada

al norte del mapa, está definida por el contraste entre la capa de arcilla y los depósitos profundos, van de los 36 a 55 m de espesor.



**Figura 5.66.** Parte izquierda, mapa de periodos dominantes. Parte derecha, mapa de espesores del suelo. (Tomada de Machado-González *et al.*, 2019).

Este trabajo concluyó que la zona de grietas se ubica en una transición abrupta entre los derrames basáltico de la sierra de Chichinautzin y los depósitos de arcillas del lago de Xochimilco. Por lo que, los resultados de los estudios de tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones realizados en esta zona para la caracterización del subsuelo, fue mal interpretada y que el agrietamiento no se debe a una falla geológica activa como se menciona en el estudio de SACMEX (2016).

En la alcaldía Xochimilco, el periodo dominante varía de forma abrupta entre la Sierra de Chichinautzin y la zona lacustre, con periodos que van de los 0.1 s hasta los 5.0 s (Figura 5.68). En la Sierra de Chichinautzin se considera que no hay efecto de sitio. En el límite entre la sierra y el lago, el periodo comienza en 0.1 s y cambia rápidamente hasta los 2.0s, a excepción del poniente, en donde el cambio es más suave. En el centro del antiguo lago de Xochimilco es periodo es incluso mayor a los 5.0 s.

La amplificación relativa varía entre 2 y 20 veces aproximadamente, En la Sierra de Chichinautzin la amplificación es nula. En el límite entre la sierra y el lago la amplificación llega a valores de hasta 3-8 veces, para después disminuir hacia el centro del lago, en donde la amplificación alcanzo el máximo valor (Figura 5.68).

El espesor también varía de manera considerable, desde 0 m hasta alcanzar más de 100 m (Figura 5.69). El espesor en la Sierra de Chichinautzin es nulo. Cambia abruptamente de 0 a 50 m en el límite entre la sierra y el lago, a excepción de la parte poniente en donde el cambio es más progresivo. El máximo valor de espesor es mayor a los 100m y se ubica en la zona central del lago de Xochimilco.

La alcaldía Xochimilco se dividió en tres zonas para realizar la microzonificación sísmica (Figura 5.70). La Zona I se definió en la Sierra de Chichinautzin debido a que se considera que no existe efecto de sitio en estos lugares. En la Zona II el periodo es mayor a los 3.0 s, la amplificación es superior a las 5-8 veces y el espesor mayor a los 50 m. Aunque en la Zona II se consideran los valores máximos de los parámetros considerados, en esta área no existen grietas y tampoco es un lugar con viviendas, debido a que se encuentran los remanentes del lago del Xochimilco. Por último, la Zona III se ubica en un rango de periodos de 0 a 3.0 s, amplificaciones que varían de 2 a 8 veces y espesores de 0 hasta 50 m. En la última zona se ubican las grietas que se presentan entre la Sierra de Santa Catarina y el lago, y también los daños producidos por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

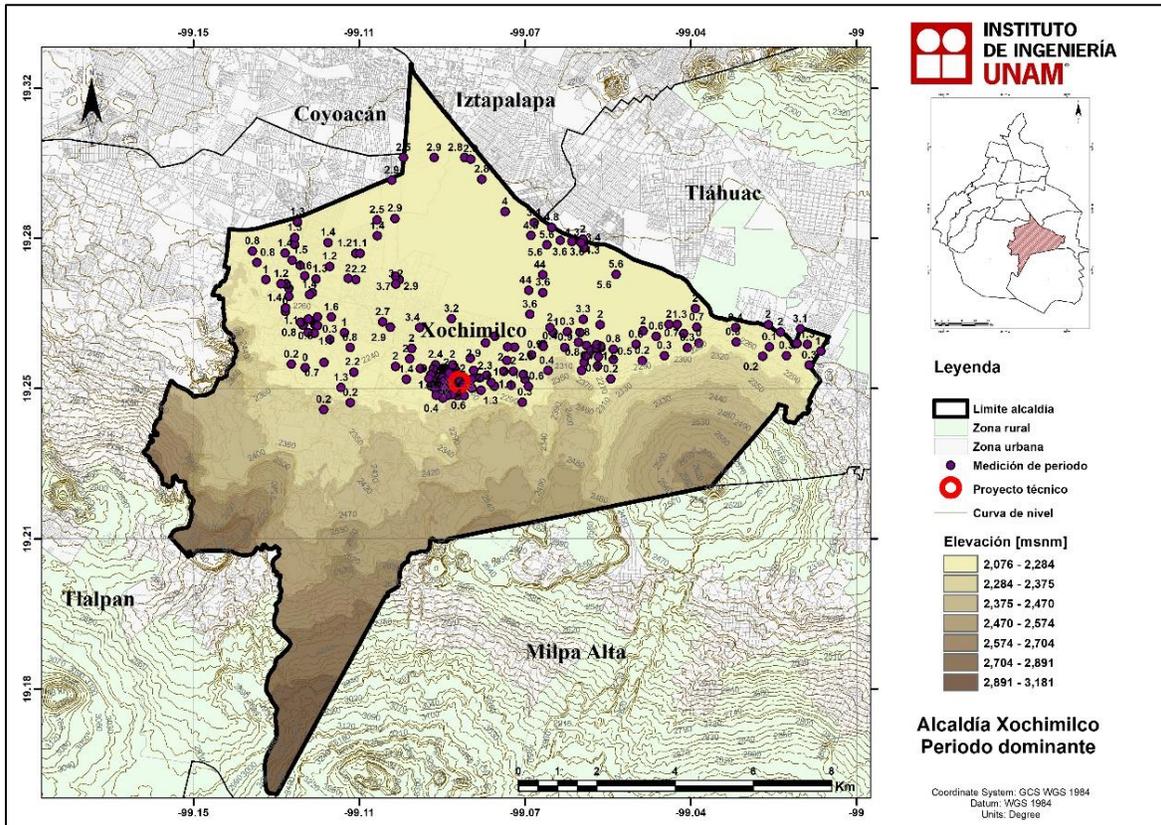


Figura 5.67. Mediciones de ruido sísmico en la alcaldía Xochimilco.

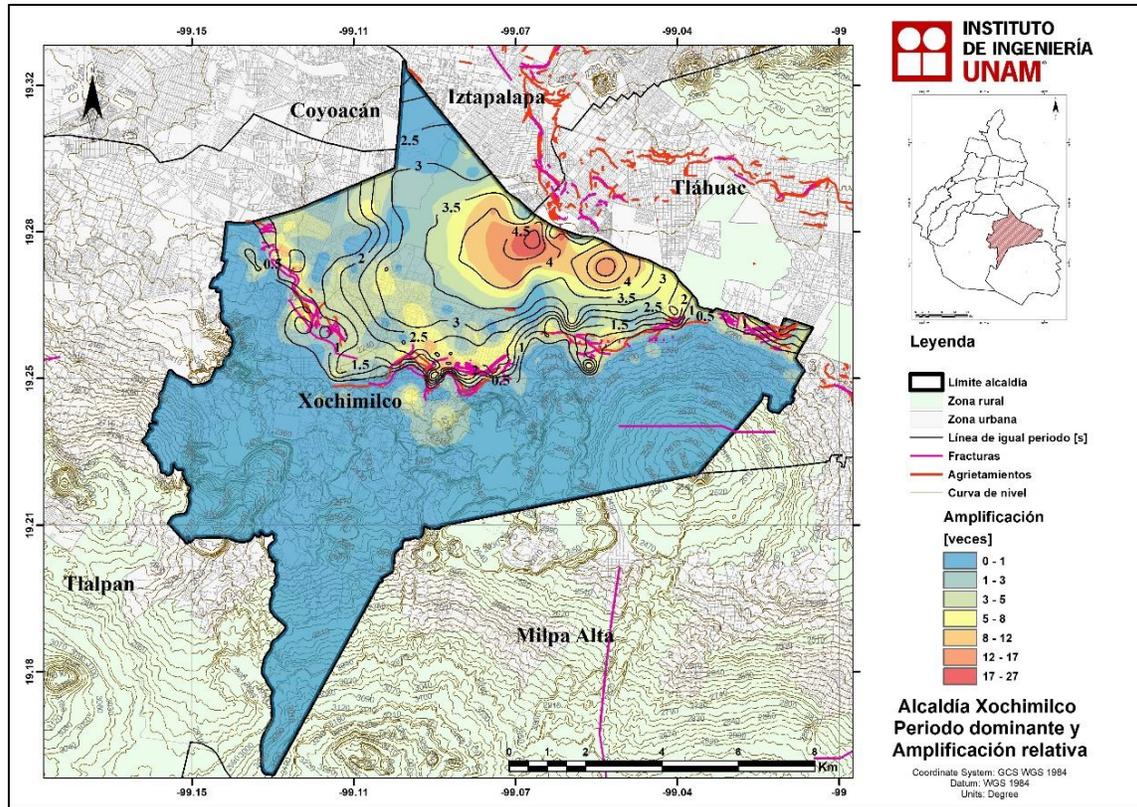


Figura 5.68. Mapa de periodo dominante y amplificación relativa para la alcaldía Xochimilco.

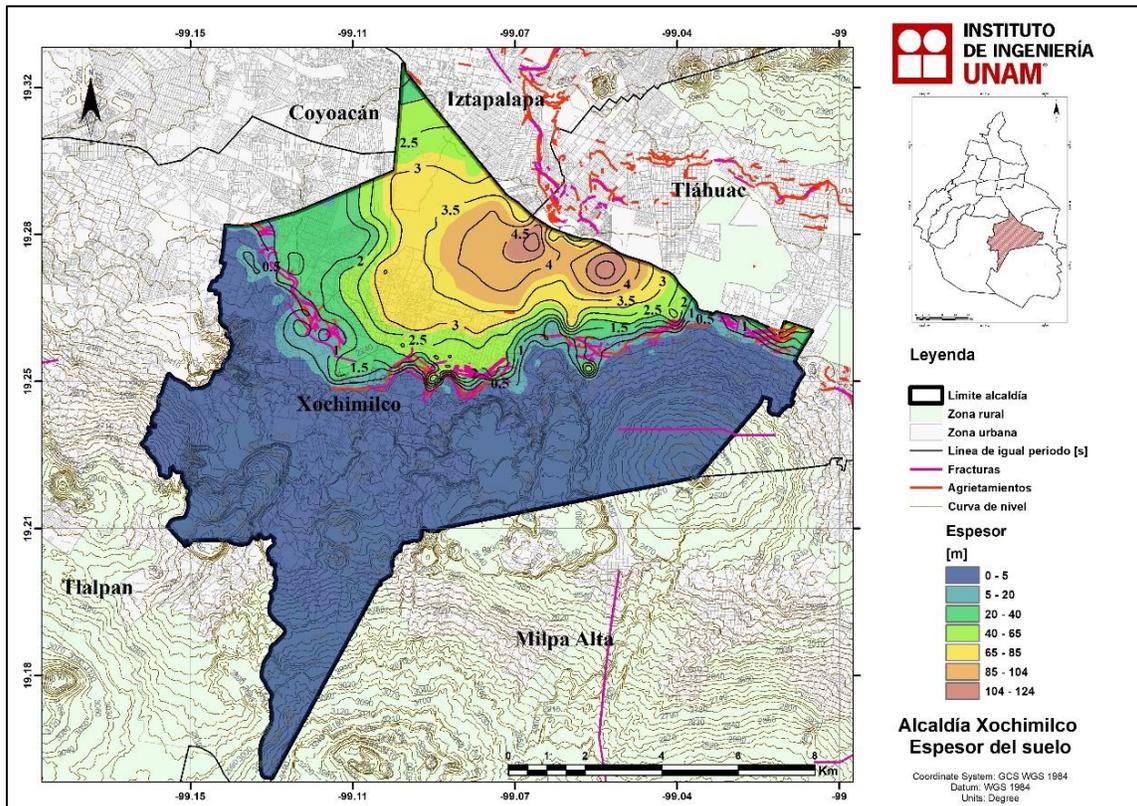
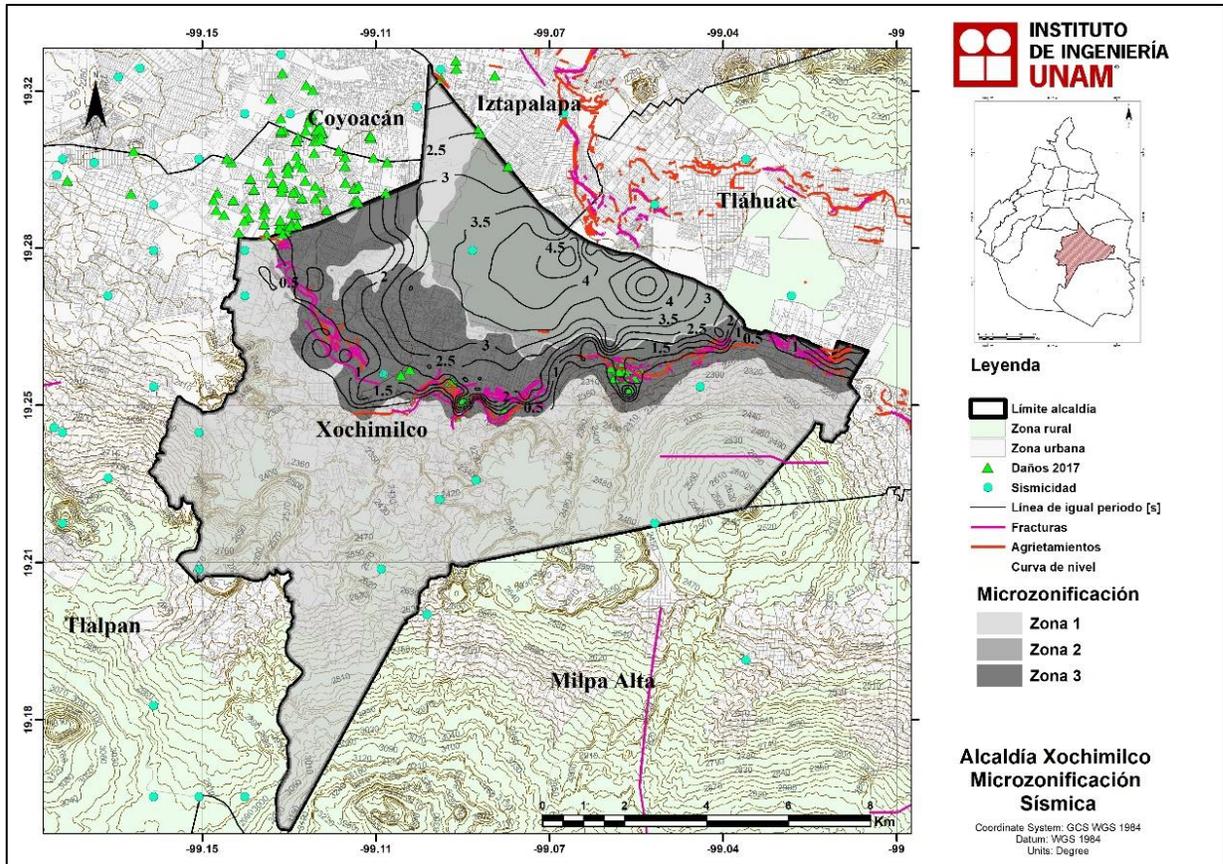


Figura 5.69. Mapa de espesor del suelo para la alcaldía Xochimilco.



**Figura 5.70.** Mapa de microzonificación sísmica para la alcaldía Xochimilco.

## 6. Conclusiones

Gracias al apoyo del “Instituto para la seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México”, este año del 2020 se realizaron un total de 216 nuevos puntos de registros de ruido sísmico para la actualización de la zonificación sísmica de la parte norte de la CDMX y áreas aledañas. Por lo tanto con la información de 2680 puntos de periodos dominantes del suelo se actualizó el mapa de isoperiodos de la cuenca del Valle de México. Se definieron mejor los periodos dominantes de las alcaldías de Gustavo A Madero, Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Álvaro Obregón y Coyoacán. Los valores de periodo más grandes, mayores de 5.0 s, se encontraron en las zonas centrales de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. En Chalco se registró el periodo más grande de toda la cuenca que alcanza un valor de 5.9 s.

El nuevo mapa de periodos dominantes para la Ciudad de México y áreas aledañas, además de considerar los daños producidos por el sismo del 19 de septiembre de 1985 Mw8.1 y 2017 Mw7.1 y la distribución de los agrietamientos; se ha incluido la sismicidad local registrada desde 1970 a la fecha. Las curvas de igual periodo dominante dividen en dos zonas a la cuenca del Valle de México, la Zona I que se estableció como la zona de las sierras y los cerros hasta la curva de 0.1 s definida con ayuda de la geología y la morfología de la cuenca. La zona II o zona de Lago, que parte de la curva de 0.1 s y se distribuye hasta la curva de periodo de 5.9 s. La Zona II queda dividida en dos secciones: una al centro de la cuenca que se ubica en el antiguo lago de Texcoco, y una al sur que está ubicada en la subcuenca de Xochimilco-Chalco. En esta ocasión se han incluido las curvas de igual periodo para la parte alta de las alcaldías de Álvaro Obregón y Coyoacán, con el propósito de resaltar que las zonas de lomas o Zona I, también presentan efectos de sitio, en especial en quebradas, valles, etc. Este resultado debe considerarse en las NTCDS y en el Atlas de Peligros y Riesgos, debido a que hay zonas densamente pobladas y se están realizando nuevas construcciones de altura considerable, sobre todo en la zona de Santa Fe.

El mapa de espesores de los suelos blandos o profundidad a los depósitos profundos se construyó con base en los 285 sitios en donde se encontró información y la relación potencial obtenida mediante la relación entre  $H_s$  y  $T_0$ . En esta ocasión se ha incluido las curvas de igual periodo dominante, con el propósito de observar su relación entre estos dos parámetros fundamentales para el diseño sísmico. Los espesores más grandes se ubican en las partes centrales de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, alcanzando valores de hasta 130 m en este último. El cambio de espesores es abrupto en la subcuenca de Xochimilco-Chalco y más suave en los límites de la sierra de Las Cruces. La distribución de daños ocasionadas por los terremotos de 1985 y 2017 y de los agrietamientos se localiza en espesores de hasta 60 m aproximadamente.

En esta ocasión también se ha incluido el mapa de amplificación relativa, basado en la amplitud del cociente espectral  $H/V$ , se realizó con 1362 datos de la Ciudad de México y áreas aledañas. En general, las amplificaciones mínimas se presentan en los límites entre las sierras, cerros y volcanes con la Zona de Lago, y las amplificaciones máximas, que alcanzan valores de hasta 30 veces, se ubican en la parte central de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, confirmando la misma tendencia que presentan los periodos dominantes. Sin embargo, en la zona poniente de la ciudad, la amplificación de más de 10 veces, no muestra la tendencia mencionada, ya que está se encuentra entre 1.0 y 2.0 s del periodo dominante, pero si responde a la zona donde los daños provocados por los terremotos de 1985 y 2017 fueron mayores. Lo que muestra que probablemente este sea otro de los factores que se necesitan conocer para responder por qué la distribución de daños se concentró en esta zona

Finalmente, las mediciones de ruido sísmico consideradas en este trabajo se distribuyen por la mayoría de las alcaldías de la Ciudad de México, a excepción de las alcaldías de la zona sur, Milpa Alta, Tlalpan, La Magdalena Contreras y Milpa Alta, en donde normalmente se considera que no existe el fenómeno de efecto de sitio. Es decir, se tiene suficiente información en la Ciudad de México para considerar la zonificación a una menor escala. Por lo tanto, en este estudio se proponen mapas de microzonificación sísmica en las 16 alcaldías que pertenecen a la Ciudad de México, los cuales son provisionales ya que se tienen que realizar estudios más detallados.

El propósito de realizar la microzonificación sísmica por alcaldías es incluirla en las actualizaciones posteriores de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, debido a que la actual zonificación es muy general y se requiere información más precisa para considerarla en los procesos constructivos. Además, en los estudios a detalle para la estimación del peligro sísmico de los Atlas de Peligros y Riesgos (CENAPRED, 2006) es necesario un estudio de microzonificación sísmica, considerando la amplificación relativa y el periodo dominante, para conocer a profundidad la respuesta sísmica de un sitio. Por lo tanto, los mapas de microzonificación sísmica por alcaldía, propuestos en este trabajo, se pueden considerar para mejorar los Atlas de Peligros y Riesgos, ya que muchos de ellos no incluyen esta información e incluso algunos no consideran el peligro sísmico.

## 7. Recomendaciones

Para definir mejor los mapas por alcaldías de periodo dominante, amplificación relativa y espesor del suelo es necesario seguir realizando mediciones de ruido sísmico, en especial en aquellas demarcaciones que tienen poca información o en las cuales las mediciones son muy antiguas.

La zona de lomas generalmente se ha considerado como suelo firme en donde no hay efecto de sitio, pero las investigaciones de ruido sísmico llevadas a cabo en las alcaldías Álvaro Obregón y Coyoacán revelan que los periodos de vibración del suelo pueden alcanzar valores de hasta 2.0 s. Por lo tanto, es recomendable realizar estudios de microzonificación sísmica para definir mejor la zona de lomas, sobre todo en los sitios altamente poblados y en las zonas de barrancas.

## 8. Agradecimientos

Esta investigación fue patrocinada por **Instituto Para La Seguridad de Las Construcciones En La Ciudad De México** bajo el **CONVENIO ISCDF/CEC-04/2020-13** con el Instituto de Ingeniería, UNAM, “Actualización de la zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas-Parte norte”. Así como por el por el Instituto de Ingeniería de la UNAM a través de mi Fondo de Investigación R582.

## 9. Bibliografía

- Aguilar, H. R., Galicia, M., Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J., Vieitez, L., Salazar, M. (2003). Efecto del hundimiento regional en las propiedades dinámicas del suelo. Centro de Investigación Sísmica AC, México D.F.
- Alberro, J., Hernández, R., (1991). Temblores inducidos por fuerzas de filtración. Serie del Instituto de Ingeniería, UNAM, Vol. 530, 78 pp.
- Álvarez-Monroy, I., Lermo-Samaniego, J. F., García-Benites, S. R., Ramos-Pérez, E., Machado-González, O. R., Luna Cruz, J. I., Jiménez-Méndez, N., Téllez-Rodríguez, N. (2019). Modelo estratigráfico 3D generado a partir de técnicas de sísmica pasiva (HVNR) para el análisis de grietas en el bosque de Tláhuac, Tláhuac, México. XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Monterrey, 2019.
- Arce, J. L., P. W. Layer, E. Morales-Casique, J. A. Benowitz, E. Rangel, and O. Escolero (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and whole-rock chemistry, *J. Volcanol. Geoth. Res.* 266, 34–49.
- Auvinet, G., Méndez, E., y Juárez, M. (2016). El subsuelo de la Ciudad de México. Volumen III.
- Avilés J., and Pérez-Rocha, L. E. (2010). Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response. *Soil Dyn Earthquake Eng* 30,981-989.
- Bard, P. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées et Observatoire de Grenoble, LGIT/RIGM. France.
- Brammerini, F., Castenetto, S. y Naso, G. (2015). Guidelines for seismic microzonation. Civil Protection Department., Italy.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2006). Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. México.
- Crespo-González, N. (2020). Estimación del comportamiento dinámico del mobiliario estructural y suelo dentro del IPN (Zacatenco) y su relación con el temblor del 19 de septiembre del 2017 (Mw. 7.1). Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad, Zacatenco, IPN. CDMX.
- Díaz-Rodríguez, J. A. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México.
- Esteva, L. (1977). Microzoning: models and reality. In *World Conference on Earthquake Engineering*. 6th, New Delhi, 1977. Proceedings: pp. 27-43.
- Flores-López y Gonzales Ramírez. (2019), Consideraciones en el uso de los espectros de diseño sísmico obtenidos mediante el programa SASID. XXII Congreso Nacional de Ingeniería sísmica.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF, 2004), “Normas técnicas complementarias para diseño por sismo”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-Bis, 6 de octubre, pp. 55-77.
- Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H., Silos, J. R. (2017). Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico City in September 19, 2017 Puebla-Morelos earthquake. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.
- Havskov, J. (1982). The earthquake swarm of February 1981 in Mexico City, *Geof. Int.* 21, no. 2, 157–175.
- Huerta-Espinoza, O. (2019). Evaluación del efecto de sitio y zonificación sísmica en la alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX.
- Ibs-von Seht, M., Wohlenberg, J., (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol 89, No. 1, pp 250-259.
- Juárez-Camarena M. Auvinet-Guichard G., Méndez-Sánchez E. (2016). Zonificación geotécnica del subsuelo del Valle de México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII (número 3), julio-septiembre 2016: 297-308.
- Jaimes M., Lermo J., García-Soto., (2016). Ground-Motion Prediction Model from Local Earthquakes of the Mexico Basin at the Hill Zone of Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America* (2016) 106 (6): 2532–2544.

- Kawase, H. Mori, Y. and Nagashima F. (2018), Difference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept, *Earth, Planets and Space*, 70, 32p.
- Lermo J, Rodríguez M, Singh SK. (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985—natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data. *Earthquake spectra*, Vol.4 (numero 4) 805-814
- Lermo, J., Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, No. 5, pp. 1574-1594.
- Lermo, J. y F.J., Chávez-García (1994a), Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J. (1994b). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
- Lermo, J., Martínez, J., Angulo, J., Espinosa L.A., (2012) Actualización de las curvas de periodo 0.5 y 1.0 segundo del mapa de periodos dominantes del suelo de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Gobierno Del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Coordinación Técnica, Convenio No. 19628-143-12-II-07, Proyecto interno II #1526, pp 19.
- Lermo J., Santoyo M., Antayhua Y., Chavacán M., (2016). Local Earthquakes of the Mexico Basin in Mexico City:  $\kappa$ , Q, Source Spectra, and Stress Drop. *Bulletin of the Seismological Society of America* (2016) 106 (4): 1423–1437.
- Lermo, J., Sánchez-Sesma, F. J., García Benítez, S. R., Ramos-Pérez, E., Álvarez-Monroy, I., Machado-González, O. R., y Luna-Cruz, J. I. (2019). Actualización de la zonificación sísmica y geotécnica de la Ciudad de México y áreas aledañas. Informe Técnico. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- López-Maldonado, D. E. (2020). Evaluación del efecto de sitio y zonificación sísmica en la Alcaldía Álvaro Obregón. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.
- Machado-González, O., Ramos, E., Álvarez, I., Zúñiga, A., Luna, J. (2019). Modelo geosísmico generado a partir de técnicas de sísmica pasiva (HVNR y Vs) para el análisis de grietas en un tramo de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, CDMX. *Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, SMIS 2019*. Monterrey, México.
- Marsal, R.J. y Mazari, M. (2016). The Subsoil of México City. Reedición realizada por el Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Martínez-González, J. A. (2011). Evaluación de las grietas de la Cuenca de México originadas por la morfología de la roca basal usando mediciones de microtremores. Tesis de Licenciatura para obtener el grado de Ingeniero Geofísico.
- Martínez-González, J. A. (2015). Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de Microtremores para fines de mapas sísmicos de intensidad. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Mooser, F. (2018). Geología del Valle de México y otras regiones del país. Volumen I. CICM, Ciudad de México.
- Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute* 30, 25-30.
- Nogoshi, M. y Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), *Journal Seismological Society Japan*, 24, 26-40 (en japonés con resumen en Inglés).
- NTC-DS. (2017). Normas técnicas complementarias para el diseño por sismo. Gaceta Oficial, Departamento del Distrito Federal, 2017.
- Parolai, S., Bormann, P., Milkereit, C. (2002). New relationships between Vs thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 6, pp. 2521-2527.
- Pérez-Cruz, G.A. (1988) Estudio sísmológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México: México, D.F. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría.

- Rosenblueth, E., García-Acosta, V., Rojas-Rabiela, T., de la Peña-Núñez, F. J., Orozco-Castellanos, J. (1992). *Macrosismos: aspectos físicos, sociales, económicos y políticos*. México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
- SACMEX. (2016). *Estudio técnico geofísico sobre la avenida nueva Xochimilco-Tulyehualco, entre las calles Desiderio Peña y San Jerónimo en el pueblo de Santa María Nativitas, Delegación Xochimilco, México, D.F. Reporte técnico*.
- Sánchez-Sesma, F.J., Rodríguez M., Iturraran-Viveros, U., Luzon, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, Suarez, M., Santoyo, M.A., and Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory from microtemor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International* 186, 221-225.
- Santoyo-Villa, E., Ovando-Shelley, E., Mooser F., León-Plata, E. (2005). *Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México, DF, TGC Geotecnia*, 171 p.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2014). *Atlas de Riesgos Naturales, Delegación Iztapalapa, Distrito Federal*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2015a). *Atlas de Riesgos y/o Peligros de la Delegación Coyoacán, Ciudad de México*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2015b). *Atlas de Riesgos y/o Peligros de la Delegación Xochimilco, Ciudad de México*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2016). *Atlas de Riesgos Naturales, Delegación Iztacalco, Ciudad de México*.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2018). *Atlas de Riesgos Naturales, Alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC). (2014a). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México. Actualización de los Mapas de Riesgo. Álvaro Obregón*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC). (2014b). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Azcapotzalco*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014c). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Cuajimalpa de Morelos*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014d). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Gustavo A. Madero*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014e). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Iztapalapa*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014f). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, La Magdalena Contreras*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014g). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Milpa Alta*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014h). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Tláhuac*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014i). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Tlalpan*.
- Secretaría de Protección Civil (SPC) (2014j). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México, Actualización del Mapa de Riesgo, Venustiano Carranza*.
- SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. European Research Project*.
- Singh, S. K., J. G. Anderson and M. Rodríguez (1998). Triggered seismicity in the Valley of Mexico from major Mexican earthquakes, *Geofis. Int.* 37 no. 1, 1-11.
- Singh, S.K., Quintanar, L., Arroyo, D., Cruz-Atienza, V.M. Espindola, V.H, Bello-Segura, D.I., Ordaz, M. (2020). *Lessons from a Small Local Earthquake (Mw 3.2) which produced the highest acceleration ever recorded in Mexico City. Seismological Research Letters*.
- Támez, E., Santoyo, E., Mooser, F., Gutiérrez C. (1987). *Manual de diseño geotécnico. Volumen I*.
- Thabet, M. (2019). *Site-specific relationships between bedrock depth and HVSR fundamental resonance frequency using KiK-NET data from Japan. Pure and applied geophysics*.

- Vásquez-Serrano A., Camacho-Rangel R, Arce-Saldaña J.L. y Morales-Casique E. (2019). Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C Ciudad de México y su relación con fallas mayores. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 36., Num. 1, p.38-53.

## 10. Anexo C. Información de periodos dominantes por alcaldía.

Punto	Latitud	Longitud	Periodo [s]	Amplitud [veces]	Espesor del suelo [m]
CU01	19.43547	-99.16707	1.3	8.3	27.8
CU02	19.43509	-99.16472	1.1	6.1	25.1
CU03	19.43468	-99.16210	1.2	3.1	26.4
CU04	19.43467	-99.15898	1.4	3.3	31.9
CU05	19.43854	-99.16611	1.2	8.7	26.4
CU06	19.44112	-99.16543	1.1	6.9	22.9
CU07	19.44406	-99.16468	1.1	6.8	24.0
CU08	19.43613	-99.17205	1.1	8.2	22.9
CU09	19.43635	-99.17530	1.1	16.3	22.9
CU10	19.43719	-99.17956	0.8	2.4	16.3
CU11	19.43301	-99.16881	0.1	3.3	2.7
CU12	19.43063	-99.17036	1.2	8.6	26.4
CU13	19.42860	-99.17170	1.0	6.0	21.7
CU18	19.43377	-99.16986	1.1	11.6	25.1
CU19	19.43222	-99.17022	1.1	9.1	25.1
CU20	19.43296	-99.17147	1.0	2.3	20.6
CU21	19.43115	-99.16813	1.1	6.2	24.0
CU22	19.43234	-99.16721	1.1	4.9	22.9
PO01	19.51290	-99.13439	1.2	3.9	27.0
PO02	19.50986	-99.13880	1.2	8.2	27.0
PO03	19.50784	-99.14426	0.9	5.7	18.4
PO04	19.51480	-99.15381	1.0	4.2	21.3
PO06	19.50565	-99.14928	0.9	4.9	19.3
PO07	19.49345	-99.14707	0.9	6.1	19.3
PO08	19.49228	-99.14005	1.0	5.4	21.7
PO09	19.49190	-99.13309	1.0	3.7	21.7
PO10	19.49468	-99.15814	1.1	7.5	23.4
PO11	19.50137	-99.13130	1.1	5.9	24.2
PO12	19.50544	-99.12611	1.1	7.0	23.4
PO13	19.49886	-99.12448	1.3	5.8	28.5
PO14	19.49519	-99.12858	1.9	4.6	42.0
PO15	19.48910	-99.12829	0.7	9.7	15.9
PO16	19.50124	-99.11742	0.8	9.9	16.7
PO17	19.49188	-99.11944	1.0	11.1	21.3
PO18	19.48649	-99.12344	1.1	5.5	24.2
PO19	19.48143	-99.12913	1.6	7.6	34.5
PO20	19.48475	-99.13331	0.7	1.1	14.4
PO21	19.49903	-99.12629	0.8	3.2	16.7
PO22	19.47356	-99.15639	0.8	7.7	16.3
PO23	19.47264	-99.14594	1.2	8.1	26.4
PO24	19.47221	-99.13701	1.6	5.0	34.5

Punto	Latitud	Longitud	Periodo [s]	Amplitud [veces]	Espesor del suelo [m]
PO26	19.46244	-99.13863	1.5	9.8	32.0
PO27	19.46095	-99.12763	1.5	4.3	33.5
PO28	19.46715	-99.12564	1.6	10.7	34.5
PO29	19.47342	-99.12163	1.0	1.7	21.7
PO30	19.48278	-99.11246	1.5	10.8	32.9
PO31	19.45473	-99.11888	2.3	17.4	51.0
PO32	19.46230	-99.11232	2.2	10.4	48.7
PO33	19.46873	-99.10892	1.1	2.6	24.2
PO34	19.47690	-99.10717	0.8	1.2	17.5
PO36	19.47932	-99.09876	1.4	2.7	30.6
PO38	19.48827	-99.09401	1.4	8.9	31.5
PO39	19.49381	-99.09095	1.8	11.5	40.4
PO40	19.50200	-99.08766	1.8	5.6	40.4
PO41	19.50715	-99.08656	1.4	5.7	30.1
PO42	19.50646	-99.09244	1.3	4.2	28.5
PO43	19.50161	-99.09430	1.0	5.9	22.4
PO44	19.49339	-99.09974	0.7	7.4	14.4
PO45	19.51275	-99.09813	0.7	4.6	15.9
NO01	19.42926	-99.21140	1.4	4.6	31.9
NO03	19.44282	-99.19232	0.5	8.2	10.6
NO04	19.45201	-99.18491	0.8	5.3	16.3
NO05	19.46183	-99.17646	0.7	3.3	14.8
NO06	19.46220	-99.18296	0.8	11.3	17.1
NO07	19.45651	-99.19650	0.3	2.8	6.3
NO09	19.44473	-99.21733	0.1	2.1	2.8
NO15	19.47304	-99.21219	0.8	2.5	16.7
NO16	19.47506	-99.20607	0.8	3.3	17.5
NO17	19.47826	-99.19922	0.7	5.0	15.2
NO18	19.48036	-99.21023	1.0	2.9	22.4
NO19	19.48110	-99.21933	0.8	3.7	17.5
NO27	19.49725	-99.21331	0.9	3.5	19.3
NO28	19.49398	-99.20274	0.7	10.1	15.2
NO29	19.48895	-99.19507	0.8	5.0	17.5
NO30	19.50657	-99.19075	0.6	6.7	12.5
NO31	19.51393	-99.20668	0.6	3.8	11.9
NO32	19.50167	-99.17584	1.3	6.7	28.5
NO33	19.48095	-99.16474	0.6	7.4	13.2
NO34	19.50167	-99.17584	0.8	4.9	16.7
CL01	19.43389	-99.16690	1.0	2.3	21.7
NCL1	19.43252	-99.15977	1.2	2.8	26.0
NCL2	19.43242	-99.15912	1.4	2.7	31.5

Punto	Latitud	Longitud	Periodo [s]	Amplitud [veces]	Espesor del suelo [m]
NCL3	19.43349	-99.15859	1.6	5.3	36.3
DC01	19.42620	-99.17967	1.4	4.3	30.1
DC04	19.42584	-99.17938	1.1	4.8	23.4
DC05	19.42765	-99.17980	1.0	4.1	22.4
DC07	19.42512	-99.17883	1.4	3.7	31.5
CL05	19.49499	-99.14817	1.4	7.0	30.1
CL06	19.49464	-99.15154	1.0	5.4	22.4
CL08	19.49691	-99.14979	0.8	5.0	17.5
CL09	19.49896	-99.14912	0.9	7.7	19.3