



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Relación entre el periodo
dominante y el espesor del suelo
para la Ciudad de México y
zonas aledañas**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Erick Ramos Pérez

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Javier Francisco Lermo
Samaniego



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mis padres, Cándida y Marcelino, por todo el esfuerzo que realizaron para brindarme una educación universitaria, les estaré siempre agradecido.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, que desde la preparatoria y hasta la universidad me brindó la oportunidad de estudiar y aprender en sus aulas.

A la Facultad de Ingeniería, que me permitió descubrir los aspectos fascinantes de la ingeniería, y a los profesores, que me brindaron el conocimiento necesario y despertaron en mí la curiosidad para apasionarme por mi carrera.

En especial, quiero agradecerle al maestro Javier Lermo que, desde que me aceptó como su estudiante, me ha brindado todo el apoyo necesario para cumplir mis metas. Gracias por compartir conmigo su conocimiento y por su paciencia. También me permito agradecer a sus becarios y colaboradores que han participado en todos los proyectos que permitieron la elaboración de esta tesis.

Quiero agradecer también a los sinodales que amablemente revisaron mi tesis y realizaron las correcciones necesarias. Gracias al Dr. José Francisco Sánchez Sesma, al Dr. Josué Tago Pacheco, al Dr. Maro Rodríguez Rodríguez y al Dr. Efraín Ovando Shelley.

Por último, quiero agradecer a los amigos que estuvieron presentes en los momentos de alegría y diversión mientras transcurrían mis años universitarios. A Iván, Rodrigo, Omar, Juan, Fernando, Emilio, Francisco, Mario y Juan Carlos toda mi gratitud.

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Justificación	3
1.2.	Objetivo general y específicos	3
2.	Caracterización de la zona de estudio.....	4
2.1.	Ubicación y morfología	4
2.2.	Geología y tectónica	6
2.3.	Zonificación geotécnica	9
2.4.	Zonificación sísmica	14
3.	Marco teórico.....	18
3.1.	Evaluación del efecto de sitio	18
3.2.	Cociente espectral SSR y SSRn.....	19
3.3.	Cociente espectral HVNR.....	20
3.4.	Relación entre el periodo dominante y el espesor del suelo	21
4.	Datos e información.....	24
4.1.	Base de datos del periodo dominante	24
4.2.	Nuevas mediciones de ruido sísmico.....	25
4.3.	Información del espesor del suelo.....	28
5.	Procesamiento del ruido sísmico	32
6.	Resultados.....	34
6.1.	Cocientes espectrales HVNR.....	34
6.2.	Mapa de periodo dominante	37
6.3.	Relaciones entre el periodo y el espesor	39
6.4.	Mapa de espesor del suelo	40
7.	Discusión	42
8.	Conclusiones.....	49
9.	Bibliografía.....	50
	Anexo A. Bibliografía de los valores de espesor del suelo	54

Índice de Figuras

Figura 2.1. Cuenca del Valle de México (CVM) y ubicación de la zona de estudio. La ubicación de los antiguos lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco se muestran como referencia.	4
Figura 2.2. Morfología de la Ciudad de México y zonas aledañas.	6
Figura 2.3. Mapa geológico de parte de la Cuenca del Valle de México (Modificado de Arce et al., 2019).	8
Figura 2.4. Perfil geotécnico en dirección W-E, que va de la Sierra de las Cruces a la zona lacustre de Texcoco. Se aprecian claramente las zonas de Lomas, Transición y Lago (Modificado de Mayoral et al., 2019a).	10
Figura 2.5. 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).	12
Figura 2.6. Mapa de espesor de los suelos lacustres realizado con información de 544 sondeos geotécnicos mediante análisis geoestadístico. Las curvas de igual espesor se muestran cada 10 m (Juárez-Camarena et al., 2016).	13
Figura 2.7. Mapa de periodos dominantes del suelo publicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a).	15
Figura 2.8. Zonificación sísmica de la Ciudad de México y zonas aledañas de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a).	16
Figura 2.9. Mapa de periodos dominantes del suelo de la CMZA. (Martínez-González et al., 2015).	17
Figura 3.1. Movimiento del suelo en la superficie debido a los efectos de la fuente, la trayectoria y el sitio (Modificado de Kramer, 1996).	18
Figura 4.1. Instalación típica del sismógrafo Guralp CMG-6TD para la medición de ruido sísmico. Los componentes necesarios para un buen funcionamiento son el sensor, una batería para suministrar energía, el GPS para que el tiempo sea el correcto y los cables para las conexiones entre todos estos componentes.	26
Figura 4.2. Información de periodo dominante en la Ciudad de México y zonas aledañas con información de ruido sísmico y movimientos fuertes. La línea de color negro que limita las sierras con la zona de lago es la curva de 0.1 s.	27
Figura 4.3. Perfil geológico en dirección W-E del trazo de la línea 12 del metro de la Ciudad de México. Parte superior) Trazo desde la Sierra de las cruces hasta el Cerro de la Estrella. Parte inferior) Trazo desde el Cerro de la Estrella hasta la isla de Tláhuac. (Modificado de Mooser, 2018).	29
Figura 4.4. Parte superior) Perfil geotécnico en dirección N-S del NAICM (CFE, 2017). c) Perfil geológico en dirección N-S de la subcuenca de Chalco realizado con información de pozos de agua (Chouteau et al., 1994).	30
Figura 4.5. Información del espesor del suelo en la Ciudad de México y zonas aledañas. Se muestran los datos de sondeos geotécnicos, pozos profundos y estudios geofísicos.	31
Figura 5.1. Diagrama del procesamiento de ruido sísmico con el programa Geopsy para obtener el cociente espectral HVNR (Modificado de SESAME, 2004).	33
Figura 6.1. Familias de cocientes espectrales HVNR. a) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.2-0.3 Hz. b) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.3-0.4 Hz. c) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.4-0.5 Hz. d) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.5-0.6 Hz. Las líneas de color rojo marcan los límites en donde se ubica la frecuencia dominante.	35
Figura 6.2. Familias de cocientes espectrales HVNR. a) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.6-0.7 Hz. b) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.7-0.8 Hz. c) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.8-0.9 Hz. d) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.9-1.0 Hz. Las líneas de color rojo marcan los límites en donde se ubica la frecuencia dominante.	36
Figura 6.3. Familias de cocientes espectrales HVNR. Izquierda) Familia de cocientes entre 1.0 y 2.0 Hz, considerada como zona de Transición. Derecha) Familia de cocientes entre 2.0 y 10.0 Hz, considerada generalmente como zona de Lomas. Las líneas en rojo marcan los límites del rango de frecuencias.	37

Figura 6.4. Mapa de periodos dominantes del suelo actualizado para la Ciudad de México y zonas aledañas. Las curvas de periodo se muestran cada 0.5 s.	38
Figura 6.5. Relación potencial entre los periodos dominantes del suelo (T_s) y el espesor del suelo (H_s) para la CMZA. Se muestran también las relaciones de Aguilar et al. (2003) y Avilés et al. (2010).....	40
Figura 6.6. Mapa de espesor del suelo para la Ciudad de México y áreas aledañas. Las curvas de espesor se muestran cada 20 m.....	41
Figura 7.1. Estructuras total o parcialmente colapsadas debido al sismo del 19 de septiembre de 1985 $M_w8.1$ (puntos verdes) y estructuras con riesgo alto y colapsadas debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 $M_w7.1$ (puntos morados) sobre el mapa de periodos dominantes para la Ciudad de México y zonas aledañas. En color naranja se muestran las grietas en la Ciudad de México. (Meli et al., 1986; CICM et al., 2017; Mayoral et al., 2019a).	44
Figura 7.2. Estructuras total o parcialmente colapsadas por el sismo del 19 de septiembre de 1895 $M_w8.1$ de acuerdo con el periodo dominante (izquierda) y el espesor del suelo (derecha) (Meli et al., 1986).	45
Figura 7.3. Estructuras con riesgo alto (color naranja) y estructuras colapsadas (color naranja oscuro) debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 $M_w7.1$ de acuerdo con el periodo dominante (izquierda) y al espesor del suelo (derecha) (CICM et al., 2017; Mayoral et al., 2019a).	45
Figura 7.4. Distribución de los daños para el sismo de 1985 (izquierda) y 2017 (derecha) de acuerdo con el periodo dominante del suelo (Modificado de Singh et al., 2018).	46
Figura 7.5. Efecto de “doble resonancia” durante los sismos del 19 de septiembre de 1985 (izquierda) y de 2017 (derecha). Se aprecian los espectros de respuesta en roca (estación CU para ambos sismos) y en la superficie (estación SCT para el sismo de 1985 y estación CI05 para el sismo de 2017) (Modificado de Mayoral et al., 2019).	47
Figura 7.6. Distribución de todas las estructuras dañadas en la Ciudad de México (izquierda) y los colapsos parciales o totales (derecha) según el periodo dominante del suelo (Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo,2019).	48
Figura 7.7. Estructuras colapsadas en la Ciudad de México según la relación periodo elástico de la estructura (T_e) y periodo dominante del suelo (T_s) de acuerdo con Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo (2019).	48

Resumen

Los devastadores efectos del terremoto del 19 de septiembre de 2017 M_w 7.1 no están completamente esclarecidos. Por ello, parece conveniente realizar una nueva revisión del Reglamento de Construcciones y de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México que contemple, entre otros aspectos técnicos, la actualización de los mapas de periodo dominante y espesor del suelo para la Ciudad de México y zonas aledañas (CMZA). El objetivo de este trabajo fue la actualización del mapa de periodos dominantes (T_s), la estimación del mapa de espesor del suelo (H_s) y la relación entre estos dos parámetros.

El mapa de periodo dominante se actualizó con un total de 2464 valores de periodo dominante obtenidos mediante mediciones de ruido sísmico y el análisis de los cocientes espectrales HVNR. Los cambios principales se registraron en las alcaldías de Tláhuac, Xochimilco, Iztapalapa y Coyoacán, además de la parte noreste de la CMZA, en la zona de Texcoco. Se registraron periodos mayores a los 5.0 s en la parte central de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, con periodos de hasta 5.9 s en este último. En la zona del derrame basáltico del Xitle se registraron periodos de hasta 2.0 s, por lo que se considera como una “zona especial”.

A partir de una extensa revisión bibliográfica, se obtuvo información del espesor del suelo en 285 sitios dentro de la CMZA. Esta información se relacionó con el periodo dominante, el cual se interpoló del mapa actualizado en los 285 sitios. El resultado fue la siguiente relación $H_s = 21.72 * T_s^{1.04}$, que se asemeja al valor teórico para un estrato con espesor sobre un semiespacio ($H_s = 0.25 * \beta * T_s$, donde β es la velocidad de ondas de corte y que, comparando las dos ecuaciones, tiene un valor de 86.88 m/s para periodos moderados). En esta relación se consideran periodos a partir de 0.1 s, que difiere de las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010) que consideran periodos a partir de los 0.5 s en donde el espesor nominal es cero. En el rango de 0.6 a 2.0 s, las tres relaciones muestran valores de espesor similares, que van de los 10 hasta los 40 m aproximadamente. A partir de los 2.0 s, las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010) subestiman el espesor del suelo.

El mapa de espesor del suelo se realizó a partir de los 2464 valores de periodo dominante y la relación potencial definida. Los espesores más grandes se ubicaron en las partes centrales de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, alcanzando valores de hasta 140 m en este último. El cambio de espesor es abrupto en la subcuenca de Xochimilco-Chalco y más suave en los límites de la Sierra de Las Cruces. Los valores de espesor difieren de los publicados en la NTCDs y por Juárez-Camarena *et al.* (2016), especialmente al sur de la CMZA, en donde ambos estudios subestiman los espesores de acuerdo con la bibliografía. En la zona del derrame basáltico del Xitle, el espesor no concuerda con los datos observados debido al valor de periodo dominante registrado, por lo que es necesario estudiar esta área de manera detallada.

Finalmente, de acuerdo con la distribución de las estructuras colapsadas, debido a los sismos de 1985 y 2017, en los mapas de periodo dominante y el espesor del suelo, se tiene que: para el sismo de subducción del 19 de septiembre de 1985 M_w 8.1 las estructuras colapsadas se ubicaron en T_s de 1.5 a 2.4 s y H_s de 30 a 50 m; mientras que para el sismo intraplaca del 19 de septiembre de 2017 M_w 7.1, en un rango de 1.0 a 1.5 s y 20 a 35 m, respectivamente. El efecto de sitio fue relevante en ambos sismos, aunque otros factores contribuyeron de forma importante al colapso de las construcciones como el mal diseño o el daño sísmico acumulado, entre otros.

Abstract

The September 19, 2017 M_w 7.1 earthquake devastating effect are not completely clarified. Hence, it seems convenient to carry out a new review of the Mexico City Building Code and Complementary Technical Norms for Seismic Design that must contemplate, among other technical aspects, the updating of dominant period and soil thickness maps for Mexico City and nearby areas (CMZA, by its initials in Spanish). The aim of this study was the updating of dominant period map (T_s), the estimation of soil thickness map (H_s) and the relation of both parameters.

The dominant period map was updated with a total of 2464 dominant period values obtained through seismic noise measurements and the analysis of HVNR spectral ratios. The major changes were recorded at Tláhuac, Xochimilco, Iztapalapa and Coyoacán, also in the northeast part of the CMZA, in the Texcoco area. Periods greater than 5.0 s were registered in the central part of Texcoco, Xochimilco and Chalco ancient lakes, with periods of up to 5.9 s in the latter. In the basaltic flows from Xitle volcano periods of up to 2.0 s were registered, therefore it is considered as a “special area”.

From an extensive bibliographic review, information of soil thickness was obtained in 285 sites inside CMZA. This information was related with the dominant period, taken from the updated map at the 285 sites. The result was the following site-specific relationship $H_s = 21.72 * T_s^{1.04}$, that approximates the theoretical value for a soft sedimentary layer over a half-space ($H_s = 0.25 * \beta * T_s$, where β is the shear-wave velocity and, comparing both equations, it has a value of 86.88 m/s for moderate periods). In this relation, periods up to 0.1 s are considered, that differs from Aguilar *et al.* (2003) and Avilés *et al.* (2010) relations, which both consider periods up to 0.5 s where the nominal thickness is zero. In the range of 0.6 to 2.0 s, the three relations show similar soil thickness, ranging from 10 to 40 m approximately. From 2.0 s, Aguilar *et al.* (2003) and Avilés *et al.* (2010) relations underestimate soil thickness.

The soft-soil thickness map was made from 2464 dominant period data and the site-specific relationship found. The greater thicknesses are in the central part of Texcoco, Xochimilco and Chalco ancient lakes, with values up to 140 m in the latter. The change in thickness is abrupt in the Xochimilco-Chalco sub-basin, and smoother at the edges of Sierra de Las Cruces. The thickness values differ from NTCDS and Juárez-Camarena *et al.* (2016), especially in the south of CMZA, where both studies underestimate thickness according to the literature. In the basaltic flows from Xitle volcano, thickness does not agree with the observed data due to the dominant period value recorded, therefore it is necessary to study this area in detail.

Finally, according to collapse building distribution due to 1985 and 2017 earthquakes, in the dominant period and soil thickness maps, the conclusion is: for the September 19, 1985 M_w 8.1 subduction earthquake collapse buildings were in T_s of 1.5 to 2.4 s, and H_s of 30 to 50 m, whereas for the September 19, 2017 M_w 7.1 intraplate earthquake in a range of 1.0 to 1.5 s and 20 to 35 m, respectively. Site effect was relevant in both earthquakes, although other factors contributed considerably to the building collapse such as poor design or the cumulative damage, among others.

1. Introducción

La Ciudad de México y el área metropolitana se ubican en la parte central del altiplano mexicano, en la denominada “Cuenca del Valle de México (CVM)”. Esta cuenca está rodeada de sierras y volcanes, y en el interior se formó una zona lacustre de gran extensión, en la cual hubo asentamientos humanos prehistóricos y en el sur de esta floreció Cuicuilco hace unos dos mil años. Después de la erupción del Xitle, en la época prehispánica florecieron numerosos asentamientos en las orillas de los lagos y, principalmente, en un islote dentro del lago de Texcoco en donde los aztecas fundaron la ciudad de “México-Tenochtitlan”. Después de la conquista, en la época colonial, la población se dispersó hacia la zona de lagos, por lo que fue necesario desecarlos para incrementar los terrenos disponibles para la construcción, además de evitar las graves inundaciones de las que fue víctima la ciudad por mucho tiempo. Por lo tanto, se realizaron grandes obras de ingeniería para expulsar el agua de los lagos hacia el norte de la CVM, como el denominado Tajo de Nochistongo que forma parte del sistema de drenaje. El resultado fue el crecimiento de la ciudad hacia los antiguos lagos, ocupando terrenos formados principalmente por depósitos arcillosos de gran espesor, además del incremento de la población que actualmente es de alrededor de 25 millones en la Ciudad de México y la zona conurbada.

Este crecimiento extraordinario ha ocasionado enormes problemas en el suelo arcilloso de la CVM. A principios del siglo XX se incrementó la perforación de pozos para extraer 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. Posteriormente, Nabor Carrillo demuestra que la causa principal del hundimiento es el abatimiento de las presiones piezométricas provocado por 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 (Marsal y Mazari, 2016).

En este contexto, la Ciudad de México es vulnerable ante sismos de gran magnitud ya que México es un país con gran actividad sísmica, debido a su ubicación en el marco de cinco placas tectónicas (Caribe, Pacífico, Norteamericana, de Rivera y Cocos). Los sismos que han causado daños históricamente a la ciudad, además de pérdidas humanas y económicas se pueden dividir en cuatro tipos: de subducción, de profundidad intermedia, intraplaca y locales (Rosenblueth *et al.*, 1989). Debido al suelo lacustre en donde se estableció la ciudad, aumenta la probabilidad de que las construcciones sufran daños severos por la acción de los terremotos, pues tanto la amplitud del movimiento sísmico como su duración se amplifican de manera considerable. Este fenómeno se denomina “efecto de sitio” y es de vital importancia entenderlo para evaluar el peligro sísmico y mitigar el riesgo sísmico asociado a las construcciones.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) publicado en 1942, después del terremoto del 15 de abril de 1941, fue el primero que estableció disposiciones para el diseño sísmico de las estructuras. En los reglamentos publicados posteriormente, en los años 1957, 1966 y particularmente en el de 1976, se avanzó en los métodos generales de análisis y en la zonificación de la ciudad en función del tipo de suelo, pero prevaleció la idea de que no había que diseñar para desplazamientos mayores a los provocados por el sismo del 28 de julio de 1957, incluso hubo quienes consideraron que el reglamento de 1976 era muy conservador (Rosenblueth, 1979; 1992).

El gran sismo del 19 de septiembre de 1985 M_w 8.1 y sus réplicas, cambiaron drásticamente la forma en que se concibe el riesgo sísmico en la Ciudad de México. El terremoto se originó en la zona de subducción mexicana y tuvo una longitud de ruptura de 200 km convirtiéndose en una enorme fuente de energía, cuyos efectos especiales en la zona de ruptura (Anderson *et al.*, 1986) y una eficiencia excepcional en la propagación hasta el Valle de México, se conjuntaron para hacer que las ondas sísmicas incidentes tuviesen un contenido excepcionalmente alto de energía en un intervalo de periodos [1.0-3.0 s] que abarca precisamente aquellos que más amplifican las formaciones arcillosas del valle (Campillo *et al.*, 1989). A su vez, las construcciones vulnerables en este intervalo de periodos (asociadas a edificios de 7 a 15 pisos, típicamente con periodos nominales de 0.7 a 1.5 s), al experimentar grandes oscilaciones sufrieron mayores daños (Rosenblueth *et al.*, 1992). A raíz del sismo, en 1987 se publicaron las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (NTCDS) del RCDF que incluyeron la información recopilada del reciente sismo. Para incluir los efectos de la interacción suelo-estructura en el diseño estructural, las NTCDS incluyeron los mapas de dos parámetros importantes; el periodo dominante del suelo¹ (T_s) y el espesor del suelo² (H_s) (Galvis *et al.*, 2017). Estos parámetros, junto con el periodo fundamental de la estructura (T_e) y la altura efectiva de la estructura (H_e), sirven para estimar si la interacción suelo-estructura debe tomarse en cuenta o es despreciable (GDF, 2004a). Además, la importancia del mapa de periodos dominantes del suelo, para la prevención, radica en el criterio implícito de diseño, que indica que el periodo de las estructuras no debe coincidir con el periodo dominante del suelo, evitando así la “resonancia” suelo-estructura y minimizando los daños de las construcciones.

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 (SSN, 2017). Este evento causó el colapso de 38 estructuras y severos daños en otras, la mayoría edificios menores de 10 pisos (Mayoral *et al.*, 2019b). La mayoría de las afectaciones ocurrieron al poniente de la Ciudad de México, en la denominada zona de transición. Este sismo liberó menos de cuatro por ciento de la energía que se liberó

¹ En este trabajo se utiliza el término “periodo dominante” en lugar de otros utilizados en la literatura como periodo fundamental, periodo de vibración, periodo de resonancia o periodo característico del suelo. También se representa en otros trabajos como T_0 .

² En este trabajo se utiliza el término “espesor del suelo” como sinónimo del término profundidad a los depósitos profundos o al estrato resistente (utilizado en geotecnia) o profundidad de los depósitos firmes profundos (utilizado en las NTCDS).

durante el sismo de 1985, pero fue mucho más cercano a la Ciudad (120 km) y por la profundidad (57 km) la propagación se dio en materiales más competentes. La energía en este sismo fue muy importante entre 0.5 y 10 Hz. (periodos de 0.1 a 2 s).

El reciente sismo del 19 de septiembre de 2017 causó graves daños a la Ciudad de México y su zona conurbada, particularmente en sitios de terreno firme o con periodos bajos como los de las zonas de transición. El sismo produjo importantes aceleraciones horizontales y verticales en altas frecuencias. Parece conveniente hacer una revisión al Reglamento de Construcciones y a las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo de la Ciudad de México. Para las NTCDS, es necesario actualizar tanto los mapas de periodos dominantes como los de espesores equivalentes y contar con modelos adecuados para tomar en cuenta la irregularidad lateral y evaluar de mejor manera los efectos de sitio y la interacción suelo-estructura de la ciudad ante posibles terremotos.

1.1. Justificación

Los datos de periodo dominante y espesor del suelo son importantes, en una primera aproximación, para evaluar la interacción suelo-estructura y conocer si durante un sismo el efecto de sitio es relevante. Por lo tanto, es conveniente que los datos de periodo y espesor se actualicen continuamente para incorporar áreas no estudiadas hasta ahora y establecer el efecto que puede tener el hundimiento de la Ciudad de México en esos valores y consecuentemente en la respuesta sísmica. Además, esta información se publica en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, por lo que su actualización repercute directamente en el mejor diseño de las construcciones de la ciudad.

1.2. Objetivo general y específicos

El objetivo general de este trabajo es observar si existe una relación de la forma funcional de potencia $H_s = a * T_s^b$, propuesta por Thabet (2019), entre el periodo dominante y el espesor del estrato equivalente de suelo para la Ciudad de México y zonas aledañas.

Para examinar la relación entre periodo y espesor del suelo es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Actualizar el mapa de periodos dominantes del suelo, para la Ciudad de México y áreas aledañas, mediante la medición de ruido sísmico y la determinación del periodo por medio del cociente espectral HVNR.
- Ubicar sitios en donde se conoce el espesor del suelo por medio de una revisión bibliográfica extensa que incluye reportes, artículos, tesis, tesinas, libros, etc.
- Relacionar el espesor del suelo de los sitios conocidos con el periodo dominante, por medio del mapa actualizado, y obtener una relación de la forma $H_s = a * T_s^b$ para la Ciudad de México y áreas aledañas.
- Estimar un mapa de espesor del suelo para el área de estudio con ayuda de la relación potencial.

2. Caracterización de la zona de estudio

2.1. Ubicación y morfología

La zona de estudio (Figura 2.1) se ubica en la parte central del territorio mexicano, al suroeste de la denominada Cuenca del Valle de México (CVM). Incluye la mayor parte de la Ciudad de México y algunos de los municipios de la zona conurbada que pertenecen al Estado de México (Naucalpan, Nezahualcóyotl, Chalco, Texcoco, etc.). Por lo tanto, también se denominará en este trabajo a la zona de estudio como “Ciudad de México y zonas aledañas (CMZA)”.

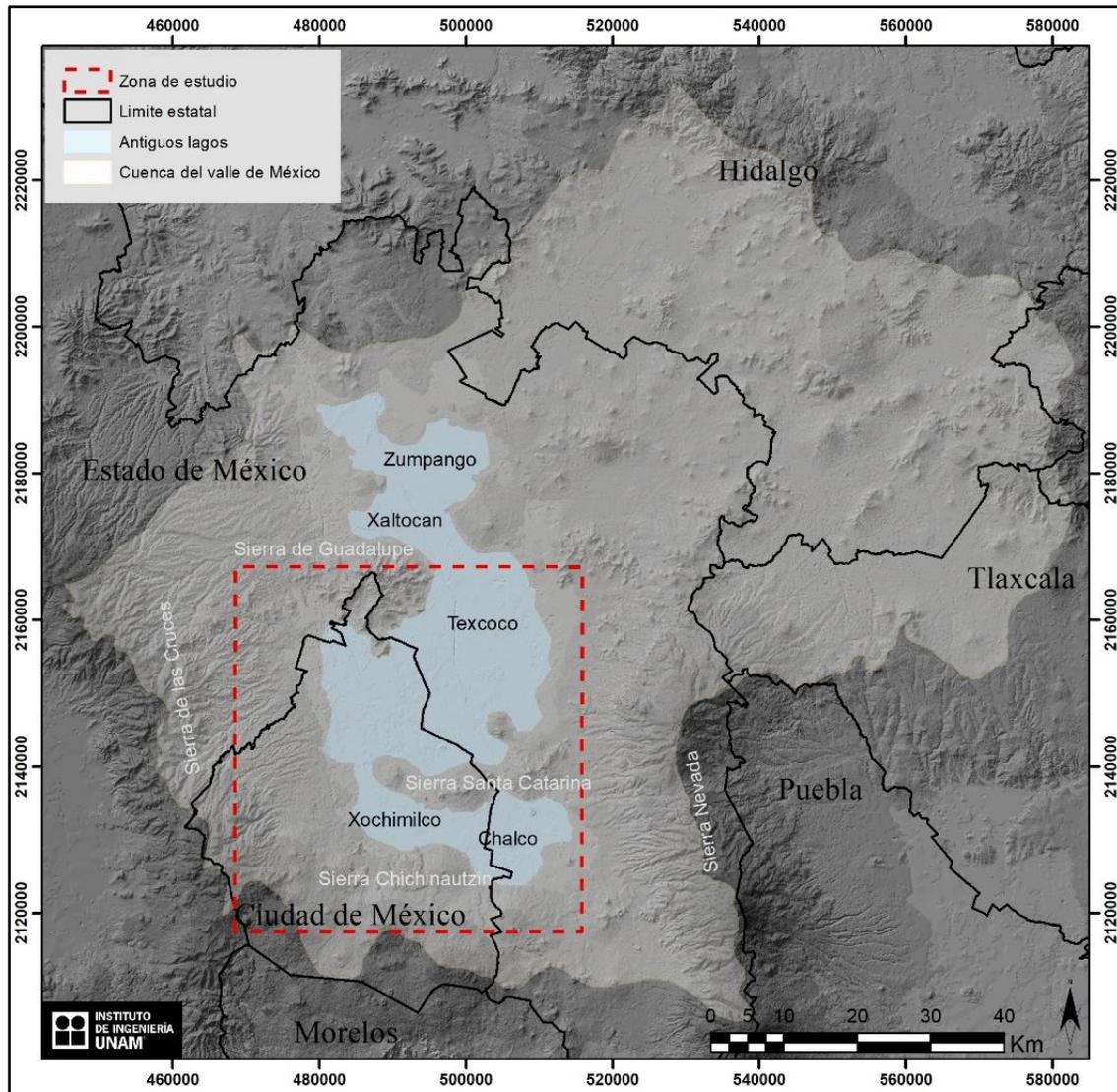


Figura 2.1. Cuenca del Valle de México (CVM) y ubicación de la zona de estudio. La ubicación de los antiguos lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco se muestran como referencia.

La morfología de la CVM está definida por grandes sierras, que le dan el carácter de cuenca endorreica, y una extensa planicie que permitió la formación de cinco grandes lagos (Figura 2.1), y en donde se ubican volcanes y sierras de menores dimensiones. La zona de estudio se puede dividir en dos subcuencas separadas por la sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella: las subcuencas de Texcoco y Xochimilco-Chalco.

Las sierras que rodean la CVM y la limitan son las siguientes. Al norte el límite lo establecen las sierras de Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán (todas estas sierras, a excepción de la sierra de Guadalupe, se ubican fuera de la zona de estudio), también denominado campo volcánico Apan-Tezontepec. Al sur, la sierra de Chichinautzin establece el límite. La sierra Nevada, que incluye a los volcanes Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Telapón y Tláloc, es el límite este de la cuenca (esta sierra tampoco se encuentra dentro de la zona de estudio). Por último, al oeste la cuenca limita con las sierras de Monte Bajo, Monte Alto y Las Cruces (Díaz-Rodríguez, 2006; Arce *et al.*, 2019).

Dentro de la planicie que abarca la zona de estudio destacan otras sierras y volcanes de menor dimensión. En la parte noroeste se ubican la sierra de Coalacuaya, y los cerros Huatepec y Tepetzingo. Al norte se encuentran los cerros Tepeyac, Zacatenco y el Peñón de los Baños. Al oeste el cerro de Chapultepec. Al sureste se encuentra el mayor número de estructuras entre las que se ubican el Peñón del Marqués, el cerro de la Estrella, el cerro Chimalhuacán, el cerro El Pino, el volcán Xico, el cerro Tlapacoya y el cerro Cocotitlán. El elemento que más destaca es la sierra de Santa Catarina, compuesta por varios volcanes que en orden W-E son los siguientes: Yuhualixqui, Xaltepec, Tetecón, Mazatepec, Tecuatzi, Guadalupe y La Caldera (Figura 2.2).

En la extensa planicie de la CVM se vierte el agua de 48 ríos que descienden de las partes elevadas. Esto permitió la formación de cuatro áreas lacustres, de las cuales la más grande estuvo formada por cinco lagos someros: Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltócan y Zumpango. Actualmente, sólo quedan algunos remanentes artificiales en Zumpango, Texcoco, y la zona lacustre de canales y chinampas de Xochimilco-Chalco (Legorreta, 2006). Dentro del área de estudio sólo se encuentran las zonas de los antiguos lagos de Chalco, Xochimilco y Texcoco.

Uno de los más recientes rasgos morfológicos es el derrame basáltico del volcán Xitle, ubicado al suroeste de la CVM en las laderas del volcán Ajusco. Hace aproximadamente 1670 ± 35 años el volcán Xitle hizo erupción produciendo derrames basálticos que cubrieron un área aproximada de 70 km^2 y que descendieron por una distancia de 12 km hasta llegar a las planicies donde cubrieron vastas áreas, hoy ocupadas por colonias urbanas pertenecientes a las alcaldías de Tlalpan, Coyoacán y Álvaro Obregón (Siebe, 2009) (Figura 2.2).

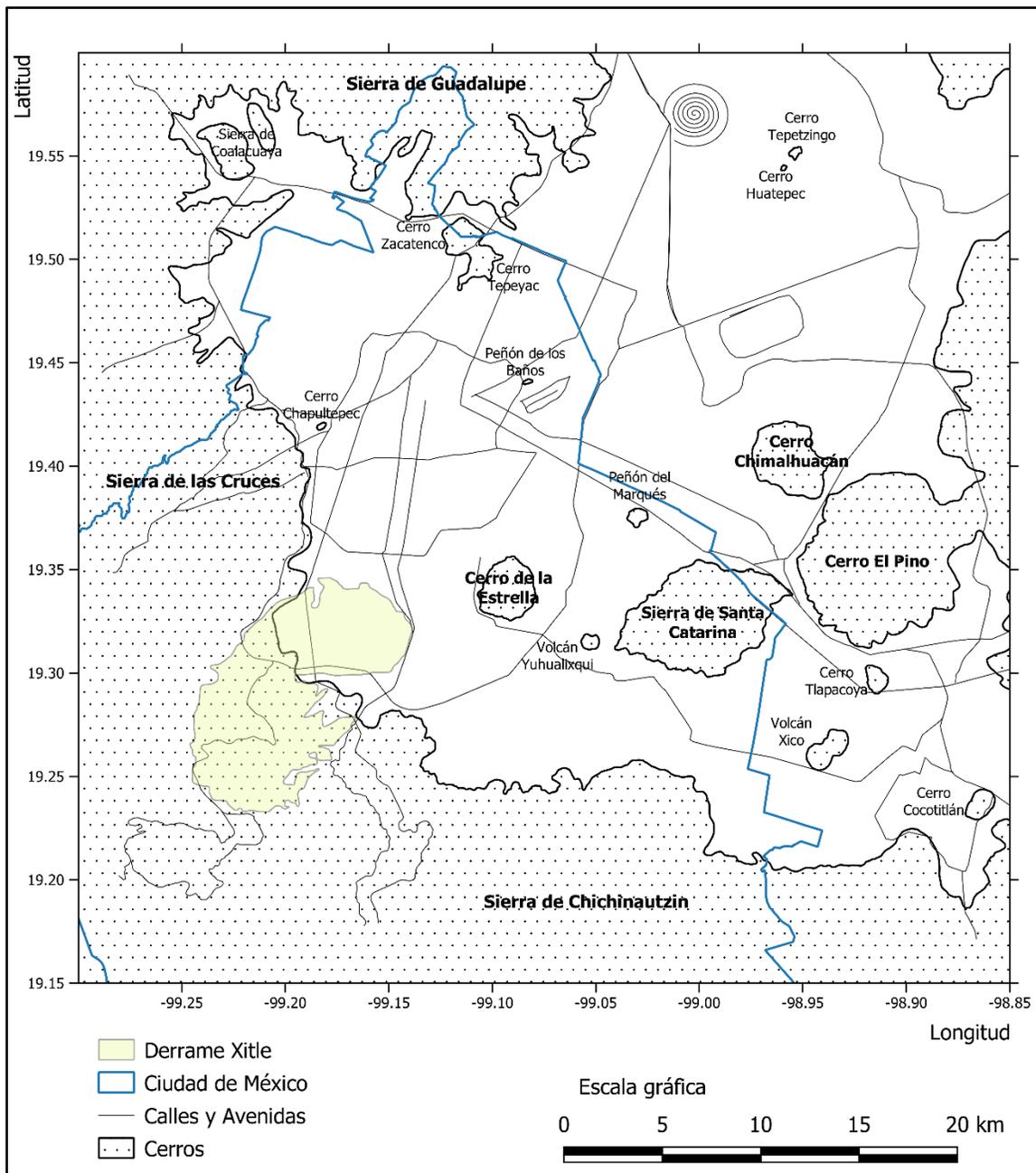


Figura 2.2. Morfología de la Ciudad de México y zonas aledañas.

2.2. Geología y tectónica

El conocimiento de la geología de la CVM ha mejorado en los últimos años debido a nueva información de los pozos profundos perforados en la cuenca e información adicional de datación radiométrica (Arce *et al.*, 2019). Además, se tiene más información de la geología superficial de los sondeos geotécnicos realizados para las grandes obras desarrolladas en la cuenca. Tal es el caso de la Línea 12 del Metro o el Túnel Profundo Dren General del Valle de México (Mooser, 2018).

La base geológica de la CVM está formada por depósitos marinos del Mesozoico superior, a profundidades que oscilan entre los 1500 y 3000 m, además de calizas y lutitas del Cretácico superior intensamente plegadas. Los depósitos del norte de la cuenca se deben a pliegues laramídicos, mientras que los del sur obedecen a anticlinales formados en el Terciario inferior por empujes de la masa Xolapa. Sobre el basamento marino fueron acumulándose, desde la emersión de la masa continental a principios del Terciario hasta la actualidad, productos del vulcanismo que consiste en lavas, tobas, cenizas, brechas, lahares, depósitos fluviales y aluviales, paleosuelos y arcillas lacustres con un espesor total de 1500 a 3000 m (Mooser, 2018).

Arce *et al.* (2019) describen la estratigrafía de la CVM, desde el basamento hasta los depósitos superficiales, y agrupan los depósitos geológicos en varias unidades. A continuación, se describe brevemente la estratigrafía de la CVM.

- 1) *Formación Morelos*. Calizas y Dolomitas del Albiano Cenomaniano con espesor máximo de 900 m. Esta formación se observó en los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 a profundidades de 1500 y 1800m, respectivamente.
- 2) *Formación Mexcala*. Esta formación está dominada por calizas arcillosas, la cual cambia a intercalaciones de lutitas, limolita y arenisca en la parte superior. Tiene un espesor máximo de 1500 m.
- 3) *Grupo Balsas*. Sucesión de depósitos continentales constituida de conglomerados, arenisca, limolita, caliza lacustre y, en cantidades menores depósitos piroclásticos y flujos de lava con 500 m de espesor total.
- 4) *Unidades del Oligoceno (Formación Tilzapotla)*. Secuencia de lavas dacíticas, riodacíticas y riolíticas, e ignimbritas del Oligoceno. Esta formación incluye los campos volcánicos de Taxco, Huautla y Tilzapotla.
- 5) *Vulcanismo del Mioceno (Formación Tepoztlán)*. Secuencia volcánica de composición andesítica con 800 m de espesor máximo que ocurrió en los alrededores de los pueblos de Malinalco, Chalma, Tepoztlán y Tlayacapan.
- 6) *Sierra de Las Cruces*. Provincia volcánica compuesta por los volcanes, de norte a sur, La Catedral, La Bufa, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San miguel, Ajusco, La Corona y Zempoala. Cada estructura produjo flujos de lava y domos que son forman la parte alta, mientras que los depósitos piroclásticos y de avalancha constituyen la parte baja del relieve que rodean a los edificios volcánicos.
- 7) *Chichinautzin*. Provincia volcánica constituida por más de 220 volcanes monogenéticos. Basados en la edad, tipo de estructura y composición química, las estructuras que se encuentran en la cuenca (el Cerro de La Estrella, el Peñón del Marqués, la Sierra de Santa Catarina, Tlapacoya, etc.) se agrupan en esta provincia volcánica. La mayoría de los productos volcánicos son basaltos, andesitas y dacitas.
- 8) *Sierra Nevada*. Provincia volcánica formada por los estratovolcanes, de norte a sur, Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. La composición varía de andesítica a riolítica, para las dos primeras estructuras, y de andesítica a dacítica, para las últimas dos.
- 9) *Depósitos lacustres*. Sedimentos lacustres de hasta 300 m de espesor con tefra volcánica.

De acuerdo con Arce *et al.* (2019), la tectónica de la CVM está dominada por cuatro sistemas principales. El más antiguo es la falla de cabalgamiento del Cañón de Lobos, la cual afectó sólo a las formaciones sedimentarias del Cretácico y ha sido relacionada a la Orogenia Laramide. Esta falla se orienta en dirección N-S buzando hacia el oeste colocando a la Formación Morelos por encima de la Formación Mexcala. La falla normal Mixhuca se identificó con datos sísmicos y se orienta en dirección NW-SE buzando hacia el oeste. Esta falla produce la denominada “Fosa Roma”, la cual es una depresión de 1500 m de relleno de depósitos volcánicos. La falla Mixhuca se interpreta como parte de una estructura en forma de Graben, cuyo límite occidental se puede proyectar hasta la cuenca de Lerma. Este Graben pudo haber controlado la formación de la provincia volcánica de La Sierra de las Cruces. Una serie de fallas normales y dextrales, con orientación NE-SW, pueden estar relacionadas a la mega zona de cizalla Tenochtitlán. Este sistema ha sido descrito en La Sierra de las Cruces como fallas normales mientras que en la región de Apan ocurren como series de bloques limitados por horsts y grabens. La característica tectónica más joven es la serie de fallas normales E-W, documentadas en la provincia volcánica de Chichinautzin y en el Cinturón Volcánico Trans-mexicano. Algunas fallas de este sistema son La Pera, Xochimilco, el graben de Santa Catarina y Tenango. El mapa de la Figura 2.3 muestra la geología superficial y la tectónica de la CVM descrita por Arce *et al.* (2019).

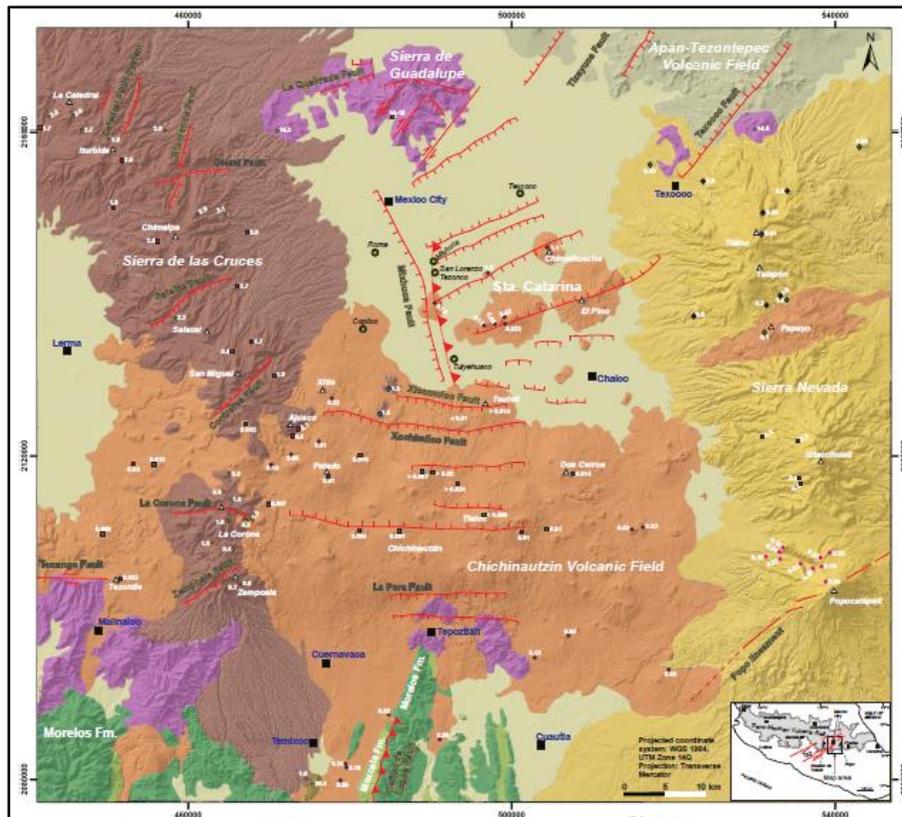


Figura 2.3. Mapa geológico de parte de la Cuenca del Valle de México (Modificado de Arce *et al.*, 2019).

2.3. 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 (Santoyo-Villa *et al.*, 2005).

La zona de Transición forma una franja entre los suelos lacustres y las sierras que rodean a la Ciudad de México y zonas 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) (Figura 2.4).

- *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 subestratos 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.

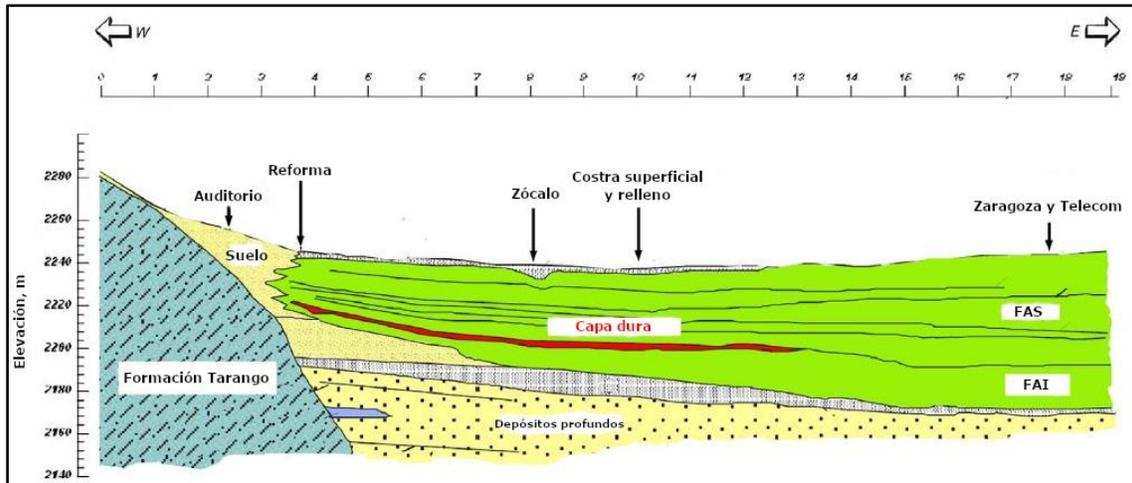


Figura 2.4. Perfil geotécnico en dirección W-E, que va de la Sierra de las Cruces a la zona lacustre de Texcoco. Se aprecian claramente las zonas de Lomas, Transición y Lago (Modificado de Mayoral *et al.*, 2019a).

En el Manual de Diseño Geotécnico del Metro de la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR) se realizó la zonificación geotécnica de la Ciudad de México y zonas aledañas con base en las zonas anteriormente descritas (Támez *et al.*, 1989). La zona de Lago se caracteriza porque en ella las arcillas blandas tienen grandes espesores y, de acuerdo a la localización e historia de cargas se dividió en tres subzonas: Lago Virgen (LV), que tiene las arcillas más blandas; Lago Centro I (LCI), que corresponde al sector no colonial de la ciudad el cual se desarrolló a partir de principios de este siglo; y Lago Centro II (LCII), que está limitada por la antigua traza de la ciudad. La frontera entre la zona de Transición y la de Lago se definió a partir de los sitios en donde aparece la serie arcillosa inferior y en los cuales la primera capa dura está a 20 m de profundidad aproximadamente. La zona de Transición se dividió en tres subzonas: Transición Alta (TA), es la más próxima a las Lomas y presenta irregularidades estratigráficas debido a la presencia de depósitos aluviales cruzados; Transición Baja (TB), colinda con la zona de Lago y en ella la serie arcillosa superior tiene intercalaciones de estratos limoarenosos de origen aluvial, que se depositaron durante las regresiones del antiguo lago; y Transición Abrupta (TA), que es la transición entre la zona de Lago y los cerros aislados como el Peñón de los Baños. Por último, la zona de Lomas se caracteriza por presentar suelos con condiciones irregulares de compactación y cementación las cuales inciden directamente en la estabilidad de las excavaciones (Santoyo-Villa *et al.*, 2005).

La zonificación que aparece en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (GDF, 2004b; GCM, 2016) 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 limoarenosos 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 2.5). 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 geoestadístico 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 2.6. Se observa que las mayores profundidades de los Depósitos Profundos 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.

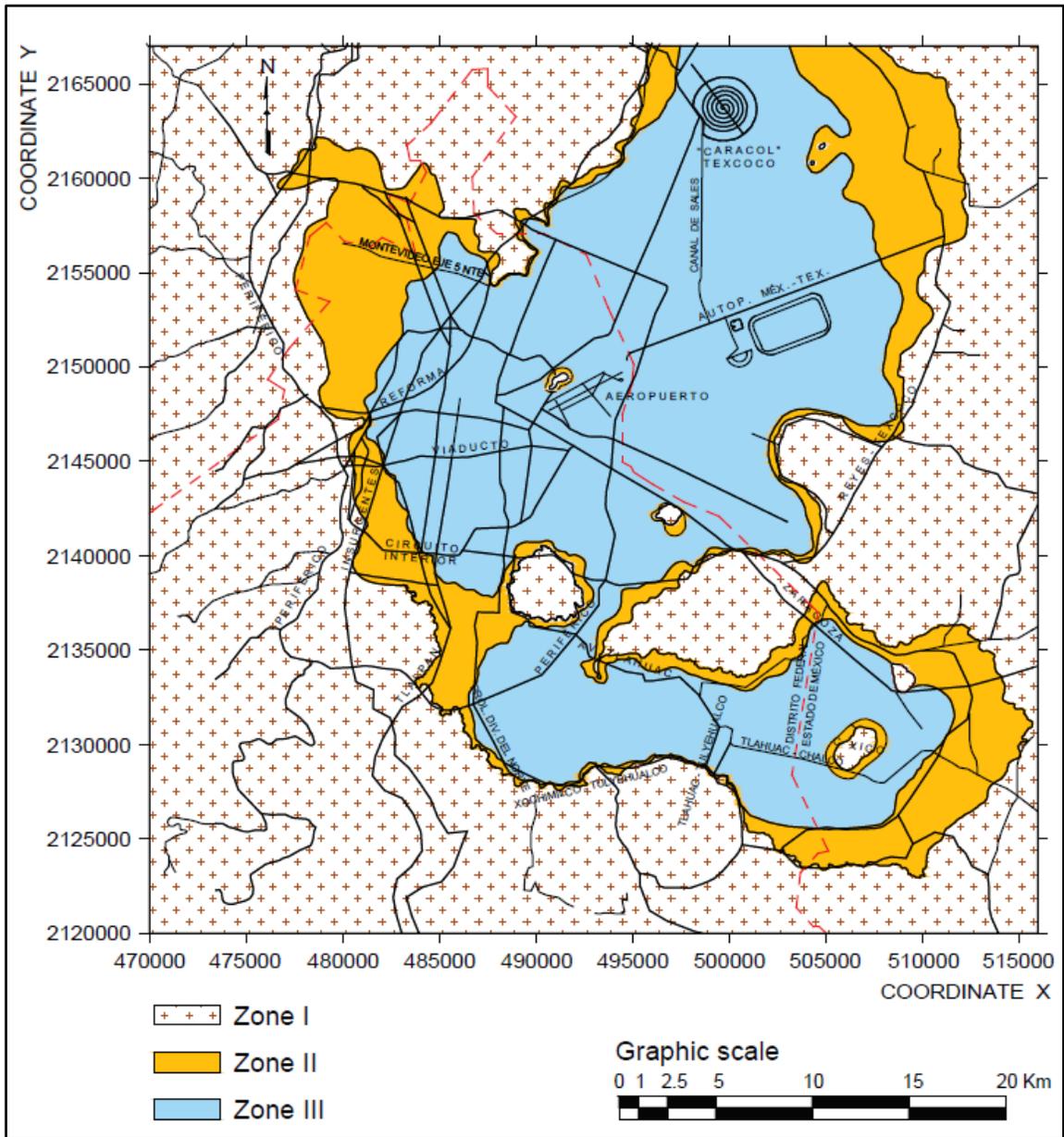


Figura 2.5. Mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México y áreas aledañas realizado con información de aproximadamente 10,000 sondeos geotécnicos (Auvinet *et al.*, 2016). Este mapa se presenta en la actualización de las Normas Técnicas Complementarias para Construcción y Diseño de Cimentaciones (GCM, 2017).

2.4. 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 a una cierta frecuencia. 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). Bramerini *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. (Esteva, 1977; Bramerini *et al.*, 2015). 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 periodos dominantes de la Ciudad de México (Rosenblueth *et al.*, 1992). Este mapa incluyó datos de periodo 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, 2004a) se actualizó el mapa de periodos de la Ciudad de México, utilizando registros de movimientos fuertes y ruido sísmico (Lermo *et al.*, 1988, 1993, 1994a, b), incluyendo mayor información en la subcuenca de Xochimilco-Chalco, así como en la parte noroeste de la CMZA, aunque hay dos zonas que no están suficientemente mapeadas (Figura 2.7).

Para fines de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo (GDF, 2004a), 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 dominante 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 2.8).

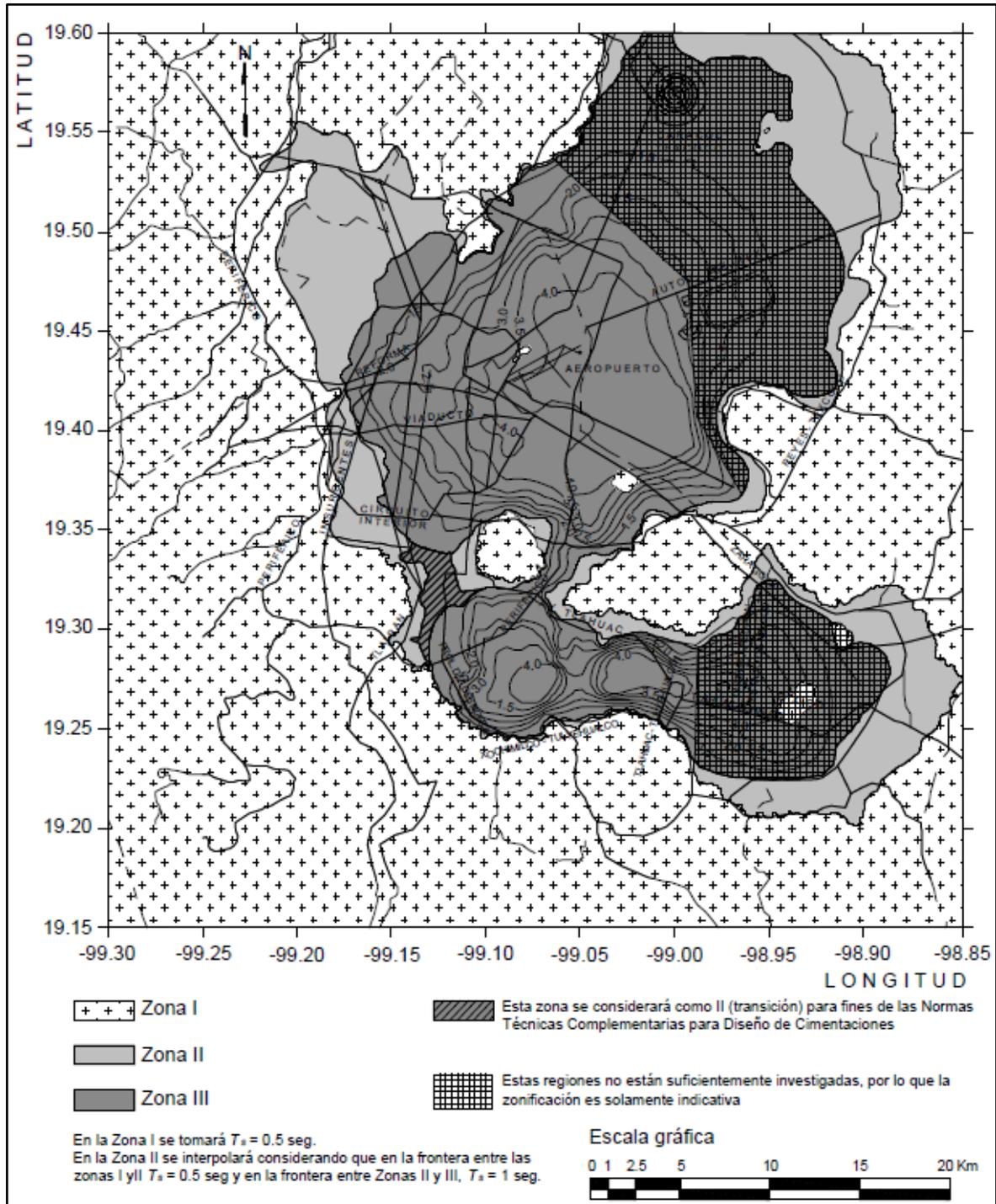


Figura 2.7. Mapa de periodos dominantes del suelo publicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a).

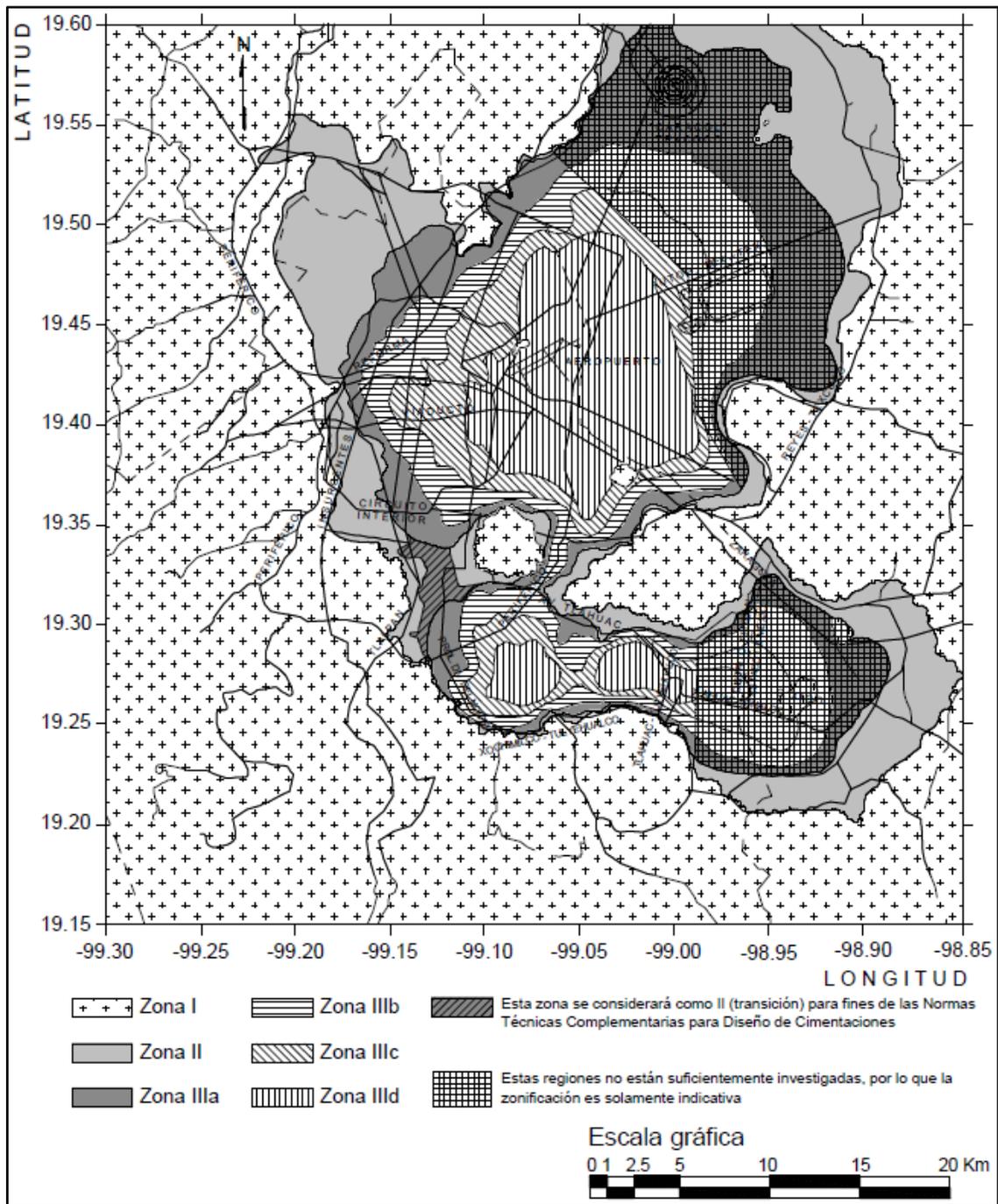


Figura 2.8. Zonificación sísmica de la Ciudad de México y zonas aledañas de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a).

Lermo *et al.* (2012) actualizaron el mapa de periodos dominantes del suelo para la Ciudad de México y áreas aledañas incorporando información de estudios de ruido sísmico en algunos cerros del valle como el Peñón del Marqués y el Peñón de los Baños, además del paleovalle de Culhuacán y en diferentes sitios alrededor de la cuenca. En ese trabajo se actualizaron los datos que sirvieron de base para realizar el mapa de periodo dominante de 2004 y se agregó la nueva información para tener un total de 1300 periodos distribuidos en la cuenca. Siguiendo esta línea de trabajo, Martínez-González *et al.* (2015) actualizaron el mapa de zonificación sísmica para la Cuenca del Valle de México y encontraron diferencias significativas con el mapa de las NTCDS, sobre todo en las inmediaciones del Cerro de la Estrella y en el lago de Chalco (Figura 2.9).

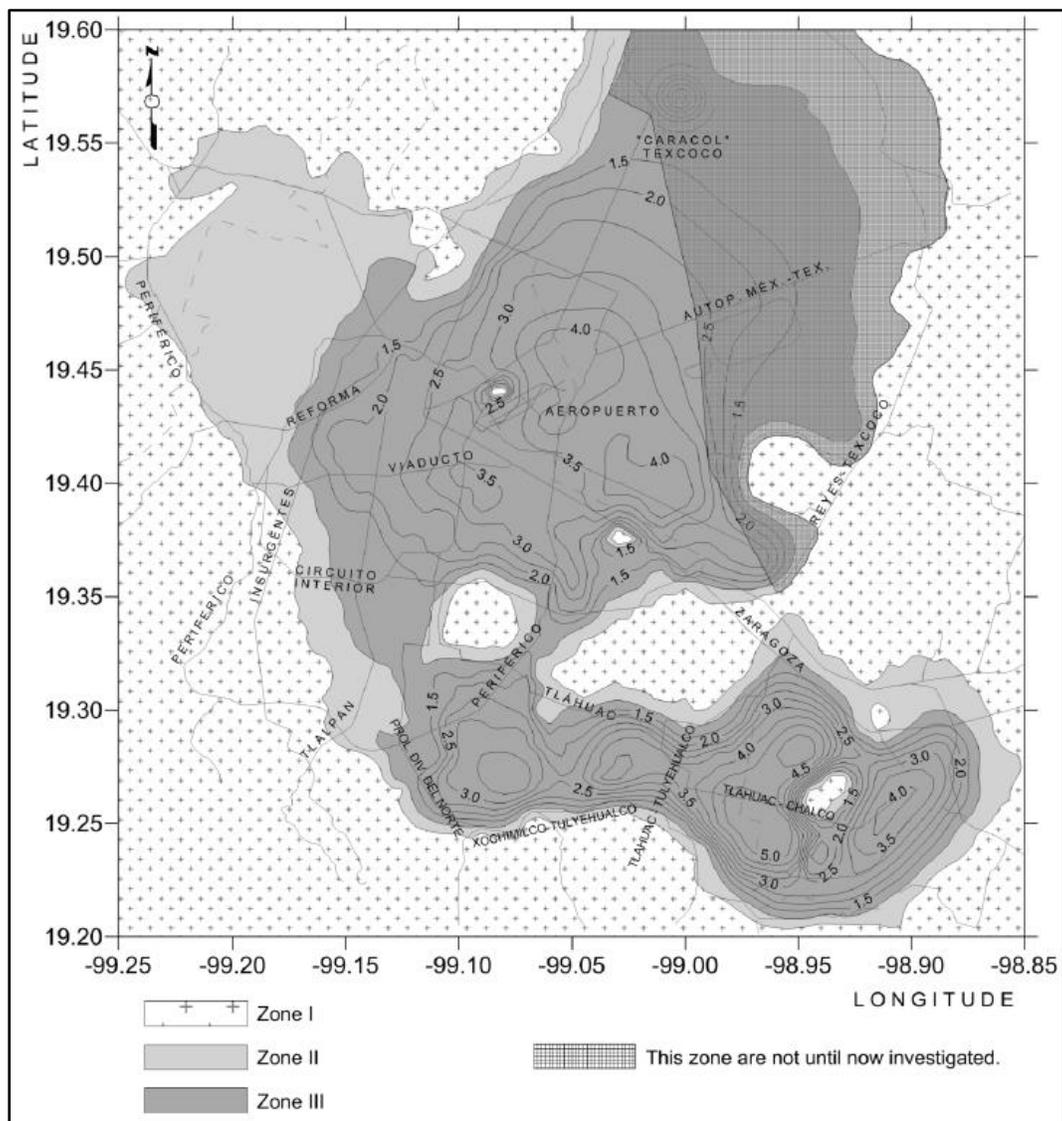


Figura 2.9. Mapa de periodos dominantes del suelo de la CMZA. (Martínez-González *et al.*, 2015).

3. Marco teórico

3.1. Evaluación del efecto de sitio

La descripción del movimiento sísmico con fines prácticos requiere adoptar numerosas simplificaciones pues se trata de movimientos espaciales que ocurren en configuraciones tridimensionales. En principio, se acepta la linealidad del fenómeno de propagación de las ondas sísmicas, así como la validez de los promedios para representar movimientos vectoriales con escalares equivalentes. Para que estas enormes simplificaciones tengan sustento cuantitativo deben verse desde un punto de vista energético que contemple la propagación de las ondas sísmicas en medios reales como un fenómeno colectivo. Por otra parte, como la teoría muestra que la energía de ondas de compresión irradiada por la fuente sísmica es relativamente pequeña, sólo se considera la incidencia de ondas de corte y se designa un factor de efectos de sitio que debería considerar tanto la amplificación 1D como la generación local de ondas superficiales (Sánchez-Sesma, F. J., 2020, comunicación personal). Así, con todas estas hipótesis, el movimiento del suelo (U) en un sitio en la superficie de la tierra puede considerarse como una multiplicación, en el dominio de la frecuencia (convolución en el dominio del tiempo), de los efectos de la fuente (S), la trayectoria (P) y el sitio (H) (Figura 3.1).

$$U(f) = S(f) \times P(f) \times H(f) \quad (3.1)$$

La función de transferencia del sitio, $H(f)$, es un factor de amplificación con respecto a un sitio de referencia para diferentes frecuencias. Para estimar la función de transferencia existen procedimientos basados en el estudio de movimientos fuertes y ruido sísmico (Perron *et al.*, 2018).

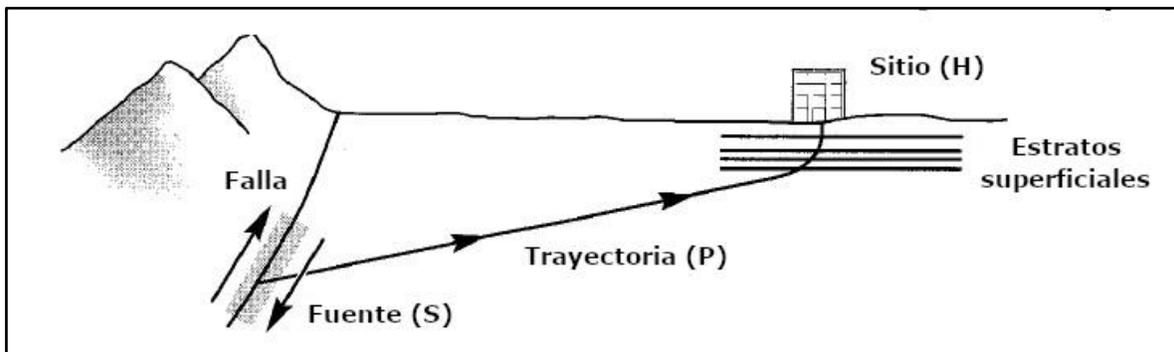


Figura 3.1. Movimiento del suelo en la superficie debido a los efectos de la fuente, la trayectoria y el sitio (Modificado de Kramer, 1996).

3.2. Cociente espectral SSR y SSRn

La técnica estándar de Cocientes Espectrales de Sismos (SSR, por sus siglas en inglés) requiere el registro simultáneo de sismos para, al menos, dos estaciones que están suficientemente cercanas entre sí, con respecto a la fuente del sismo. Se busca que la estación de referencia esté en roca o terreno firme y que no exista amplificación. La función de transferencia empírica de un sitio se obtiene haciendo el cociente del Espectro de Amplitud de Fourier (FAS, por sus siglas en inglés) del movimiento del suelo registrado en el sitio de estudio y el FAS registrado en el sitio de referencia (Perron *et al.*, 2018).

En el cociente SSR se supone que la señal incidente del sismo es la misma, para el sitio y la referencia, en el basamento de roca. Por lo tanto, para los dos sitios los efectos de la fuente y la trayectoria son los mismos. Generalmente se acepta que esta suposición es mejor si la distancia hipocentral es mucho más grande que las distancias entre la referencia y el sitio. Entonces, este cociente permite cancelar los términos de fuente y trayectoria de la señal (Perron *et al.*, 2018):

$$SSR_{x/r}(f) = \left\langle \frac{\{|U_x(f)|\}}{\{|U_r(f)|\}} \right\rangle_{log} \quad (3.2)$$

Donde $SSR_{x/r}(f)$ es el cociente SSR entre un sitio s_x y el sitio de referencia s_r . Para cada componente registrada por el sensor, $|U_x(f)|$ y $|U_r(f)|$ son las FAS de los sismos en los sitios s_x y s_r . Los corchetes $\{\cdot\}$ representan suavizamiento espectral y $\langle \cdot \rangle_{log}$ representan la media geométrica (logarítmica) sobre los registros de los sismos (Perron *et al.*, 2018).

Para que esta técnica sea aplicable, es necesario registrar muchos sismos en ambas estaciones. Esta información no siempre está disponible, ya que depende de la red de instrumentos y del ambiente sismogénico. Para sitios en los cuales este enfoque no es posible, las técnicas basadas en ruido sísmico son una alternativa atractiva (Perron *et al.*, 2018).

Los Cocientes Espectrales de Ruido Sísmico Ambiental (SSRn, por sus siglas en inglés), se basan en el mismo principio que los SSR, pero en lugar de sismos, se intenta obtener la función de transferencia empírica utilizando los FAS de ruido sísmico de la estación de referencia y del sitio de interés (Perron *et al.*, 2018). Para el uso tanto de los SSR y SSRn para evaluar la respuesta de sitio de cuencas sedimentarias es necesario que en el sitio de referencia el efecto de sitio sea despreciable. Una década después de la definición del SSR por Borchardt (1970), se introdujo el cociente SSRn (Irikura y Kawanaka, 1980; Kagami *et al.*, 1982, 1986). Es equivalente al SSR, pero aplicado al ruido ambiental:

$$SSRn_{x/r}(f) = \left\langle \frac{\{|u_x(f)|\}}{\{|u_r(f)|\}} \right\rangle_{log} \quad (3.3)$$

Donde $SSRn_{x/r}(f)$ es el cociente SSRn entre un sitio s_x y el sitio de referencia s_r . Para cada componente, $|u_x(f)|$ y $|u_r(f)|$ son las FAS evaluadas de las señales de ruido ambiental en los sitios s_x y s_r , respetivamente.

Los SSRn son confiables para predecir al menos, f_0 , pero no pueden ser usados para estimar los factores de amplificación de las respuestas de sitio sobre toda la banda de frecuencias. Generalmente, se observan factores de amplificación excesivamente altos en altas frecuencias, debidos probablemente a fuentes de ruido locales que enmascaran los efectos de sitio. Como el cociente SSRn provee resultados mixtos e inciertos para la evaluación de la respuesta de sitio y, en parte, debido al ascenso de los cocientes HVSR, los SSRn fueron gradualmente abandonados (Perron *et al.*, 2018).

3.3. Cociente espectral HVNR

El Cociente Espectral de Ruido Sísmico HVNR³ (Horizontal-to-Vertical Noise Ratio) fue introducido en Japón en la década de los 70 (Nogoshi e Igarashi, 1971). A finales de los 80, Nakamura (1989) interpretó las curvas de HVNR como la amplificación del sitio debido a la resonancia de la onda S.

El HVNR es el promedio de los cocientes espectrales H/V de ruido sísmico registrados simultáneamente en una estación en el sitio de estudio. donde H es el indicador de la media de las amplitudes espectrales de componentes horizontales y V es el espectro del componente vertical. Esto puede ser escrito como:

$$HVNR_x(f) = \left\langle \frac{\{|u_{xH}(f)|\}}{\{|u_{xV}(f)|\}} \right\rangle_{log} \quad (3.4)$$

Donde $HVNR_x(f)$ es el HVNR en el sitio s_x . Para cada componente, $|u_{xH}(f)|$ y $|u_{xV}(f)|$ son las FAS de las señales de ruido sísmico para el promedio de las componentes horizontales y la componente vertical, respetivamente.

Bard (1999) realizó una investigación orientada a evaluar el uso del ruido sísmico, en especial el cociente HVNR, para determinar el efecto de sitio. Una de las conclusiones del trabajo fue que, cualquiera que sea el sustento teórico del HVNR, los resultados experimentales prueban que determina la frecuencia dominante del sitio, f_0 , de forma precisa. Bonnefoy-Claudet *et al.* (2006), realizaron una revisión de la literatura acerca de la naturaleza y el origen del campo de ruido sísmico, en donde concluyen que cualquiera que sea el tipo de ondas predominantes en el ruido sísmico, el cociente HVNR siempre determina la frecuencia dominante, al menos para estructuras 1D con alto contraste de impedancias. El uso del HVNR

³ Este cociente espectral se conoce también como H/V, HVSR, NHV, MHVR y MHVSR.

para evaluar el factor de amplificación de la respuesta de sitio ha sido motivo de una controversia que aún subsiste (Perron *et al.*, 2018), aunque parece irse resolviendo con nuevas interpretaciones (Ito *et al.*, 2020).

El ruido sísmico se produce por múltiples fuentes aleatorias cercanas a la superficie de la Tierra. Las ondas generadas experimentan numerosas interacciones con las heterogeneidades del medio en todas las escalas, generándose un fenómeno colectivo de difracción múltiple, lo cual sugiere que sus intensidades pueden ser bien descritas por ecuaciones de difusión (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

Desde el inicio de los años 90, el cociente H/V se convirtió en un concepto de amplio uso y también en un acertijo, pues el origen de sus propiedades era incierto. Se han formulado diversas propuestas para interpretar sus características. Por ejemplo, se supuso que el ruido sísmico está principalmente compuesto de ondas superficiales. De hecho, el cociente H/V ha sido relacionado a la elipticidad de las ondas de Rayleigh. Cuando las ondas de Rayleigh y Love provienen de varias direcciones el análisis de elipticidad no sólo es muy complicado, sino que pierde sentido. Por otro lado, otros autores sugieren que podría ser importante la contribución de las ondas de cuerpo alrededor del pico H/V (ver Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

En este trabajo se supone que el ruido es un campo difuso que contiene todo tipo de ondas elásticas. Esto provee una visión física profunda y explica el éxito de una de las técnicas más usadas hoy en día. Implícita en esta suposición, está la conexión entre un campo difuso y la función de Green, que implica la proporcionalidad entre la densidad de energía direccional (DED) promedio de un campo difuso y la parte imaginaria de la función de Green en la fuente. Por lo tanto, se expresa el cociente HVNR como la raíz cuadrada de las correspondientes partes imaginarias de los componentes del tensor de Green (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

$$HVNR(\omega) = \sqrt{\frac{Im[G_{11}(\bar{x}, \bar{x}; \omega)] + Im[G_{22}(\bar{x}, \bar{x}; \omega)]}{Im[G_{33}(\bar{x}, \bar{x}; \omega)]}} \quad (3.5)$$

Esta ecuación relaciona las mediciones promedio expresadas en la parte izquierda con una propiedad intrínseca del medio del lado derecho, y naturalmente permite la inversión del cociente HVNR. La inversión del cociente espectral HVNR para obtener un perfil de velocidades no se considera en este trabajo.

3.4. Relación entre el periodo dominante y el espesor del suelo

En sitios con alto contraste de impedancia entre los suelos blandos y los depósitos profundos se ha encontrado que la frecuencia dominante del suelo, obtenida mediante el cociente espectral HVNR, se correlaciona bien con el espesor del suelo 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 ecuación 3.6.

$$H_s = a * T_s^b \quad (3.6)$$

donde H_s representa el espesor del suelo, T_s el periodo obtenido mediante el cociente HVNR, mientras que a y b son constantes. En diversos trabajos (Ibs-von Seht y Wohleberg, 1999; Parolai *et al.*, 2002; entre otros) se relaciona el periodo, obtenido mediante mediciones de ruido sísmico, y el espesor del suelo, con información recabada de sondeos geotécnicos y perfiles geológicos. En estos estudios se ha encontrado que tal relación ofrece una buena aproximación al espesor real del suelo, en especial cuando el contraste de impedancias es alto.

Thabet (2019), realizó una revisión bibliográfica de varios trabajos en los que se utiliza la relación empírica no lineal para aproximar el espesor del suelo con la información del periodo, obtenido mediante ruido sísmico. Se concluye que b varía muy poco de un estudio a otro, mientras que a es un parámetro característico de cada región por lo que tiene un amplio rango de valores. En la Tabla 3.1 se muestran los valores de a y b recopilados por Thabet (2019) de diferentes estudios, además de su coeficiente de correlación (R_s) y el número de datos.

Tabla 3.1. Información de parámetros a y b para diferentes cuencas alrededor del mundo. Las referencias se pueden consultar en el estudio de Thabet (2019).

País	Estudio	a	b	R_s	# Datos
Alemania	Ibs-von Seth y Wohleberg (1999)	96	1.388	0.98	102
España	Delgado <i>et al.</i> (2000a)	55.11	1.256	0.97	180
España	Delgado <i>et al.</i> (2000b)	55.64	1.268	0.98	33
Alemania	Parolai <i>et al.</i> (2002)	108	1.551		337
Alemania	Hinzen <i>et al.</i> (2004)	137	1.190	0.96	152
Turquía	Birgören <i>et al.</i> (2009)	150.99	1.153	0.995	15
Turquía	Özalaybey <i>et al.</i> (2011)	141	1.270	0.91	239
Australia	Harutoonian <i>et al.</i> (2013)	73	1.170	0.94	15
USA	Fairchild <i>et al.</i> (2013)	90.53	1.000	1.00	164
Italia	Del Monaco <i>et al.</i> (2013)	53.461	1.010	0.41	25
Turquía	Tün <i>et al.</i> (2016)	136	1.357	0.985	30
Japón	Thabet (2019)	117.13	1.197	0.94	224

Estos resultados son consistentes con la teoría de la elasticidad. En efecto, el periodo fundamental de un estrato de suelo homogéneo de espesor H_s (en m) y velocidad β (en m/s) está dado por $T_s = 4\beta^{-1} * H_s$ de manera que $H_s = 0.25\beta * T_s$ por lo que, en la relación de

potencia que examinamos, a es casi proporcional a la velocidad y b debe ser cercano a la unidad. Muy probablemente las discrepancias se deben a la heterogeneidad vertical.

Para el caso específico de la Ciudad de México, se han obtenido relaciones entre el periodo y el espesor del suelo similares. Aguilar *et al.* (2003) relacionan las propiedades dinámicas del suelo de la zona central de la ciudad para aproximadamente 360 puntos. Encuentran que el espesor de los suelos compresibles y el periodo dominante se relacionan por medio de la ecuación 3.7.

$$H_s = 31(T_s - 0.5)^{0.5} \quad (3.7)$$

Por otro lado, Avilés y Pérez-Rocha (2010), con información de 100 estaciones sísmicas y alrededor de 500 mediciones de ruido sísmico, construyen un mapa de periodos para la Ciudad de México. Ellos realizan mediciones de la subsidencia en la ciudad de México para 960 puntos e interpolan, en cada uno de ellos, el valor del periodo del mapa que obtuvieron y, con ayuda de un mapa de espesor del suelo, interpolan también el valor de H_s . Con esta información, la relación entre el periodo y el espesor es:

$$H_s = 27.5(T_s - 0.5)^{0.5} \quad (3.8)$$

4. Datos e información

4.1. Base de datos del periodo dominante

La actualización del mapa de periodos dominantes del suelo se realizó tomando como base la información disponible recabada a través de diversos estudios técnicos y trabajos de investigación. Estos trabajos comenzaron con la publicación, posterior al sismo de 1985, de la estimación del periodo dominante del suelo para la Ciudad de México, con información de movimientos fuertes y registros de ruido sísmico (Lermo *et al.*, 1988, 1993, 1994a). Lermo y Chávez-García (1994b) recopilaron datos de 81 estaciones acelerográficas y 409 mediciones de ruido sísmico. Esta información permitió construir el primer mapa robusto de periodos dominantes para la Ciudad de México, el cual fue la base del mapa contenido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (GDF, 2004b).

En 2012, a solicitud de la Coordinación Técnica de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal, Lermo *et al.* (2012) realizaron la actualización del mapa de periodo dominante y eliminaron muchas inconsistencias en la información de algunos sitios y, además, señalaron los cambios en el periodo por el hundimiento regional. La actualización se realizó con información de 12 sismos, que se registraron en 85 estaciones acelerográficas, por medio de cocientes SSR para obtener el periodo dominante. Además, desde 2009 y hasta 2012, se recabó información de los periodos de 810 sitios en donde se realizaron mediciones de ruido sísmico (por ejemplo, el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués, el Paleovalle de Culhuacán y en muchos otros dentro de la CMZA). Por último, Lermo *et al.* (2012) compararon 102 valores de periodo, obtenidos 22 años antes, con el valor de periodo actualizado por medio de nuevas mediciones de ruido sísmico, determinando la variación del periodo con respecto al tiempo. Para periodos de 0.4 a 1.1 s el periodo no cambia, mientras que para periodos mayores la relación es la siguiente:

$$T_1 = 0.87T_0 - 0.05 \quad (4.1)$$

Donde T_0 es el valor de periodo registrado en 1990 y T_1 es el valor registrado en 2012. Con esta relación, Lermo *et al.* (2012) actualizaron el periodo de los 409 puntos recopilados por Lermo y Chávez-García (1994b) y construyeron un nuevo mapa de periodos dominantes con información de 1300 sitios distribuidos por la Ciudad de México y las zonas aledañas.

La actualización más reciente del mapa de periodo dominante fue realizada por Martínez-González *et al.* (2015), en la que se incorporó nueva información obtenida por medio de mediciones de ruido sísmico realizadas en el Cerro de la Estrella, en el Cerro del Tepeyac y en Xochimilco, además de tomar en cuenta la información de periodos obtenida por Vergara-Huerta (2015) para la subcuenca de Chalco. También, Martínez González *et al.* (2015) calcularon algunos puntos de periodo con base en el espesor del suelo y una velocidad

promedio, mediante la fórmula $T_s = (4 * H_s) / \beta$, para la zona de Chalco y Texcoco. En total, el nuevo mapa de periodos se realizó con información en 1400 puntos distribuidos en la CMZA (Figura 4.2). El valor de periodo para los 1400 sitios, reunidos por Martínez-González *et al.* (2015), fueron utilizados como base para la actualización del mapa de periodos dominantes de este trabajo.

Además, se incluyó la información de periodo dominante para 42 sitios (Figura 4.2), obtenidos mediante mediciones de ruido sísmico, en los terrenos en donde se iba a construir el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), en Texcoco, Estado de México (Rodríguez, 2017).

Por último, gran parte del área de estudio se considera como Zona I, es decir, se trata de suelos firmes que no presentan efectos de sitio considerables, como en el caso de la sierra de Chichinautzin, al sur, y la sierra de Las Cruces, al poniente. Por lo tanto, fue necesario delimitar estas zonas por medio de una curva, a partir de la cual se supone que no hay efecto de sitio (curva de 0.1 s). Esto se realizó con base en el límite de las arcillas lacustres (Arce *et al.*, 2019) y los depósitos aluviales (Mooser, 2018), además de la topografía y sondeos geotécnicos ubicados en los límites entre la zona lacustre y las sierras (Figura 4.2).

4.2. Nuevas mediciones de ruido sísmico

A partir de la última actualización del mapa de periodo dominante del suelo para la Ciudad de México y zonas aledañas, realizada en el año 2015 (Martínez-González *et al.*, 2015), se realizaron nuevas mediciones de ruido sísmico para complementar el mapa, con especial énfasis al sur de la Ciudad, en la denominada subcuenca de Xochimilco-Chalco, además de las alcaldías de Coyoacán y Álvaro Obregón. Estas mediciones se realizaron siguiendo las recomendaciones prácticas del proyecto europeo SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations), basadas en una investigación detallada para realizar las mediciones en campo (SESAME, 2004). Estas recomendaciones tienen que ver con el tipo de sensor para registrar el ruido sísmico, la instalación de este, el tiempo de registro mínimo, la frecuencia de muestreo, etc.

Las mediciones de ruido sísmico se realizaron con un sismógrafo Guralp modelo CMG-6TD 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 (generalmente de 0.1 a 10 Hz). Para realizar las mediciones el sismógrafo se orientó hacia el norte geográfico, se realizó la nivelación y, por último, se conectó el equipo a una batería y a una computadora para revisar que la señal se registrara de forma adecuada (Figura 4.1). Las señales se registraron por un tiempo mínimo de 60 minutos y la frecuencia de muestreo utilizada fue de 100 Hz.



Figura 4.1. Instalación típica del sismógrafo Guralp CMG-6TD para la medición de ruido sísmico. Los componentes necesarios para un buen funcionamiento son el sensor, una batería para suministrar energía, el GPS para que el tiempo sea el correcto y los cables para las conexiones entre todos estos componentes.

En total se realizaron 1112 mediciones de ruido sísmico en la Ciudad de México y zonas aledañas (Figura 4.2). La mayoría de las mediciones se realizaron en las siguientes alcaldías de la Ciudad de México: Tláhuac (294), Xochimilco (209), Iztapalapa (196), Álvaro Obregón (115), Coyoacán (71), Cuauhtémoc (30), Gustavo A. Madero (13) y Miguel Hidalgo (5). Como se puede apreciar, se dio especial énfasis a la subcuenca de Xochimilco-Chalco para delimitar mejor la transición entre la sierra de Santa Catarina y la sierra de Chichinautzin con la zona lacustre. También se recabó información de la parte suroeste para definir el área del derrame basáltico del Xitle y la zona de lomas de la alcaldía Álvaro Obregón. Además, se realizaron 12 mediciones sobre los pozos profundos Texcoco-1, Mixhuca-1, San Lorenzo Tezonco, Roma-1 y Copilco-1.

En el Estado de México se realizaron 167 mediciones en los municipios de Chalco, Chimalhuacán, Texcoco, Los Reyes, Nezahualcóyotl y Ecatepec. Esto con el objetivo de recabar información de la parte sureste y noreste de la CVM, además de incorporar datos en la zona que comprende los cerros La Caldera, El Pino y Chimalhuacán.

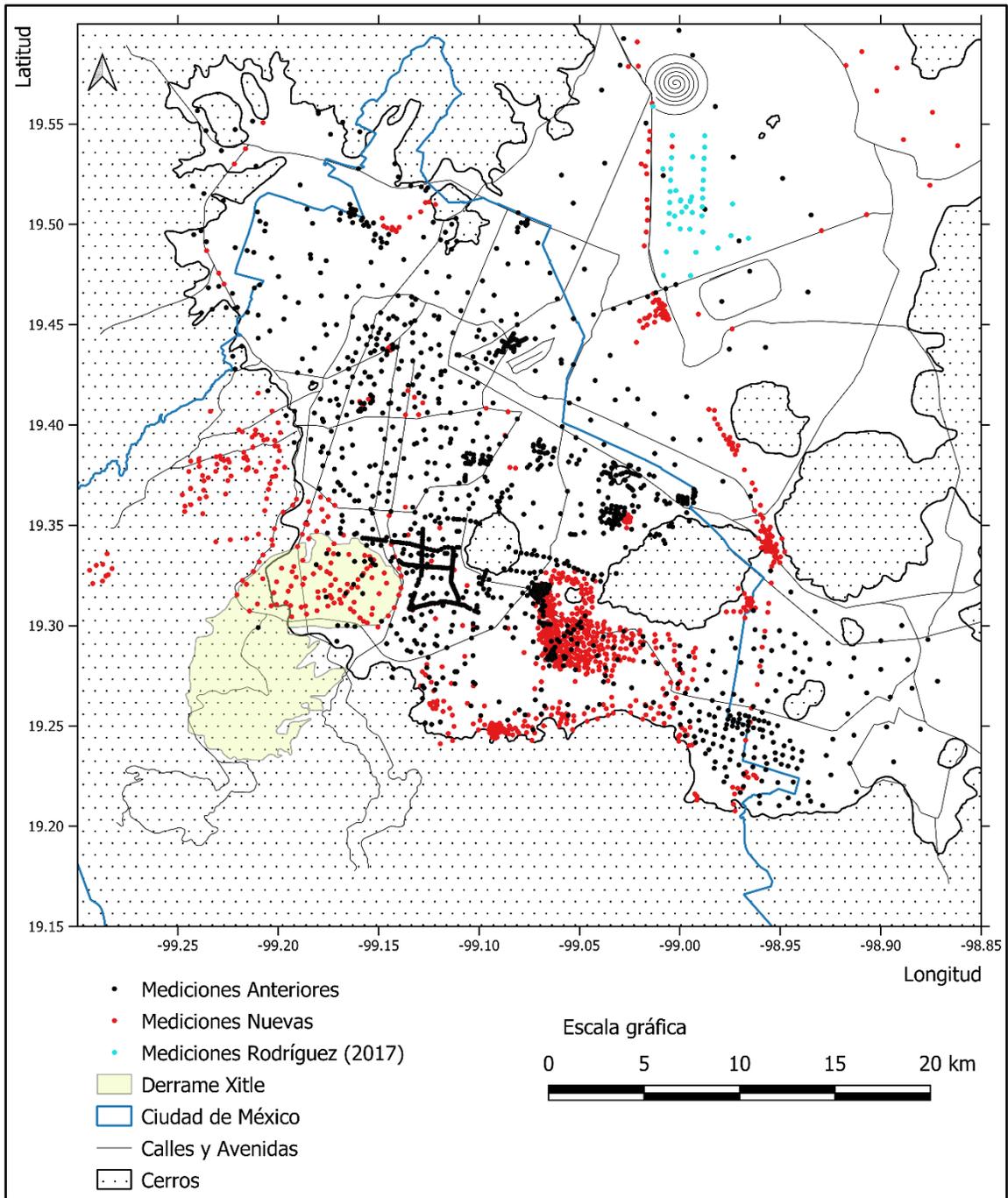


Figura 4.2. Información de periodo dominante en la Ciudad de México y zonas aledañas con información de ruido sísmico y movimientos fuertes. La línea de color negro que limita las sierras con la zona de lago es la curva de 0.1 s.

4.3. Información del espesor del suelo

El periodo dominante y el espesor del suelo se pueden relacionar por medio de una relación potencial (ecuación 3.6) si el contraste de impedancias entre el suelo blando y la roca base es grande (ver sección 3.4). Por este motivo, se realizó una investigación bibliográfica para recopilar información del espesor del suelo en diferentes sitios de la CMZA, que consistió en revisar datos de reportes técnicos, libros, artículos, informes, tesis, tesinas, etc. En el Anexo B se enlista la bibliografía consultada para este fin. En total, se recopiló información de sondeos geotécnicos, pozos profundos y estudios geofísicos (Downhole y Crosshole) en 285 sitios.

La mayor parte de la información del espesor del suelo que se recopiló fue de sondeos geotécnicos (209 sitios). Tales sondeos se obtuvieron de estudios técnicos de las obras civiles realizadas en los últimos años en la Ciudad de México y zonas aledañas. Estas obras incluyen los túneles del drenaje profundo (Túnel Canal General, Túnel Dren General del Valle, Túnel Emisor Oriente y Túnel Emisor Poniente), la Línea 12 del metro de la Ciudad de México y el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM). En la Figura 4.3 se aprecia el perfil geológico-geotécnico de la Línea 12 del metro realizado por Mooser (2018). En la Figura 4.4 se muestra un perfil geotécnico N-S del NAICM realizado por CFE (2017) y el perfil geológico de la subcuenca de Chalco realizado con información de pozos de agua (Choteau *et al.*, 1994). La información de estas obras también se obtuvo de reportes técnicos, tesis e informes que tratan de forma más específica ciertos temas. Los sondeos geotécnicos restantes son de obras civiles más pequeñas como edificios, escuelas, hospitales, carreteras, puentes, etc.

También se logró recopilar información de 52 sitios en donde se perforaron pozos profundos dentro de la CVM. Seis sitios corresponden a pozos profundos (>2 km) perforados con fines de exploración, los cuales son: Texcoco-1, Tulyehualco-1, Mixhuca-1, Roma-1, San Lorenzo Tezonco y Santa Catarna-3A. Los 39 pozos profundos restantes son pozos de agua perforados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). En la Figura 4.4 se muestra el perfil geológico de la subcuenca de Chalco con base en 13 pozos de agua. Aunque el objetivo de estos pozos es distinto, debido a que la profundidad de exploración es muy grande y las capas superficiales no están bien muestreadas, el espesor del suelo es confiable ya que el cambio abrupto entre las arcillas de lago y los depósitos profundos duros, que en algunos casos pueden ser basaltos, está bien definido.

Finalmente, se recopiló información de 24 estudios geofísicos de Downhole y Crosshole, los cuales determinan de manera precisa el perfil de velocidades de onda de corte y, por ende, el límite entre los suelos blandos y los depósitos profundos. Este límite permitió obtener el espesor del suelo para los 24 sitios.

La distribución de los 285 datos de espesor del suelo se muestra en la Figura 4.5. La mayor parte de la información se ubica al centro, al noreste y al sur del área de estudio, mientras que al noroeste hay pocos datos.

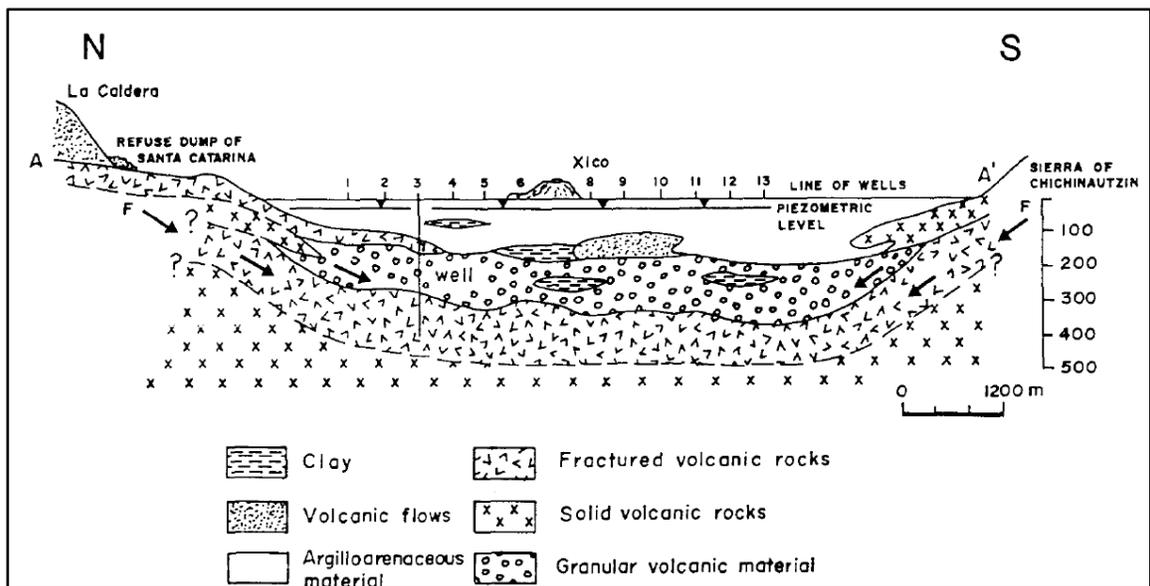
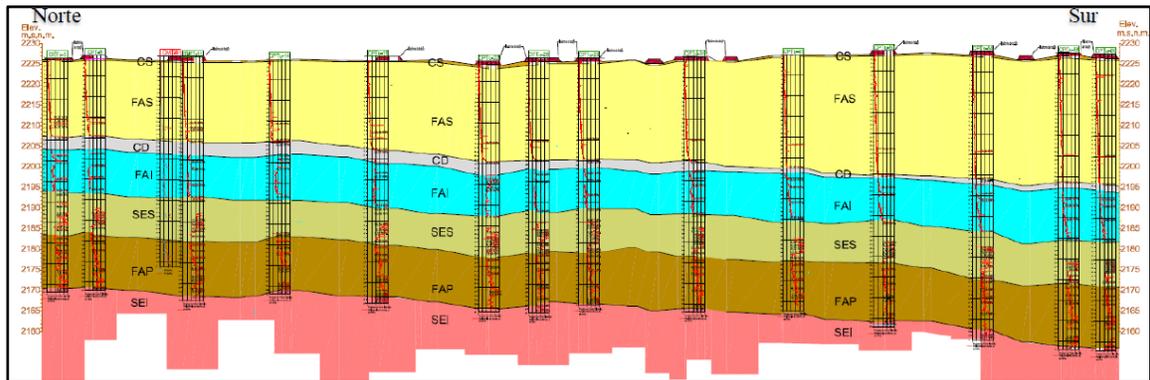


Figura 4.4. Parte superior) Perfil geotécnico en dirección N-S del NAICM (CFE, 2017). c) Perfil geológico en dirección N-S de la subcuenca de Chalco realizado con información de pozos de agua (Chouteau *et al.*, 1994).

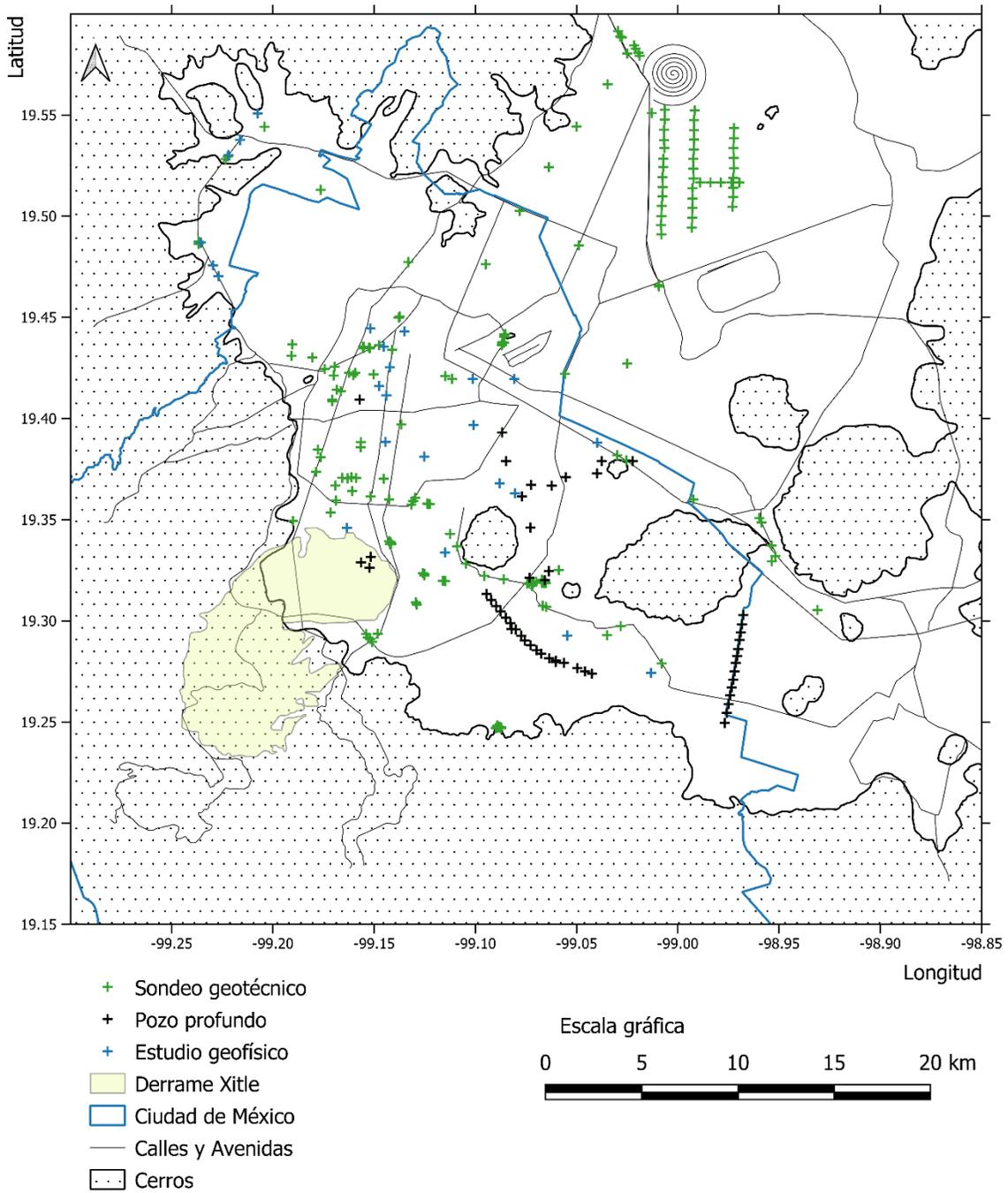


Figura 4.5. Información del espesor del suelo en la Ciudad de México y zonas aledañas. Se muestran los datos de sondeos geotécnicos, pozos profundos y estudios geofísicos.

5. Procesamiento del ruido sísmico

El procesamiento de las señales de ruido sísmico para obtener el cociente espectral HVNR, y determinar el periodo dominante, se realizó con el software Geopsy, desarrollado por el proyecto SESAME (2004). En la etapa de procesamiento se siguieron los lineamientos del proyecto SESAME para la determinación del cociente. Además, el procesamiento del ruido sísmico es bastante similar al realizado por Martínez-González (2011, 2015) y por Martínez-González *et al.* (2015), con ligeras modificaciones, para mantener cierta homogeneidad en la información.

El preproceso que se realizó a las señales de ruido consistió en remover la media del registro y aplicar un filtro Butterworth pasabandas de 0.1 a 50 Hz de 4 polos y causal. Posteriormente, se aplicó el proceso establecido por el software Geopsy para obtener el cociente (Figura 5.1).

Primero, se seleccionaron N ventanas de ruido estacionario, eliminando mediante un algoritmo “anti-trigger” el ruido transitorio producido por fuentes muy cercanas. El algoritmo utilizado en este paso es el denominado “Bad sample tolerance/threshold” para optimizar el número de ventanas seleccionadas. El tamaño de la ventana utilizado fue de 100 s, para alcanzar a observar frecuencias de hasta 0.1 Hz (SESAME, 2004), y el traslape entre ventanas se estableció en 50%. Para cada ventana de ruido estacionario seleccionada se calcula el espectro de amplitud de Fourier (FAS) y se realiza un suavizamiento del tipo Konno Ohmachi con una constante de suavizamiento de 40 y “cosine taper” de 5 %. Este procedimiento se realizó para las tres componentes N-S, E-W y vertical.

Posteriormente, se promediaron las componentes horizontales N y E para cada ventana por medio del “square average” (ecuación 5.1).

$$H(f) = \sqrt{\frac{N^2(f) + E^2(f)}{2}} \quad (5.1)$$

Con el espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical (V) y el espectro de amplitud de Fourier promedio de las componentes horizontales (H) se realizó el cociente espectral HVNR para cada ventana. Por último, se calculó el promedio del cociente HVNR.

El resultado del procesamiento es una curva promedio del cociente espectral, además de dos curvas para el máximo y el mínimo. El rango de análisis de los cocientes espectrales HVNR se realizó de 0.1 a 10 Hz.

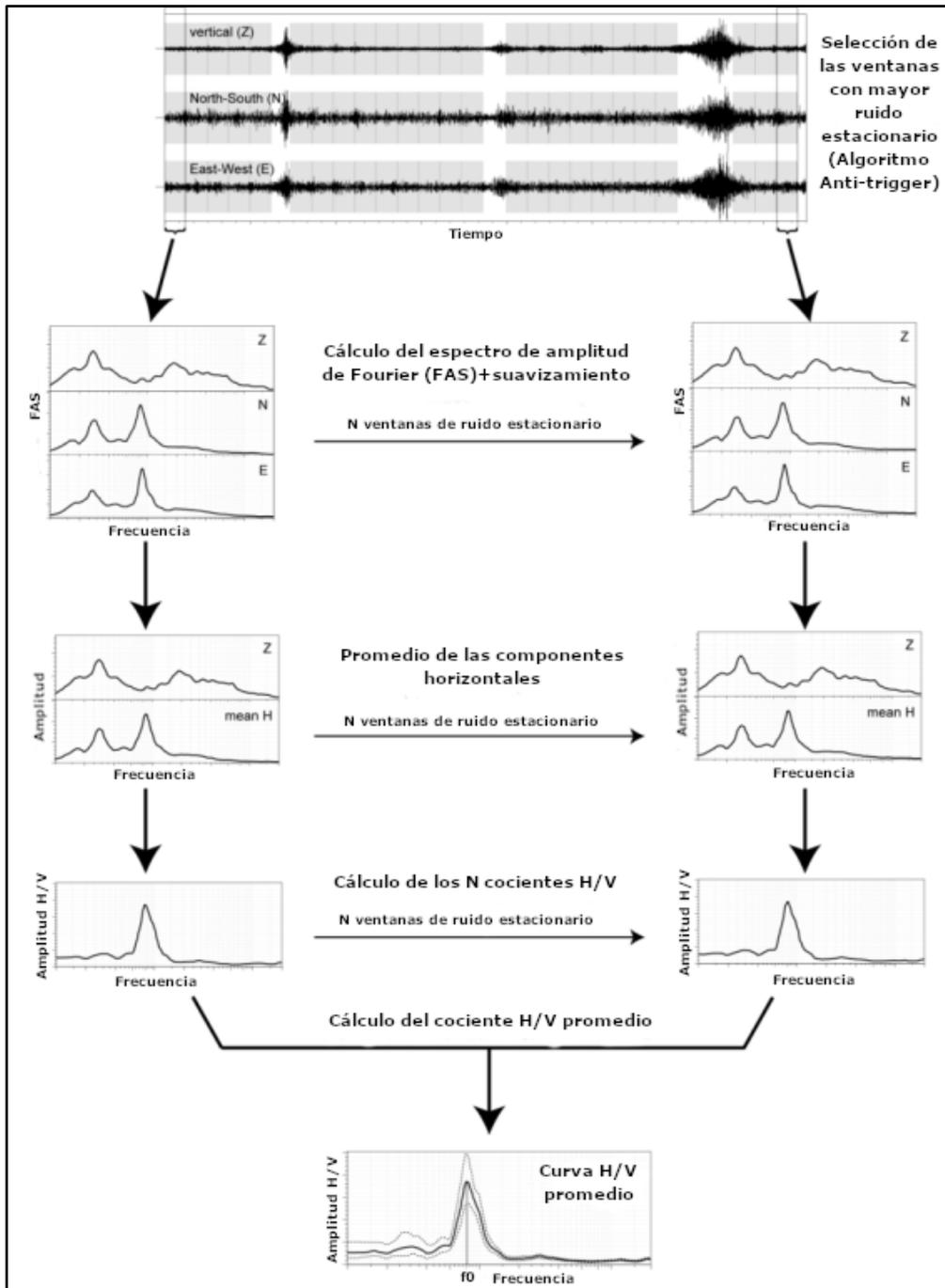


Figura 5.1. Diagrama del procesamiento de ruido sísmico con el programa Geopsy para obtener el cociente espectral HVNR (Modificado de SESAME, 2004).

6. Resultados

6.1. Cocientes espectrales HVNR

Los cocientes espectrales procesados para los 1112 puntos de medición de ruido tienen una respuesta variada en el rango de análisis de 0.1 hasta 10 Hz. Se encontró una frecuencia dominante mínima en la Ciudad de México y zonas aledañas de 0.17 Hz, que corresponde a un periodo de 5.88 s, y una frecuencia dominante máxima de hasta 10 Hz, que corresponde a 0.1 s. Algunas curvas de cociente espectral tienen más de un pico en frecuencia, pero aquí solamente se tomó en cuenta el de mayor amplitud. La mayoría de los HVNR muestran un pico en el intervalo de frecuencia de 0.1 a 0.2 Hz, cuya amplitud es variable. Este pico no se tomó en cuenta en el análisis de este trabajo debido a que, probablemente, es causado por contrastes de impedancia entre estratos a mayor profundidad o debido al oleaje del océano.

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan los resultados de los cocientes espectrales HVNR de una zona comprendida entre las alcaldías Tláhuac e Iztapalapa, que pertenece a la transición entre la sierra de Santa Catarina y el antiguo lago de Xochimilco. Estos cocientes se dividieron de acuerdo con la frecuencia dominante del sitio, agrupándolos en familias espectrales para una interpretación en conjunto. Los cocientes espectrales de la Figura 6.1 y de la Figura 6.2 presentan frecuencias dominantes menores a 1 Hz es decir, periodos dominantes mayores a 1.0 s, lo que indica que pertenecen a la zona de Lago de acuerdo con la zonificación sísmica de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a). La mayor parte de los cocientes se encuentra en el rango de frecuencias de 0.2 a 0.6 Hz y, aunque la identificación de la frecuencia dominante fue complicada debido a la cercanía con el pico característico entre 0.1 y 0.2 Hz, se aprecian claramente las diferencias entre familias espectrales.

Los cocientes espectrales HVNR de la Figura 6.3 presentan frecuencias dominantes mayores a 1.0 Hz es decir, periodos dominantes menores a 1.0 s, lo que indica que pertenecen a las zonas de Transición y Lomas de acuerdo con la zonificación sísmica de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a). Los cocientes espectrales tienen un comportamiento más complicado debido a que muestran una respuesta en un rango de frecuencias más amplio, en el que llegan a tener 2 y hasta 3 frecuencias principales. Como se mencionó con anterioridad, la frecuencia dominante se determinó en el pico con mayor amplitud.

Estos cocientes espectrales HVNR sirven como ejemplo de la forma que tienen estas curvas en toda la CMZA, a excepción del derrame basáltico del volcán Xitle, en las zonas denominadas de Lomas, Transición y Lago. Los cocientes espectrales de la zona del derrame basáltico, en la alcaldía Coyoacán, son diferentes a los encontrados en otras zonas de la CMZA y se pueden consultar en el estudio de Huerta-Espinoza (2019).

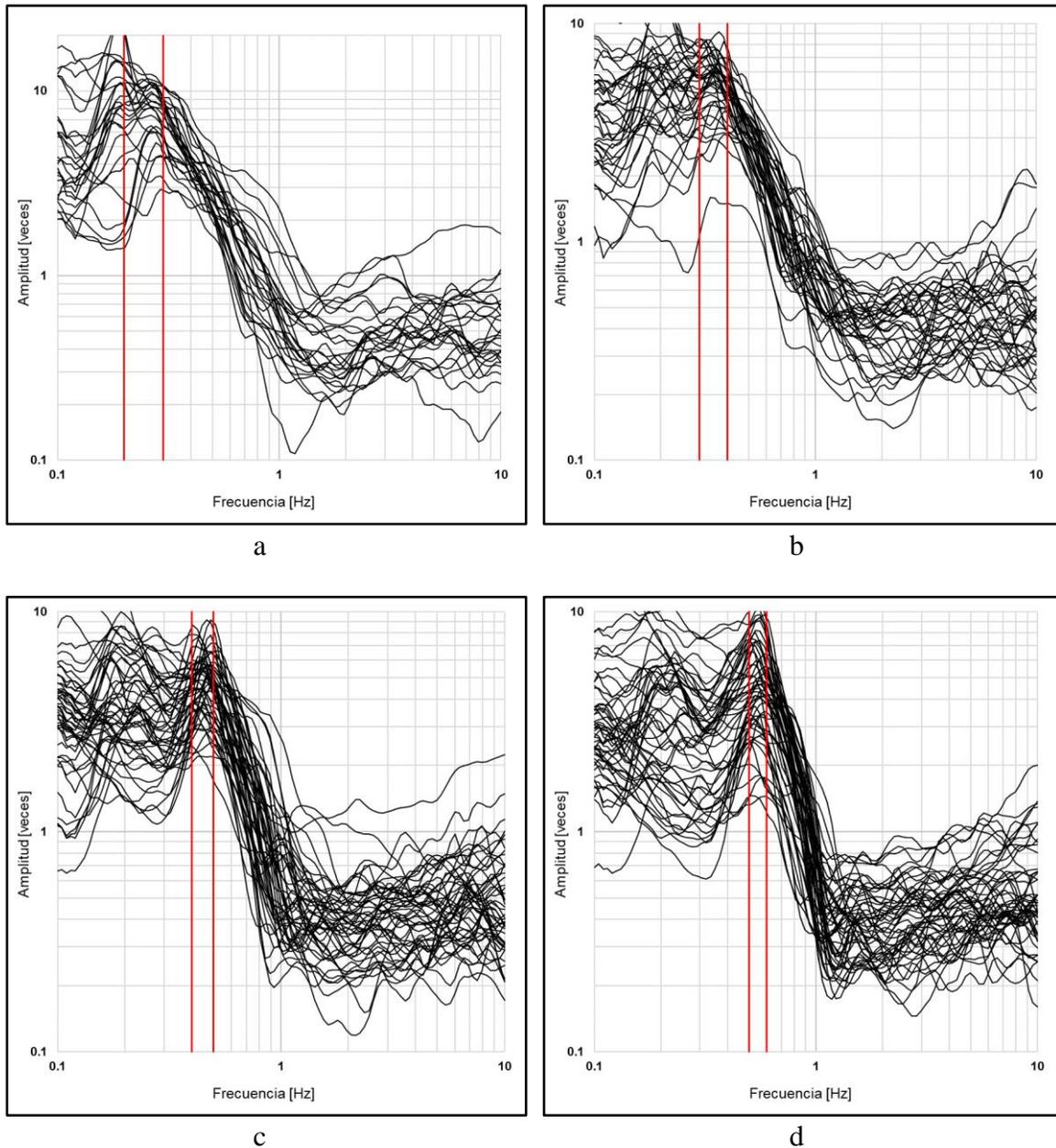


Figura 6.1. Familias de cocientes espectrales HVNR. a) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.2-0.3 Hz. b) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.3-0.4 Hz. c) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.4-0.5 Hz. d) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.5-0.6 Hz. Las líneas de color rojo marcan los límites en donde se ubica la frecuencia dominante.

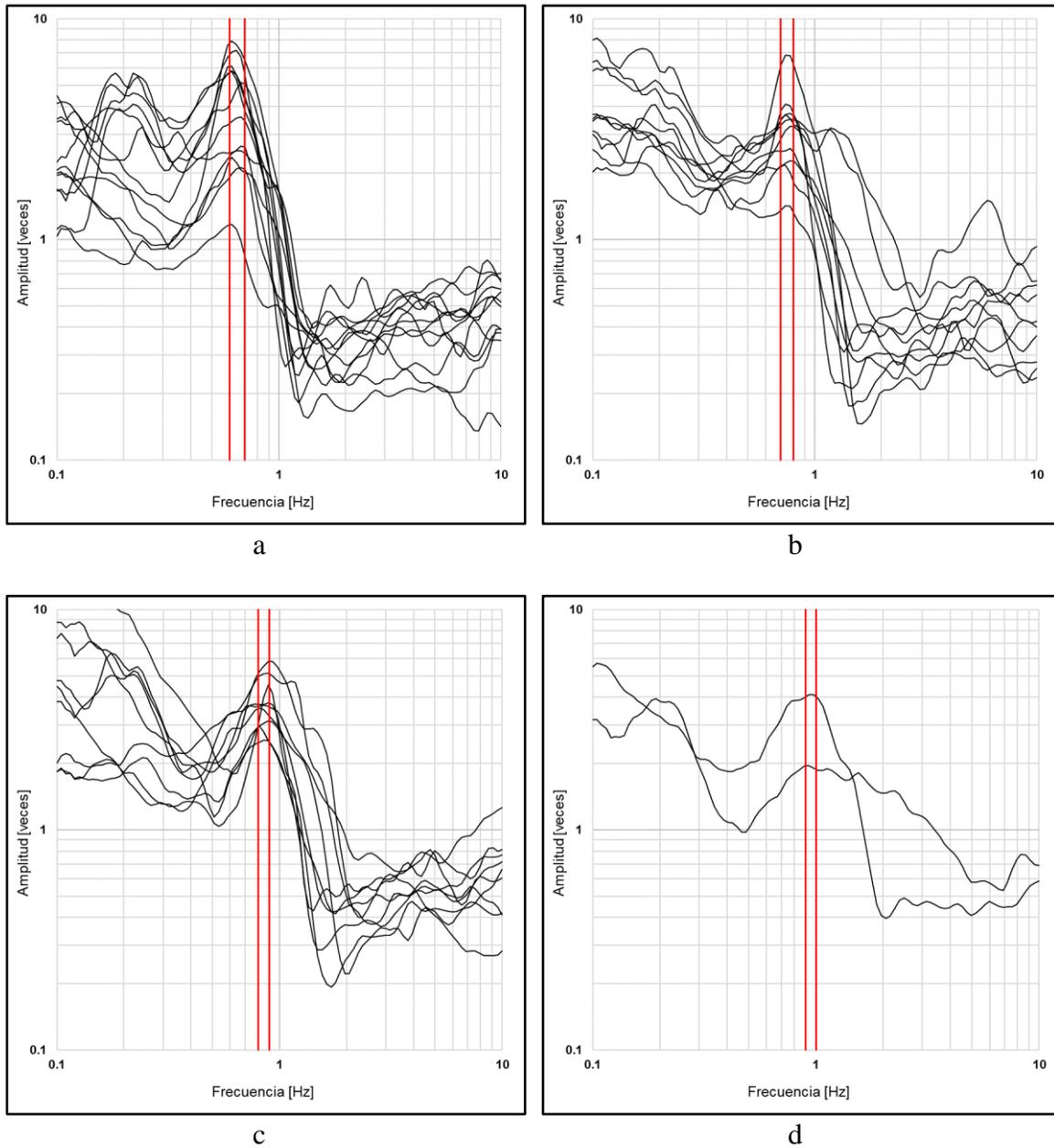


Figura 6.2. Familias de cocientes espectrales HVNR. a) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.6-0.7 Hz. b) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.7-0.8 Hz. c) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.8-0.9 Hz. d) Cocientes espectrales en el rango de frecuencias de 0.9-1.0 Hz. Las líneas de color rojo marcan los límites en donde se ubica la frecuencia dominante.

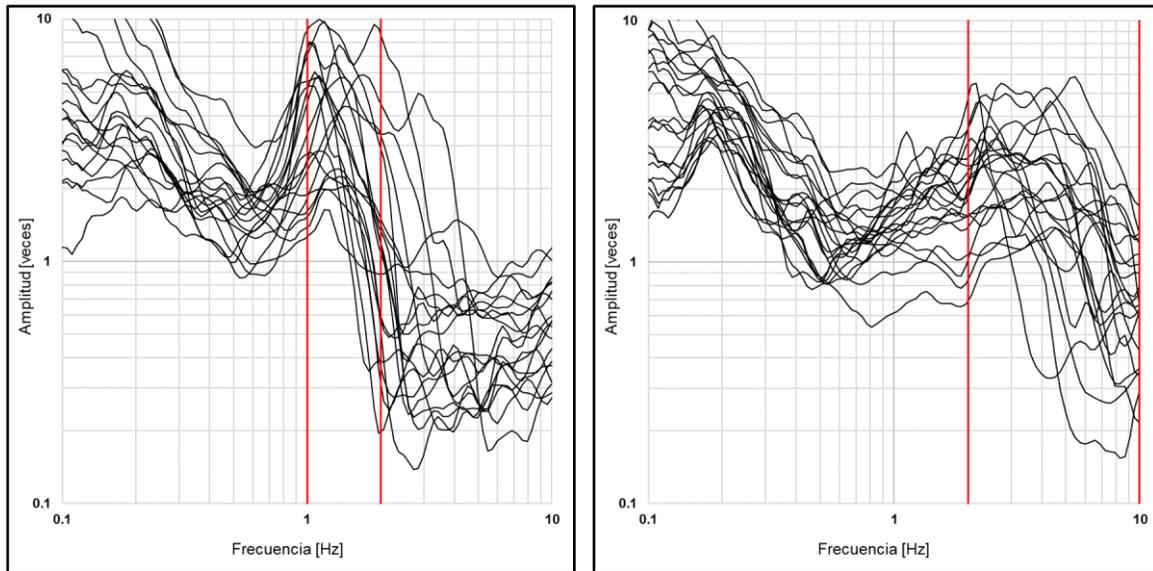


Figura 6.3. Familias de cocientes espectrales HVNR. Izquierda) Familia de cocientes entre 1.0 y 2.0 Hz, considerada como zona de Transición. Derecha) Familia de cocientes entre 2.0 y 10.0 Hz, considerada generalmente como zona de Lomas. Las líneas en rojo marcan los límites del rango de frecuencias.

6.2. Mapa de periodo dominante

El mapa actualizado de periodo dominante para la Ciudad de México y zonas aledañas se realizó con información de 2464 puntos recabados (Figura 6.4). Algunos de los periodos dominantes no fueron tomados en cuenta debido a que se ubican en la zona considerada sin efecto de sitio (curva de 0.1 s), como es el caso de los periodos de la alcaldía Álvaro Obregón.

Hay varias modificaciones de acuerdo con el mapa publicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004a). En primer lugar, se consideran periodos de hasta 0.1 s, a partir de los cuales se considera que hay efecto de sitio. El rango entre periodos de 0.1 a 0.5 s se amplía, sobre todo en las zonas noroeste y noreste de la CMZA. En la Sierra de Santa Catarina se modificaron los límites con los cerros aledaños. Al oeste, en los límites con el volcán Yuhualixqui, se obtuvieron periodos mayores a los 0.5 s, además se define una estructura que parte del volcán en dirección sur y que se considera como un derrame basáltico antiguo. Al este, en los límites con el cerro El Pino, se obtuvieron periodos mayores a los 0.5 s. La zona que se ubica en Texcoco, cerca del lago Nabor Carrillo y hasta El Caracol, se define mejor debido a la información recabada en el sitio y en donde se reportan periodos de hasta 4.0 s.

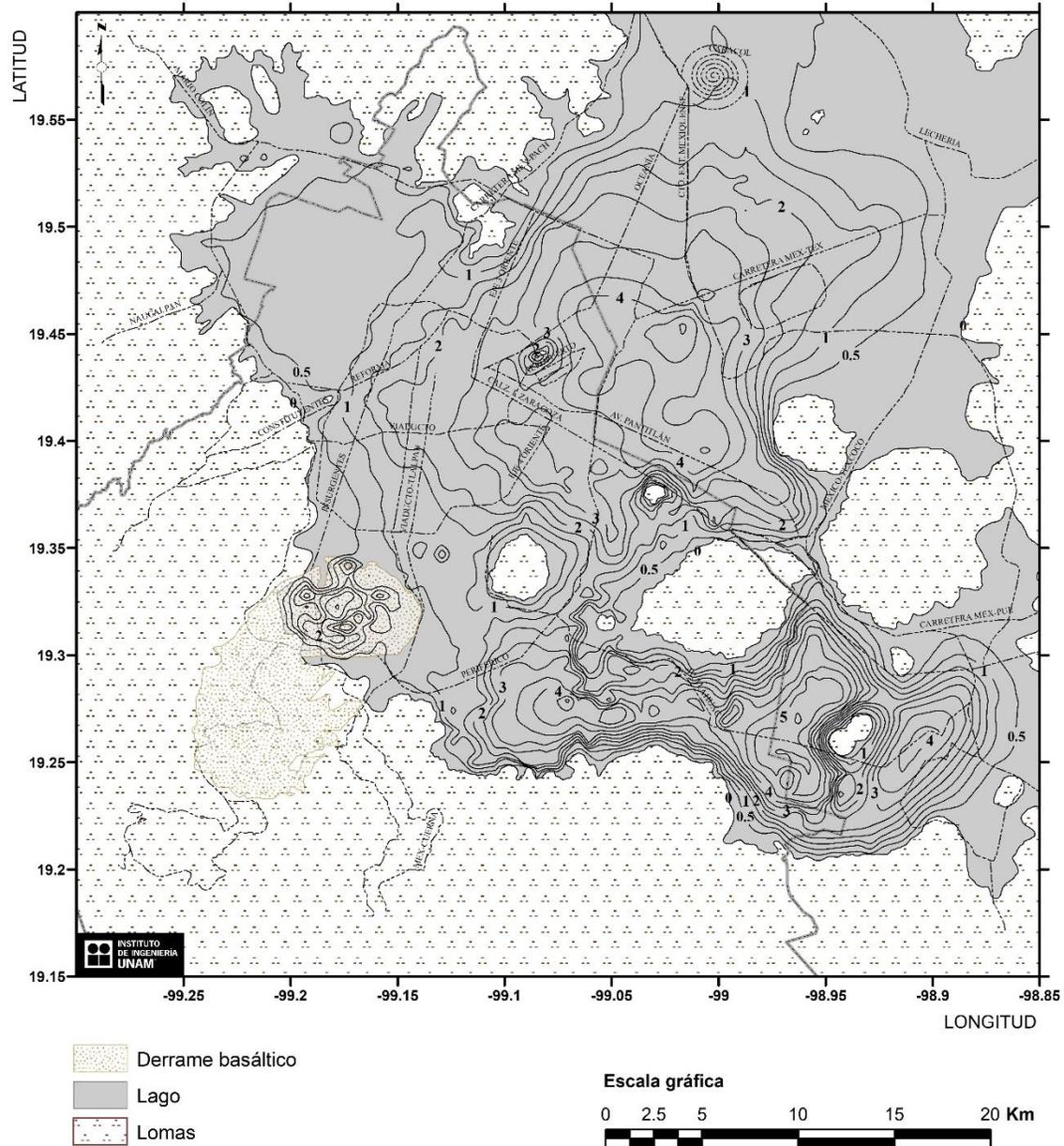


Figura 6.4. Mapa de periodos dominantes del suelo actualizado para la Ciudad de México y zonas aledañas. Las curvas de periodo se muestran cada 0.5 s.

Los valores de periodo más grandes registrados en la CMZA coinciden con las zonas más profundas de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. En el lago de Texcoco se encontraron periodos de hasta 5.0 s en el relleno sanitario (Bordo Poniente), en el lago de Xochimilco se registraron periodos mayores a los 5.0 s y en el lago de Chalco se registró el periodo más grande de toda la cuenca que tiene un valor de 5.9 s cerca del volcán Xico. La transición de periodos de la Sierra de Las Cruces hacia el lago de Texcoco es suave, comparada con la transición entre la Sierra de Chichinautzin y los lagos de Xochimilco y

Chalco, y entre la Sierra de Santa Catarina y el lago de Texcoco, en donde la transición es abrupta.

En la zona especial del derrame basáltico del volcán Xitle, al sur de la cuenca, se registraron periodos de hasta 2.0 s en Ciudad Universitaria por lo que se considera que este sitio tiene características diferentes a las mostradas en los demás lugares del valle, debido principalmente a su reciente origen y peculiar estratigrafía.

6.3. Relaciones entre el periodo y el espesor

En algunos puntos de los 285 sitios en donde se encontró información del espesor del suelo se realizaron mediciones de ruido sísmico para obtener el periodo. En los demás puntos, el valor del periodo se obtuvo interpolando del mapa de periodos dominantes obtenido en este trabajo. Con los valores de H_s y T_s para la zona de estudio se obtuvo la siguiente relación empírica no lineal.

$$H_s = 21.72 * T_s^{1.04} \quad (6.1)$$

La relación encontrada muestra una correlación aceptable entre los valores de periodo y espesor, aunque hay una gran dispersión entre 1.0 y 3.0 s (Figura 6.5), el valor b es muy parecido al de estudios semejantes, mientras que el valor de 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).

En la Figura 6.5 se muestra la relación potencial entre el periodo dominante y el espesor del suelo calculada en este trabajo y se compara con las relaciones publicadas por Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010). Entre las relaciones existen diferencias que es importante destacar. En primer lugar, las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010) consideran que el espesor es de 0 m cuando el periodo del sitio es 0.5 s, lo que no concuerda con la información recabado de sondeos geotécnicos y periodos dominantes. Entonces, la relación potencial calculada en este trabajo considera que debajo de los 0.5 s el espesor es diferente de 0 m.

En el rango de 0.6 a 2.0 s, las tres relaciones tienen valores de espesor similares, que van de los 10 hasta los 40 m aproximadamente. Para el valor de 1.0 s, las relaciones de Aguilar *et al.* (2003), Avilés *et al.* (2010) y la de este trabajo, se obtienen espesores de 21.9, 19.4 y 21.7 m, respectivamente. Para el caso de 2.0 s, los valores de espesor son 38, 33.7 y 44.7 m, respectivamente. Para periodos superiores a los 2.0 s, las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010) subestiman los valores de espesor de acuerdo con la información recabada.

Si se considera la relación entre periodo, espesor y velocidad del modelo de una capa de suelo blando sobre un semiespacio rígido, $T_s = (4 * \beta) / H_s$ (Kramer, 1996), se puede obtener una ecuación que relacione la velocidad en términos únicamente del periodo. La ecuación es la siguiente:

$$\beta = 86.88 * T_s^{0.04} \quad (6.2)$$

Esto significa que, si consideramos la estratigrafía de la CMZA como un modelo de un estrato de suelo sobre un semiespacio rígido, se puede utilizar una velocidad promedio de 86.88 m/s para el estrato de suelo. Este valor es útil para establecer un rango de variación cuando se quiere obtener una función de transferencia de una onda S con incidencia vertical o cuando se requiere invertir el cociente espectral HVNR.

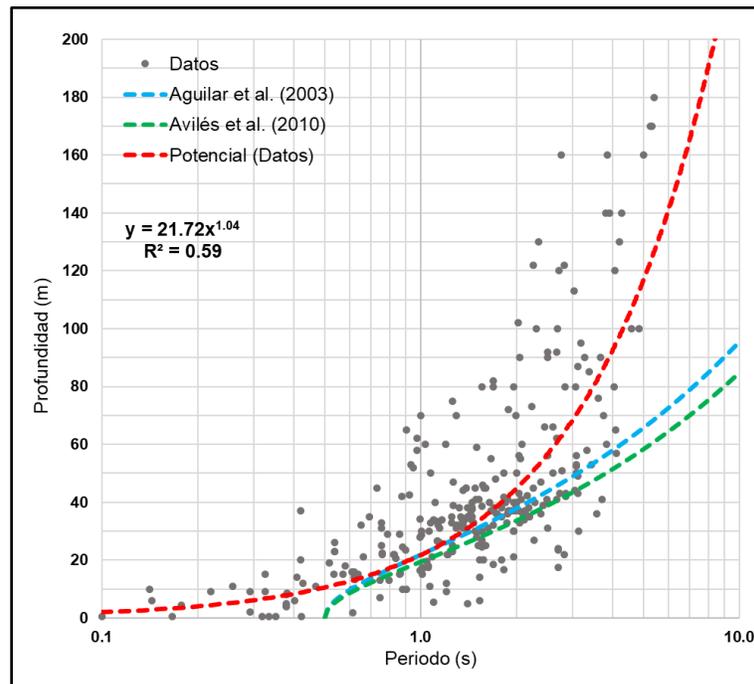


Figura 6.5. Relación potencial entre los periodos dominantes del suelo (T_s) y el espesor del suelo (H_s) para la CMZA. Se muestran también las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010).

6.4. Mapa de espesor del suelo

De acuerdo con la relación potencial encontrada en este trabajo, con información recabada del espesor del suelo en 285 sitios dentro de la CMZA, y los periodos dominantes de los 2464 puntos recolectados se puede construir el mapa de espesores del suelo para la zona de estudio (Figura 6.6).

Las curvas de igual espesor muestran la misma tendencia que las curvas de igual periodo. Entre el derrame basáltico del Xitle y el Cerro de la Estrella la variación es suave, al igual que la parte noroeste y noreste de la cuenca. En la subcuenca Xochimilco-Chalco, por el contrario, el cambio de profundidades es abrupto en especial en los límites de la sierra de Chichinautzin.

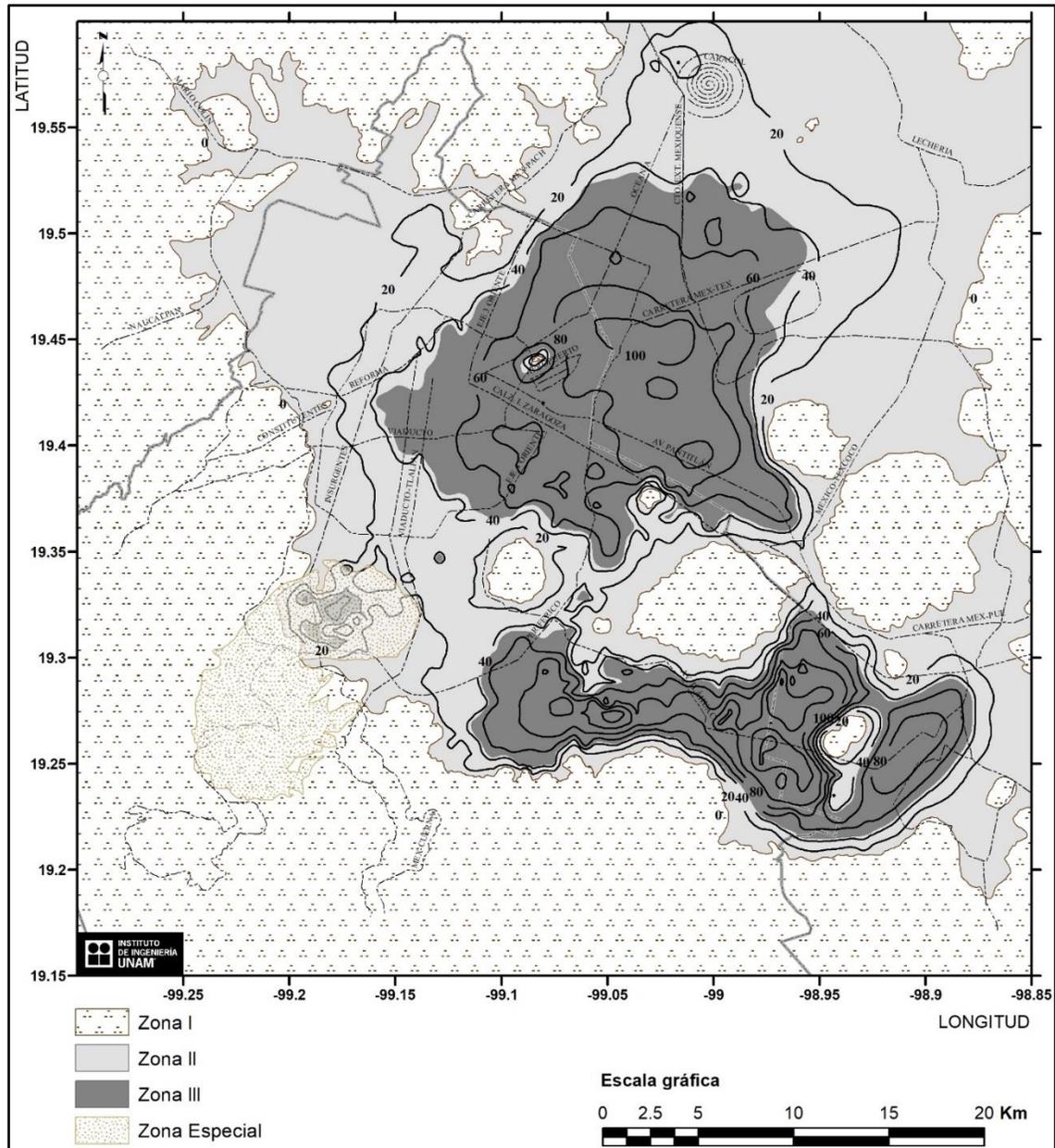


Figura 6.6. Mapa de espesor del suelo para la Ciudad de México y áreas aledañas. Las curvas de espesor se muestran cada 20 m.

Los espesores más grandes se ubican en la parte central de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. En Texcoco, el valor máximo de espesor llega hasta los 100 m. En Xochimilco y Chalco los espesores son mayores a 100 m, e incluso en la parte central de Chalco el espesor llega hasta 140 m aproximadamente.

La zona en donde se ubica el derrame basáltico del volcán Xitle muestra valores de espesor que no concuerdan con los datos reales debido al periodo dominante del suelo determinado. Este sitio se debe estudiar con mayor detalle debido a las características especiales que tiene.

7. Discusión

El mapa de periodos dominantes del suelo de este trabajo es el más completo y actualizado obtenido para la Ciudad de México y zonas aledañas, por lo que se puede incorporar directamente a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. Este mapa contiene más información en las zonas que carecían de datos de periodo dominante, como en el caso de la subcuenca de Xochimilco-Chalco, por lo que son pocas las áreas en las que falta información en la zona de estudio.

En cuanto al mapa de espesor del suelo, calculado en este trabajo por medio de la relación potencial $H_s = 21.72 * T_s^{1.04}$, difiere del mapa incluido en las NTCDS (GDF, 2004a) y de la actualización realizada por Juárez-Camarena *et al.* (2016) con información de 544 sondeos geotécnicos. Las grandes diferencias se encuentran en las zonas más profundas de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco.

En la zona del antiguo lago de Texcoco, el mapa de Juárez-Camarena *et al.* (2016) presenta un espesor máximo de 70 m entre los cerros del Peñón de los Baños y el Peñón del Marques. Para esta área, el mapa de este trabajo muestra un espesor de 80 m y de hasta 100 m en la parte del Bordo Poniente. De acuerdo con la información de los sondeos geotécnicos más cercanos a esta área, el espesor en el Bordo es de 52.4 m (Tecnosuelo, 2015, ver Anexo A) y en la zona de Nezahualcóyotl el espesor es de 65 m (Montes de Oca-Martínez, 2009, ver Anexo A). Por lo tanto, en la zona más profunda del antiguo lago de Texcoco, la relación potencial obtenida en este trabajo sobreestima el espesor del suelo.

Para el caso de la subcuenca de Xochimilco-Chalco la situación es diferente. En el límite del lago de Xochimilco con la Sierra de Chichinautzin, el espesor del suelo alcanza valores de hasta 56 m cerca del lago (Lermo *et al.*, 2019, ver Anexo A). En el límite con la Sierra de Santa Catarina, el espesor del suelo llega a los 90 m en el pozo Tulyehualco-1 (Unda-López, 2016, ver anexo A). El informe realizado por la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (CONAGUA-IMTA, 2017, ver Anexo A), con base en el análisis de los pozos de agua del ramal Tláhuac y estudios geofísicos electromagnéticos, determinó que el espesor del suelo arcilloso alcanza los 200 m cerca del centro del lago de Xochimilco.

Para el caso del antiguo lago de Chalco, hay varios trabajos que indican que el espesor del suelo es mayor a los 100 m. Chouteau *et al.* (1994) y Campos-Enríquez *et al.* (1997), con

información de pozos de agua y estudios geofísicos de gravimetría y magnetotelúricos, infieren que el espesor del suelo podría llegar a los 200 m. Ortega-Guerrero *et al.* (1997) menciona que la secuencia lacustre del antiguo lago de Chalco es la de mayor espesor de la Cuenca del Valle de México promediando 100 m y con espesor máximo de 300 m. Por otra parte, Vergara-Huerta y Aguirre (2020), proponen un modelo de velocidad sísmica unidimensional para la zona de Chalco, mediante la inversión conjunta del cociente espectral HVNR y la curva de dispersión de las ondas de Rayleigh. Este modelo indica que el espesor del suelo lacustre es de 140 m aproximadamente.

Es decir, el mapa propuesto por Juárez-Camarena *et al.* (2016) subestima el espesor del suelo en la subcuenca de Xochimilco-Chalco, de acuerdo con la información recabada, ya que muestra valores de hasta 50 m, con excepción del área entre el lago de Xochimilco y el lago de Chalco en donde el espesor llega hasta los 100 m. La relación potencial obtenida en este trabajo calcula para la misma zona valores mayores a los 100 m, llegando incluso a los 140 m en el centro del lago de Chalco. Por lo tanto, los valores obtenidos para la subcuenca de Xochimilco-Chalco en este trabajo se aproximan más a los valores reales de acuerdo con la bibliografía consultada.

Por otro lado, la importancia del periodo dominante y el espesor del suelo, aunado al periodo en el cual se concentró la energía del sismo y al periodo fundamental de las estructuras, consiste en brindar información para considerar si el efecto de sitio es relevante durante un sismo de gran magnitud. Por ejemplo, el sismo de subducción del 19 de septiembre de 1985 $M_w 8.1$ concentró su energía en periodos de 1.0 a 3.0 s (Campillo *et al.*, 1989). Las estructuras más afectadas, de 5 a 20 pisos con periodo estructural de aproximadamente 0.5 a 2.0 s, se ubicaron entre los periodos dominantes 1.9 y 2.8 s, y entre los 38 y 50 m de espesor (Mayoral *et al.*, 2019a; Meli *et al.*, 1989). Por otro lado, el sismo intraplaca del 19 de septiembre de 2017 $M_w 7.1$ concentró su energía entre los 0.15 y 1.0 s (Mayoral *et al.*, 2019a). Las estructuras dañadas para este sismo, de 5 a 8 pisos con periodo estructural entre 0.8 y 1.6 s, se ubicaron entre periodos dominantes de 0.8 y 1.5 s (Mayoral *et al.*, 2019a) y entre los 25 y 40 m de espesor (Galvis *et al.*, 2017).

En este trabajo se estimó el periodo dominante y espesor del suelo de los sitios en dónde se ubicaron las estructuras dañadas por los sismos de 1985 y 2017, de acuerdo con su distribución e interpolando directamente del mapa actualizado de periodo dominante y del mapa del espesor del suelo estimado mediante la relación potencial. En la Figura 7.1 se muestran las estructuras total o parcialmente colapsadas durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Meli *et al.*, 1986) y, las estructuras con riesgo alto y colapsadas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 (CICM *et al.*, 2017) sobre el mapa de periodos dominantes obtenido en este estudio.

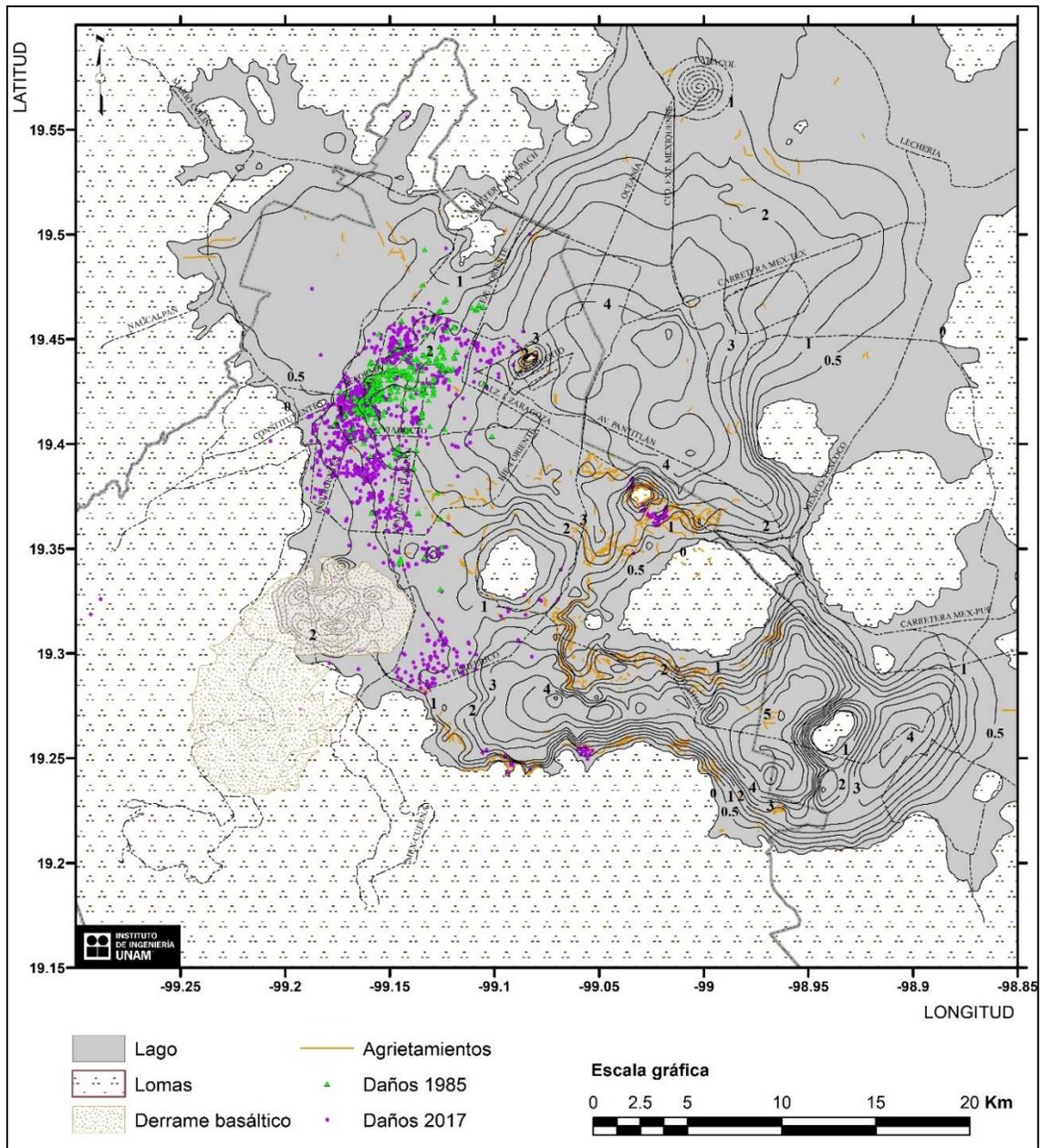


Figura 7.1. Estructuras total o parcialmente colapsadas debido al sismo del 19 de septiembre de 1985 $M_w 8.1$ (puntos verdes) y estructuras con riesgo alto y colapsadas debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 $M_w 7.1$ (puntos morados) sobre el mapa de periodos dominantes para la Ciudad de México y zonas aledañas. En color naranja se muestran las grietas en la Ciudad de México. (Meli *et al.*, 1986; CICM *et al.*, 2017; Mayoral *et al.*, 2019a).

Como resultado, la mayoría de las estructuras total o parcialmente colapsadas durante el sismo de 1985 se ubican entre los periodos dominantes de 1.5 a 2.4 s, y entre espesores del suelo de 30 a 50 m (Figura 7.2). Para el sismo de 2017, si se consideran las estructuras con riesgo alto, éstas se ubican entre periodos que van de 0.8 a 2.2 s, y espesores de 20 a 50 m

(Figura 7.3); y, si sólo se consideran las estructuras colapsadas durante el sismo del 2017, el periodo se ubica entre 1.0 y 1.5 s, y el espesor entre 20 y 35 m (Figura 7.3). Es importante hacer notar que, durante el sismo de 2017 colapsaron estructuras ubicadas en zonas con menor periodo dominante y espesor del suelo que aquellas estructuras colapsadas durante el sismo de 1985. Este resultado concuerda con Mayoral *et al.* (2019) para los dos eventos sísmicos.

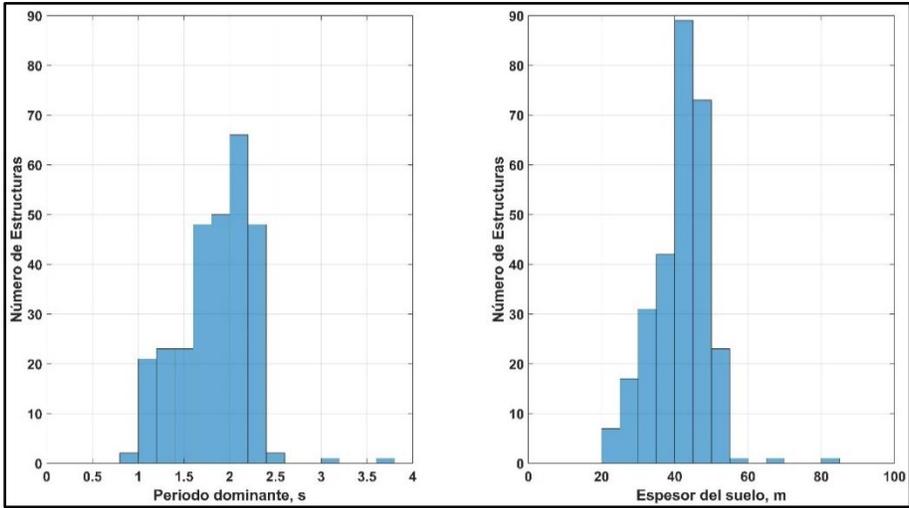


Figura 7.2. Estructuras total o parcialmente colapsadas por el sismo del 19 de septiembre de 1895 $M_w 8.1$ de acuerdo con el periodo dominante (izquierda) y el espesor del suelo (derecha) (Meli *et al.*, 1986).

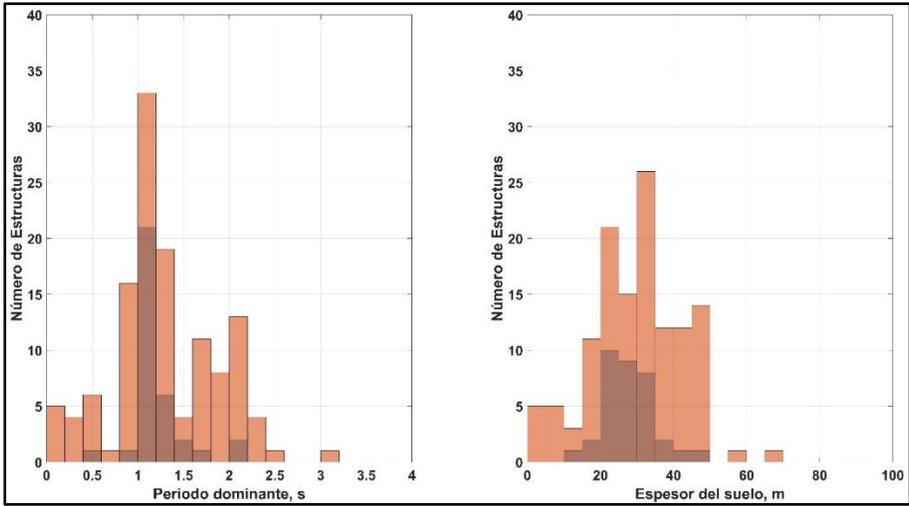


Figura 7.3. Estructuras con riesgo alto (color naranja) y estructuras colapsadas (color naranja oscuro) debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 $M_w 7.1$ de acuerdo con el periodo dominante (izquierda) y al espesor del suelo (derecha) (CICM *et al.*, 2017; Mayoral *et al.*, 2019a).

Singh *et al.* (2018) también localizaron los daños para los sismos de septiembre de 1985 y 2017 sobre un mapa de periodo dominante del suelo. Para el sismo de 1985, ellos ubican los daños entre 1.8 y 2.6 s, mientras que, para el sismo de 2017, entre 0.8 y 1.6 s (Figura 7.4). Además, Rodríguez (2020), en un estudio más local, ubica los daños del sismo de 2017 en periodos dominantes de 1.0 a 1.5 s.

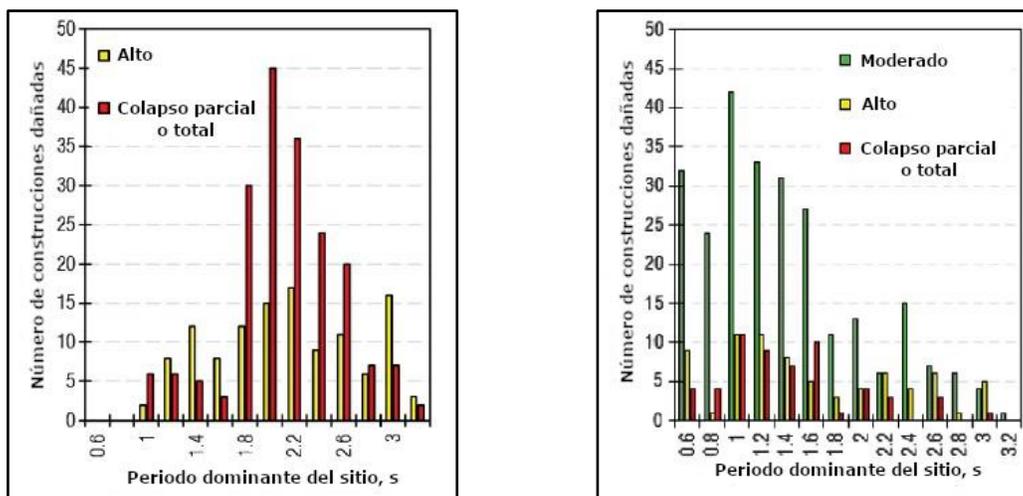


Figura 7.4. Distribución de los daños para el sismo de 1985 (izquierda) y 2017 (derecha) de acuerdo con el periodo dominante del suelo (Modificado de Singh *et al.*, 2018).

Mayoral *et al.* (2019a) realizaron un análisis de interacción suelo-estructura en tres dimensiones de las cimentaciones comunes de las construcciones encontradas en las áreas afectadas que muestra que la demanda sísmica en la estructura se incrementa para periodos estructurales cercanos a aquellos encontrados en las zonas de lago IIIa y IIIb (Figura 2.8). Ellos encontraron un “efecto de resonancia” en construcciones con periodo estructural (T_e), de alrededor de 1.01 s, y un periodo del suelo (T_s), de 0.9 a 1.2 s. Este efecto se acentuó debido a la concentración de energía a altas frecuencias (rango de periodos bajos 0.15 a 1.0 s) del movimiento sísmico registrado en la Ciudad de México en suelo firme. Por lo tanto, la conclusión a la que llegan Mayoral *et al.* (2019a), a partir de esta información, es que el efecto de sitio fue de gran importancia en ambos sismos debido a un efecto de “doble resonancia” entre el sismo, el suelo y la estructura, especialmente en las construcciones colapsadas (Figura 7.5). El concepto de “resonancia” está asociado a comportamiento elástico de la estructura; en el caso de comportamiento no lineal se consideraría simplemente como “efecto de aumento de demandas” en la zona en donde el periodo dominante del suelo es cercano al periodo fundamental de la estructura (Rodríguez, M, 2020, comunicación personal.).

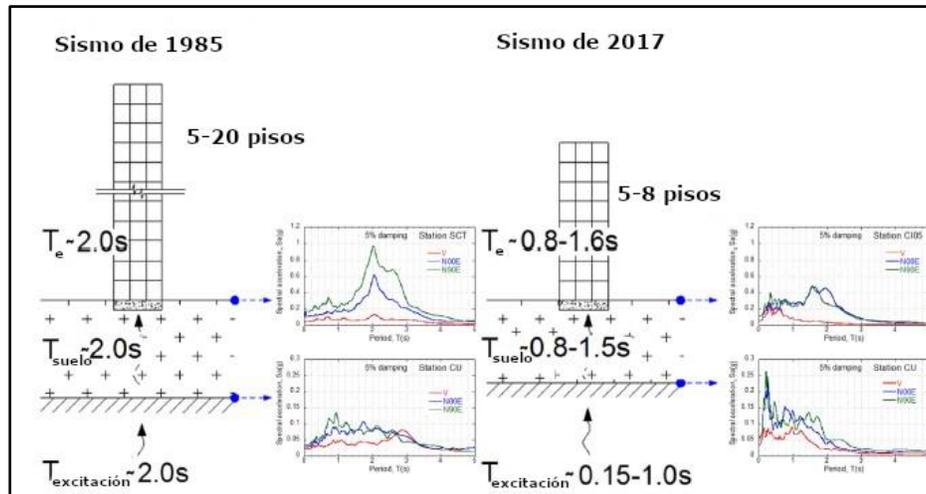


Figura 7.5. Efecto de “doble resonancia” durante los sismos del 19 de septiembre de 1985 (izquierda) y de 2017 (derecha). Se aprecian los espectros de respuesta en roca (estación CU para ambos sismos) y en la superficie (estación SCT para el sismo de 1985 y estación CI05 para el sismo de 2017) (Modificado de Mayoral *et al.*, 2019).

Por otro lado, Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo (2019), analizaron los daños a estructuras producidos por el sismo del 19 de septiembre de 2017 $M_w 7.1$ con información de reportes, visitas técnicas y redes sociales. Ellos concluyen que, para la Ciudad de México, el efecto de resonancia entre el suelo y la estructura no fue un factor determinante en los daños observados en las estructuras colapsadas, con el argumento de que “existen miles de estructuras en condiciones similares en la ciudad que no colapsaron”. Por lo tanto, los daños observados se deben a un mal diseño de la estructura y a una mala ejecución durante la construcción, además de algunos factores que agravaron el daño como el efecto esquina, irregularidades en planta, el golpeteo entre estructuras, etc. Si esto es cierto, ¿por qué no todas las construcciones mal diseñadas y con los problemas anteriormente mencionados sufrieron graves daños o colapsaron? El efecto de sitio también debió ser un factor importante.

De acuerdo con Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo (2019), el 81% de las estructuras dañadas en la Ciudad de México se ubica en un intervalo de periodos dominantes de 0.5 a 2.0 s, mientras que el 85% de las estructuras colapsadas se encuentra en este rango (Figura 7.6). Además, ellos calcularon el periodo fundamental de las estructuras colapsadas (T_e), mediante ecuaciones empíricas de acuerdo con el tipo estructural, y lo relacionaron con el periodo dominante del suelo (T_s). Con esto concluyen que el efecto de resonancia sobre las estructuras colapsadas no fue un factor determinante en los daños observados, ya que la relación entre T_e y T_s son menores que la unidad (Figura 7.7). Este argumento puede ser cuestionable, debido al valor de T_e , el cual ellos mismos indican que es para estructuras que no han sufrido daños, y el valor de T_s , que no se menciona de dónde se obtuvo y que comienza a partir de los 0.5 s, ignorando valores más bajos. Además, Rodríguez (2020) menciona que las estructuras de 5 a 10 pisos, con periodos T_e entre 1.0 y 1.5 s, mostraron los mayores daños

durante el sismo de 2017 y se ubican justamente en periodos dominantes entre 1.0 y 1.5 s, en la zona de estudio analizada.

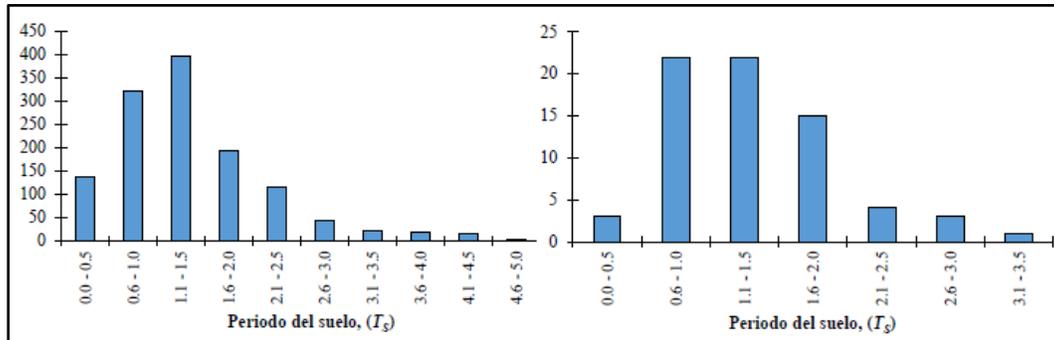


Figura 7.6. Distribución de todas las estructuras dañadas en la Ciudad de México (izquierda) y los colapsos parciales o totales (derecha) según el periodo dominante del suelo (Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo,2019).

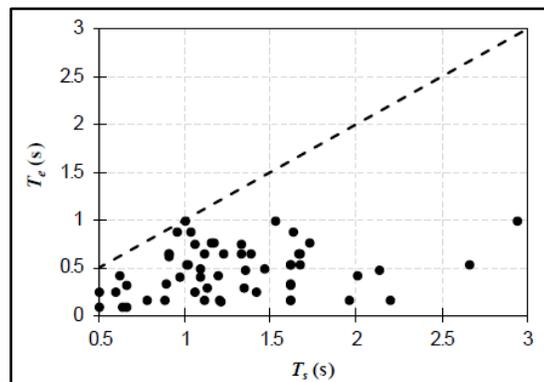


Figura 7.7. Estructuras colapsadas en la Ciudad de México según la relación periodo elástico de la estructura (T_e) y periodo dominante del suelo (T_s) de acuerdo con Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo (2019).

De acuerdo con la distribución de los daños ocasionados por los sismos de 1985 y 2017, se puede afirmar que el efecto de sitio fue relevante, debido a que las estructuras colapsadas se ubican en dos zonas que varían en cuanto al periodo dominante y al espesor del suelo, pero no es el único factor por considerar. Como lo menciona Buendía-Sánchez y Reinoso-Angulo (2019), el mal diseño y los factores adicionales contribuyeron de forma importante al colapso, sobre todo para el caso del sismo de 2017. Por último, quizá el factor más importante para el colapso de las estructuras durante el sismo de 2017 sea el “daño sísmico acumulado”, ya que la mayoría de las construcciones que colapsaron se construyeron antes de 1985 y, por ende, estuvieron sometidas a las aceleraciones producidas por ambos terremotos (Rodríguez, 2020).

8. Conclusiones

Con la información de 2464 puntos de periodos dominante del suelo se actualizó el mapa para la Ciudad de México y zonas aledañas. Se definieron mejor las zonas de la subcuenca de Xochimilco-Chalco, la zona entre la sierra de Santa Catarina y el cerro El Pino, el área de Texcoco, así como la alcaldía Coyoacán en donde se registraron periodos mayores a 1.0 en la zona del derrame basáltico del Xitle, generalmente considerado como zona sin efecto de sitio. Los valores de periodo más grandes, mayores a 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.

Con la información del espesor del suelo en 285 sitios en la CMZA se encontró la relación potencial $H_s = 21.72 * T_s^{1.04}$ entre el periodo dominante y el espesor del suelo. En esta relación se consideran periodos a partir de 0.1 s, que difiere de las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010) las cuáles consideran periodos a partir de los 0.5 s en donde el espesor nominal es cero. En el rango de 0.6 a 2.0 s, las tres relaciones tienen valores de espesor similares, que van de los 10 hasta los 40 m aproximadamente. A partir de los 2.0 s, las relaciones de Aguilar *et al.* (2003) y Avilés *et al.* (2010) subestiman el espesor del suelo.

El mapa de espesor del suelo 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_s . Los espesores más grandes se ubican en las partes centrales de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, alcanzando valores de hasta 140 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. Los valores de espesor difieren de los publicados en las NTCDS (GDF, 2004a) y por Juárez-Camarena *et al.* (2016), sobre todo en la subcuenca de Xochimilco-Chalco en donde se subestiman los espesores de acuerdo con la literatura. En la zona del derrame basáltico del Xitle el espesor no concuerda con los datos observados debido al valor de periodo dominante registrado, por lo que es necesario estudiar esta área de manera detallada.

Finalmente, de acuerdo con la distribución de las estructuras colapsadas, debido a los sismos de 1985 y 2017, en los mapas de periodo dominante y el espesor del suelo, se tiene que: para el sismo de subducción del 19 de septiembre de 1985 $M_w 8.1$ las estructuras colapsadas se ubicaron en periodos de 1.5 a 2.4 s y espesores de 30 a 50 m; mientras que para el sismo intraplaca del 19 de septiembre de 2017 $M_w 7.1$, entre periodos de 1.0 a 1.5 s y espesores de 20 a 35 m. El efecto de sitio fue relevante en ambos sismos, aunque otros factores contribuyeron de forma importante al colapso de las construcciones como el mal diseño o el daño sísmico acumulado.

9. Bibliografía

1. Aguilar, H. R., Galicia, M., Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J., Vieitez, L. y Salazar, M. 2003. Efecto del hundimiento regional en las propiedades dinámicas del suelo. *Centro de Investigación Sísmica AC*, México D.F.
2. Anderson, J. G., Bodin, P., Brune, J. N., Prince, J., Singh, S. K., Quaas, R. y Oñate, M. 1986. Strong Ground Motion from the Michoacan, Mexico, Earthquake. *Science*. Vol. 233, pp. 1043-1049.
3. Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, J. y Vásquez-Serrano, A. 2019. Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*. Vol. 15, No. 2, pp. 320-332.
4. Auvinet, G., Méndez, E. y Juárez, M. 2016. El subsuelo de la Ciudad de México. Volumen III. Instituto de Ingeniería, UNAM.
5. Avilés, J. y Pérez-Rocha, L. E. (2010). Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 29-39.
6. Bard, P. 1999. Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées et Observatoire de Grenoble, LGIT/RIGM, France.
7. Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. y Bard, P. Y. 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth Science Reviews*, Vol. 79, pp. 205-227.
8. Brammerini, F., Castenetto, S. y Naso, G. 2015. Guidelines for seismic microzonation. Civil Protection Department., Italy.
9. Buendía-Sánchez, L. M. y Reinoso-Angulo, E. 2019. Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 101, pp. 19-35.
10. Campillo, M., Gariel, J. C., Aki, K. y Sánchez-Sesma, F. J. 1989. Destructive strong ground motion in Mexico City: source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 6, pp. 1718-1735.
11. Campos-Enríquez, J. O., Delgado-Rodríguez, O., Chávez-Segura, R., Gómez-Contreras, P., Flores-Márquez, E. L. y Birch, F. S. 1997. The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data. *Geophysics*, Vol. 62, No. 1, pp. 23-35.
12. Chouteau, M., Krivochieva, F., Rodríguez-Castillo, R., González-Morán, T. y Jouanne, V. 1994. Study of the Santa Catarina aquifer system (Mexico Basin) using magnetotelluric soundings. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 31, pp. 85-106.
13. CICM, SMIE, SMIG y AI. 2017. Resumen preliminar de daños de los inmuebles inspeccionados por las brigadas del CICM del sismo del 19/09/2017. México.
14. Díaz-Rodríguez, J. A. 2006. Los suelos lacustres de la Ciudad de México. México.
15. Esteva, L. 1977. Microzoning: models and reality. In World Conference on Earthquake Engineering. 6th, New Delhi, 1977. Proceedings: pp. 27-43.

-
-
16. 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.
 17. Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2004a. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS), Gaceta Oficial del Distrito Federal.
 18. Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2004b. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF). Gaceta Oficial del Distrito Federal.
 19. Gobierno de la Ciudad de México (GCM). 2016. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
 20. Gobierno de la Ciudad de México (GCM). 2017. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
 21. Huerta-Espinoza, O. 2019. Evaluación del efecto de sitio y zonificación sísmica en la alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 22. Ibs-von Seht, M. y 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.
 23. Ito, E., Nakano, K., Nagashima, F. y Kawase, H. 2020. A Method to Directly Estimate S-Wave Site Amplification Factor from Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Earthquakes (eHVSRS). *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. XX, pp. 1-20.
 24. Juárez-Camarena, M., Auvinet-Guichard, G. y Méndez-Sánchez, E. 2016. Geotechnical zoning of Mexico valley subsoil. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. 17, No. 3, pp. 297-308.
 25. Kramer, S. L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.
 26. Legorreta, J. 2006. El agua y la Ciudad de México. De Tenochtitlan a la megalopolis del siglo XXI. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
 27. Lermo, J., Rodríguez, M. y Singh, S. K. 1998. Natural period of sites in the Valley of Mexico from microtremor measurements. *Earthquake Spectra*. Vol. 4, No. 4.
 28. Lermo, J. y Chávez-García, F. J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, No. 5, pp. 1574-1594.
 29. Lermo, J. y Chávez-García, F. J. 1994a. Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
 30. Lermo, J. y Chávez-García, F. J. 1994b. Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 13, pp. 413-423.
 31. Lermo, J., Martínez, J., Angulo, J. y 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.

-
-
32. Lermo, J., Ramos-Pérez, E., Álvarez-Monroy, I. y Sánchez-Sesma, F.J. 2020. Actualización de la zonificación sísmica de la CDMX y áreas aledañas. *Ingeniería Civil CICM*, No 608 pp14-18.
 33. Marsal, R.J. y Mazari, M. 2016. The Subsoil of Mexico City. Volúmenes I y II. Reedición realizada por el Instituto de Ingeniería, UNAM.
 34. 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 para obtener el título de Ingeniero Geofísico. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 35. 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.
 36. Martínez-González, J. A., Lermo, J., Vergara-Huerta, F. y Ramos-Pérez, E. 2015. Avances en la zonificación sísmica de la Ciudad de México y zona de Chalco, Edo de Mex., propuesta de nuevo mapa de periodos dominantes para las NTC para Diseño por Sismo del Reglamento del D. F. *XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, Guerrero.
 37. Mayoral, J. M., Asimaki, D., Tepalcapa, S., Wood, C., Roman-de la Sancha, A., Hutchinson, T., Franke, K. y Montalva, G. 2019a. Site effects in Mexico City Basin: Past and present. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 121, pp. 369-382.
 38. Mayoral, J. M., Tepalcapa, S., Roman-De la Sancha, A., El Mohtar, C. S. y Rivas, R. 2019b. Ground subsidence and its implication on building seismic performance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 126.
 39. Meli, R., Miranda, E., López, C. y López-Bátiz, O. 1986. Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la CDMX. Instituto de Ingeniería, UNAM.
 40. Meli, R., EERI, M. y Ávila J. A. 1989. The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – Analysis of building response. *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-17.
 41. Molnar, S., Cassidy, J. F., Castellaro, S., Cornou, C., Crow, H., Hunter, J. A., Matsushima, S., Sánchez-Sesma, F. J. y Young, A. 2018. Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art. *Survey in Geophysics*, Vol. 39, pp. 613-631.
 42. Mooser, F. 2018. *Geología del Valle de México y otras regiones del país. Volumen I*. CICM, Ciudad de México.
 43. Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, Vol. 30, pp. 25-30.
 44. Nogoshi, M. e Igarashi, T. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). *Journal of the Seismological Society of Japan*, Vol. 24, No. 1, pp. 26-40.
 45. Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D. L. y Cherry, J. A. 1997. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modelling. *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 11, pp. 3327-3341.
 46. Parolai, S., Bormann, P. y 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.

-
-
47. Perron, V., Gélis, C., Froment, B., Hollender, F., Bard, P. Y., Cultrera, G. y Cushing, E. M. 2018. Can broad-band earthquake site responses be predicted by the ambient noise spectral ratio? Insight from observations at two sedimentary basins. *Geophysical Journal International*, Vol. 215, pp. 1442-1454.
 48. Rodríguez, M. E. 2020. The interpretation of cumulative damage from the building response observed in Mexico City during the September 19, 2017 Earthquake. Artículo aceptado para su publicación en la revista *Earthquake Spectra*.
 49. Rodríguez, M. 2017. Exploración sísmica del NAICM. México.
 50. Rosenblueth, E. 1979. Seismic design requirements in a Mexican 1976 code, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 7, pp. 49-61.
 51. Rosenblueth, E., M. EERI, Ordaz, M., Sánchez-Sesma, F. J. y Singh, S. K. 1989. Design spectra for Mexico's Federal District. *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 1.
 52. Rosenblueth, E., García-Acosa, V., Rojas-Rabiela, T., de la Peña-Núñez, F. J., Orozco-Castellanos, J. 1992. *Macrosismos*. México.
 53. Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suárez, M., Santoyo, M. A. y Rodríguez-Castellanos, A. 2011. A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, Vol. 186, pp. 221-225.
 54. Santoyo-Villa, E., Ovando-Shelley, E., Mooser, F. y León-Plata, E. 2005. Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México. TGC Geotecnia.
 55. SESAME. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. European Research Project.
 56. Siebe, C. 2009. La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670±35 años AP y sus implicaciones. México.
 57. Singh, S. K., Reinoso, E., Arroyo, D., Ordaz, M., Cruz-Atienza, V., Pérez-Campos, X., Iglesias, A. y Hjörleifsdóttir, V. 2018. Deadly Intraslab Mexico Earthquake of 19 September 2017 (M_w 7.1): Ground Motion and Damage Pattern in Mexico City. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 6, pp. 2193-2203.
 58. Servicio Sismológico Nacional (SSN). 2017. Reporte especial. Sismo del 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1).
 59. Támez, E., Santoyo, E., Mooser, F. y Gutiérrez C. 1987. Manual de diseño geotécnico. Volúmen I. *Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR)*. Departamento del Distrito Federal.
 60. Thabet, M. 2019. Site-specific relationships between bedrock depth and HVSR fundamental resonance frequency using KiK-NET data from Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, pp. 4809-4831.
 61. Vergara-Huerta, F. 2015. Modelo de velocidad sísmica en la subcuenca de Chalco, Edo. De México, mediante análisis de cocientes H/V de vibraciones ambientales. Tesis de maestría en sismología, Posgrado de Ciencias de la Tierra, UNAM.
 62. Vergara-Huerta, F., Aguirre, J. 2020. One-dimensional seismic velocity model of the sub-basin of Chalco, Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 300.

Anexo A. Bibliografía de los valores de espesor del suelo

1. Aguilera-Jiménez, P. 2013. *Catedral Metropolitana. Hundimiento y rescate*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
2. Alcaraz-Bustos, N. D. 2019. *Análisis y diseño de la cimentación del cuerpo de cafetería del Centro de Estudios Navales en Ciencias de la Salud ubicado en la Ciudad de México*. Tesina para obtener el título de Especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
3. Álvarez-Rivero, O. A. 2008. *Diseño geotécnico para establecer el proceso constructivo de una excavación profunda en Zona de Lago*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
4. Amador-García, C. 2003. *Estudio de mecánica de suelos realizado para dos edificios de Nextel, ubicados en Tlalnepantla, Estado de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. ENES Aragón, UNAM.
5. Amezcua-Pastrana, X. P. 2019. *Evaluación geotécnica estructural de la cimentación de un edificio de 11 niveles reforzado debido al sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017*. Tesina para obtener título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
6. Arce, J. L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J. I., Macías-Romo, M. C., Morales-Casique, E., Escolero, O. y Lenhardt, N. 2015. Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 67, No. 2, pp. 123-143.
7. Arellano-Verástegui, H. 2011. *Estudio geotécnico para la construcción de un edificio de seis niveles y dos sótanos en zona de Transición Alta*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
8. Arenas-Flores, G. 2005. *Diseño geotécnico y procedimiento constructivo de la cimentación de un edificio de departamentos que se construirá en la colonia Hipódromo Condesa de la delegación Cuauhtémoc, en la Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. ENEP Aragón, UNAM.
9. Arias-Ocampo, I. L. 2005. *Estudio geotécnico para un edificio de seis niveles y dos sótanos en la colonia Roma*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
10. Barrera-Villagrán, G. 2017. *Análisis de las causas del asentamiento diferencial y propuesta de la corrección geométrica del edificio de la CTM ubicada en Ignacio L. Vallarta No. 8, Col. Tabacalera, delegación Cuauhtémoc, Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Acatlán, UNAM.
11. Caballero-Rodríguez, E. 2017. *Construcción de la estructura de la estación insurgentes sur, de la línea 12 del metro, en la Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
12. Carmona-Sanabria, M. V. 2017. *Diseño geotécnico para un edificio de dos sótanos, planta baja y trece niveles superiores en Zona de Lago*. Tesis para obtener el título de Ingeniera Civil. FES Aragón, UNAM.
13. Carreón-Freyre, D. C. 2011. *Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la delegación Iztapalapa del Distrito Federal*. Trabajo de ingreso a la Academia de Ingeniería de México.

-
-
14. Castellanos-Pedroza, I. 2003. *Efectos de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica de un puente vehicular en la Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Maestra en Ingeniería (Estructuras). Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, UNAM.
 15. CFE. 2017. *Exploración geotécnica ejecutada por la CFE en el NAICM*. Informe técnico.
 16. CGS. 2008. *Estudio de mecánica de suelos en Av. Paseo de la Reforma No. 380 Col. Juárez, México DF*. Informe Técnico.
 17. CIMTEC. 2018. *Estudio del subsuelo en el terreno ubicado en Av. Cuauhtémoc No. 726, Col. Narvarte, Ciudad de México*. Informe Técnico.
 18. CONAGUA-IMTA. 2017. *Determinación del origen de la contaminación en pozos de los ramales Tláhuac (Netzahualcóyotl) y Mixquic-Santa Catarina y estudio de alternativas de tratamiento para entrega de agua potable en los puntos denominados: Viveros-Cuenca Lechera y Hospital Psiquiátrico, Distrito Federal*. Informe técnico.
 19. Correa-Giraldo, V. M. 2005. *Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura en tres edificios instrumentados en México*. Tesis para obtener el título de Maestra en Ingeniería (Estructuras). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
 20. Cruz-López, M. 2007. *Determinación experimental de los efectos de interacción suelo-estructura en dos edificios localizados en la Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 21. Cruz-Sagastume, O. 2007. *Construcción de la cimentación de un conjunto habitacional en Arcos de Aragón, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 22. Duarte-Colorado, J. I. 2019. *Estudio geotécnico para la construcción de un edificio de cuatro sótanos y quince niveles superiores en Zona de Lomas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 23. Escamilla-Estrada, A. y Palacios-Sánchez, E. 2009. *Hundimiento regional del valle de México y el STC (estudio de caso, tramo terminal aérea-Oceanía de la línea 5 del metro)*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 24. Escamilla-Gálvez, J. A. 2018. *Cimentación de un conjunto habitacional de 3 niveles en zona de Lomas en la Ciudad de México*. Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 25. Farca-Amiga, M. 2010. *Procedimiento constructivo de la cimentación y factibilidad técnica económica para construir un edificio de oficinas en la Av. Insurgentes 1647, México D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 26. Flores-Reyes, M. A. 2013. *Diseño geotécnico de cimentación para un edificio de semisótano más planta baja y tres niveles en la colonia Narvarte, México DF*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. ESIA Zacatenco, IPN.
 27. García-Benítez, S. R. 2018. *Estudio de exploración geotécnica de la parcela Mixquic en el pueblo de San Andrés Mixquic, alcaldía de Tláhuac, Ciudad de México*. Informe Técnico.
 28. García-Mendoza, F. 2009. *Proyecto estructural del puente vehicular ubicado en la autopista Los Remedios-Ecatepec tramo: Puente de Vigas-Calzada Vallejo*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.

-
-
29. García-Rodríguez, J. G. 2009. *Procedimiento constructivo de la cimentación del proyecto Reforma 27*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 30. González-Martin, D. A. 2014. *Instrumentación sismo-geotécnica de una cimentación profunda formada por dos pilas oblongas y una zapata-columna*. Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 31. González-Morán, T. 1992. *Estudio hidrogeofísico de la subcuenca de Chalco; evaluación de impacto ambiental del basurero de Santa Catarina*. Tesis para obtener el título de Doctor en Geofísica. Unidad de Posgrado, UNAM.
 32. González-Paredes, M. 2009. *Estudio geotécnico para las alternativas de cimentación de un edificio de 7 niveles y dos cajones en Zona de Lago*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 33. Gutiérrez-Castruita, T. E. 2010. *Estudio de mecánica de suelos realizado para la construcción del hotel Holiday Inn Ciudad de México Atizapán, ubicado en avenida Ruíz Cortínez No. 90, colonia Lomas de Atizapán, municipio de Atizapán de Zaragoza, Estado de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 34. Guzmán-Ocaranza, V. E. 2006. *Procedimiento de construcción de la cimentación del nuevo Museo Universitario de Arte Contemporáneo*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 35. Hernández-Aguilar, S. 2011. *Supervisión de obra del proyecto de construcción, mantenimiento, adecuación y rehabilitación de la escuela primaria "Benito Juárez" de la colonia, Roma, delegación Cuauhtémoc Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 36. Hernández-García, M. A. 2019. *Análisis geotécnico para la cimentación de un edificio, ubicado en la calle Bismarck No. 18 colonia Moderna, delegación Benito Juárez, CD. MX*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 37. Hernández-Medina, H. J. *Estudio de mecánica de rocas para la cimentación de un edificio de 14 niveles y dos sótanos en zona pétreo de la CD. De México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 38. Hernández-Velasco, E. 2013. *Análisis de interacción dinámica suelo-estructura de un edificio desplantado en la Zona de Lago de la Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
 39. Hinojosa-Marin, J. 2010. *Comportamiento del suelo en la zona próxima al Cerro del Marqués y sus efectos en obras de infraestructura*. Tesis para obtener el título de Maestro en Ciencias (Mecánica de suelos). ESIA Sección de estudios de posgrado e investigación, IPN.
 40. IPISA. 2014. *Informe final de exploración geotécnica para la ampliación de la línea 12 tramo Mixcoac-Observatorio*. Informe Técnico.
 41. Isidoro-Coyolt, C. 2016. *Interacción dinámica suelo-estructura*. Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
 42. Jamaica-Rodríguez, J. F. 2005. *Planeación e integración del desarrollo habitacional "El Refugio" localizado sobre la avenida Bernardo Quintana, en la Loma, Zedec Santa Fe, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.

-
-
43. Jiménez-Suárez, J. A. 2010. *Estudio de mecánica de suelos realizado para la construcción del Hospital General Regional No. 2 de traumatología y ortopedia, del IMSS, ubicado en Calzada de las Bombas No. 117, colonia Los Girasoles, delegación Coyoacán, México, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 44. Lermo-Samaniego, J. F., Ramos-Pérez, E., Álvarez-Monroy, I., Zúñiga, A., Jiménez-Méndez, N., Luna-Cruz, J. I., Machado-González, O. R. y Téllez-Rodríguez, N. A. 2019. *Asesoría técnica en aspectos geotécnicos y geo-sísmicos de la carretera vieja Xochimilco-Tulyehualco.* Reporte técnico. Instituto de Ingeniería, UNAM.
 45. Lermo, J., Cabrera, R., Cesati, G. y Ortega, R. 1990. *Estimación del periodo dominante del subsuelo en 18 sitios del D.F. utilizando mediciones de velocidad de ondas de cortante en pozos, microtemores y movimientos fuertes.* Congreso Nacional de Mecánica de Suelos, San Luis Potosí, México.
 46. López-Cirigo, I. A. 2012. *Estudio experimental de la respuesta estructural de la columna de un tramo típico del viaducto Bicentenario.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 47. Lozada-Romero, V. 2010. *Procedimiento constructivo de lumbreras, caso de estudio: construcción de una lumbrera para el proyecto de saneamiento del Valle de México.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 48. Lozano-Lozano, H. C. Estudio de mecánica de suelos para una cimentación sobrecompensada construida en la Zona de Lago. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 49. Madariaga-Soto, E. C. 2009. *Descripción del procedimiento constructivo para el puente vehicular ubicado en el cruce de Av. Fray Servando Teresa de Mier y eje 3 Francisco del Paso y Troncoso.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 50. Martínez-Zárate, D. 2012. *Estudio del movimiento sísmico en el municipio de Naucalpan de Juárez.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Acatlán, UNAM.
 51. Maya-Gómez, R. 2012. *Estudio de mecánica de suelos y proceso constructivo de la excavación para la cimentación de un edificio de seis niveles y dos y medio sótanos en Zona de Transición.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 52. Mendoza-Santana, J. D. 2018. *Espectros de diseño sísmico para un sitio del Valle de México con diferentes criterios de análisis.* Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 53. Minor-García, O. 2014. *Comparación entre dos posibles soluciones al diseño estructural, en 1930 y contemporánea, para el edificio "La Nacional", primer rascacielos de México.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 54. Monroy-Vargas, R. 2010. *Estudio de mecánica de suelos de un predio para la preparatoria "Venustiano Carranza" ubicado en la colonia Aeronáutica Militar, México, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 55. Montes de Oca-Martínez, C. A. 2009. *Análisis geotécnico y propuesta de cimentación para el hospital Starmédica, ubicado en el Edo. De México.* Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.

-
-
56. Montes de Oca-López, H. A. 2018. *Estudio geotécnico para un edificio construido por dos sótanos y medio, planta baja, nueve niveles superiores en la Zona de Lago*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 57. Montiel-Alvarado, M. 2010. *Estudio geotécnico para la ejecución de una excavación profunda en Zona de Lomas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 58. Neri-Tlatenchi, A. I. 2009. *Estudio geotécnico del puente vehicular Chimalhuacán, ubicado en el límite del Distrito Federal y el Estado de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 59. Ortega-Cervantes, M. A. 2010. *Diseño geotécnico de la estación Mexicaltzingo, línea 12 del metropolitano, ubicada en la intersección del eje 8 sur y calzada de la viga, Iztapalapa, México D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. ESIA Zacatenco, IPN.
 60. Ortega-Rojas, D. 2005. *Análisis geotécnico para determinar la factibilidad de existencia de cavidades en un terreno ubicado en Atizapán de Zaragoza, Estado de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. ENEP Aragón, UNAM.
 61. Ortiz-Pérez, M. E. y Vallejo-Merino, Román. 2007. *Proceso constructivo de la cimentación del hospital de la Marina, ubicado en eje 2 Ote. y calzada De la Virgen*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 62. Osorio-Santiago, J. C. 2007. *Evaluación del comportamiento estructural de una estructura continua tipo cajón de concreto reforzado en suelo compresible*. Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
 63. Otero-Cano, R. 2004. *Estudio geotécnico para un edificio habitacional del tipo interés social de cinco niveles ubicado en la calle de Bélgica No. 216, Col. Portales, delegación Benito Juárez, México, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. ENEP Aragón, UNAM.
 64. Pérez-Escobar, O. A. 2017. *Estudio de mecánica de suelos, para la revisión de estructuras que integran el multifamiliar Tlalpan ubicado en la colonia Educación, en la delegación Coyoacán, en la Cd. De México*. Informe Técnico.
 65. Pérez-López, F. 2009. *Estudio geotécnico para un edificio de cinco niveles y cinco sótanos en Zona de Lomas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 66. PGI. 2007. *Estudio de mecánica de suelos para el proyecto de renivelación del edificio "B" de la unidad habitacional Zaragoza, Iztapalapa*. Informe Técnico.
 67. PGI. 2007. *Estudio de mecánica de suelos para la unidad habitacional Plaza Estrella, Iztapalapa*. Informe técnico.
 68. PGI. 2007. *Reporte preliminar para la renivelación del edificio "H" de la unidad habitacional Benito Juárez, Iztapalapa*. Informe Técnico.
 69. Pérez-Osorio, J. J. 2004. *Contribución a los estudios de zonificación geotécnica del área del exlago de Texcoco y zonas aledañas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Acatlán, UNAM.
 70. Ramírez-Aguirre, A. 2017. *Procedimientos constructivos de la cimentación del proyecto Mítikah*. Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.

-
-
71. Ramírez-Calderón, J. Z. 2010. *Respuesta sísmica de un paso vehicular elevado considerando movimientos incoherentes del terreno*. Tesis para obtener el título de Maestra en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
 72. Ramírez de Arellano-De la Peña, C. A. 2012. *Diseño geotécnico de la lumbrera 04 del Túnel Emisor Oriente*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 73. Rodríguez-Cortés, E. A. 2015. *Procedimientos constructivos especiales en la cimentación de las autopistas Urbana Norte y Sur de la Ciudad de México*. Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 74. Rodríguez-Ortiz, J. L. 2009. *Estudio geotécnico para el proyecto de la cimentación de un puente vehicular en la intersección del Periférico (Arco Norte) con la Av. Centenario, delegación Gustavo A. Madero*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 75. Romero-Hernández, C. R. 2011. *Construcción de la cimentación en la calzada Desierto de los Leones No. 67, esquina Insurgentes y Cracovia*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 76. Ruvalcaba-García, P. 2010. *Proyecto y construcción del puente vehicular en el cruce del Circuito Interior y eje Ocho Sur en la Cd. De México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 77. SACMEX. 2016. *Calidad del agua en el predio de Av. Aztecas 215, Pblo. Los Reyes Hueytlilac, delegación Coyoacán*. Dictamen técnico.
 78. Saldaña-Rivera, R. C. 2005. *Estudio geotécnico para la construcción de un edificio de doce niveles, en el predio ubicado en Arquímedes No. 205, colonia Polanco, delegación Miguel Hidalgo, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 79. Sánchez-Lara, E. 2012. *Estudio de mecánica de suelos realizado para la construcción de una planta de bombeo, ubicada en la delegación Xochimilco, México, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 80. Sánchez-Vera, J. A. 2009. *Procedimiento constructivo de los edificios centrales del plantel Cuauhtepac, de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Acatlán, UNAM.
 81. Santiago-Girón, E. 2007. *Estudio geotécnico realizado para un conjunto habitacional ubicado en la calle prolongación Yacatas No. 520 Col. Santa Cruz Atoyac Del. Benito Juárez, México, D. F.* Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 82. Santiago-López, D. 2018. *Análisis de la información geológica e hidrogeológica en la evaluación de un acuífero profundo (caso Santa Catarina 3A)*. Tesis para obtener el título de Ingeniera Geóloga. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 83. Sierra-García, L. 2014. *Evolución de la respuesta dinámica en el tiempo por efecto del hundimiento regional considerando un sistema suelo-estructura atípico*. Tesis para obtener el título de Maestra en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
 84. Suárez-Almazan, L. E. 2012. *Diseño de la cimentación de torre Reforma, México D. F.* Proyecto de fin de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas, España.

-
-
85. Tapia-Espinoza, E. J. 2018. *Cimentación de un edificio de departamentos de 5 niveles y planta de estacionamiento en sótano a doble altura, desplantado en Zona de Transición*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 86. Tapia-García, M. T. 2005. *Análisis geotécnico para la estación de servicio ubicada en Central de Carga Oriente, colonia Álvaro Obregón, delegación Iztapalapa, México Distrito Federal*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 87. TCSC. *Estudio de mecánica de suelos que se efectuó para un predio ubicado en la Av. Insurgentes No. 1160 en la Col. Capultitlán, en la Cd. De México*. Informe técnico.
 88. Tecnosuelo. 2015. *Estudio geotécnico para el diseño del sellado, desgasificación y aprovechamiento energético del relleno sanitario Bordo Poniente (México D. F.)*. Informe técnico.
 89. TGC. 2007. *Reporte de los sondeos de exploración profunda en la Col. Lomas de San Lorenzo, Iztapalapa*. Informe técnico.
 90. TGC. 2007. *Reporte parcial de los sondeos de exploración profunda en la colonia Lomas de San Lorenz, Iztapalapa*. Informe Técnico.
 91. TGC. 2007. *Reporte preliminar para la renivelación de los edificios 1 y 2 de la escuela primaria José Romero y Fuentes, Iztapalapa*. Informe Técnico.
 92. TGC. 2007. *Ejecución de seis (6) sondeos de muestreo ambiental en las zonas de grietas de la delegación Iztapalapa*. Informe Técnico.
 93. Tejeda-García, J. C. 2018. *Estudio geotécnico para la construcción de una agencia de seguros en Zona de Lomas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 94. Tirado-Juárez, J. 2018. *Consideraciones prácticas para el eficiente diseño y construcción de muro Milán*. Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 95. Torres-Solorio, J. C. 2013. *Respuesta sísmica elástica e inelástica del edificio de la Torre Mayor del Centro Cultural Universitario Tlatelolco*. Tesis para obtener el título de Maestro en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM
 96. Unda-López, J. A. 2016. *Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geólogo. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 97. Valencia-Vargas, M. E. 2012. *Estudio geotécnico para conocer el estado actual del suelo en el predio ubicado en la colonia Buenavista, delegación Cuauhtémoc, México, D. F., donde actualmente se tiene el edificio de Ferronales*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. FES Aragón, UNAM.
 98. Valle-Martínez, S. 2019, *Procedimiento constructivo de muro Milán en zona geotécnica de transición en la CDMX, así como la propuesta de monitoreo de este, mediante instrumentación geotécnica durante la construcción de la superestructura*. Tesina para obtener el título de especialista en Geotecnia. Facultad de Ingeniería, UNAM.
 99. Valverde-Landeros, H. y Schmitter-Martín del Campo, J. J. 2019. Condiciones geotécnicas en zona de transición abrupta al oriente de la CDMX. Caso de la cimentación del Hospital Dr. Belisario Domínguez. *Geotecnia*, Vol. 250.