



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**CARACTERIZACIÓN GEOTECNIA DE UN
SECTOR DEL ORIENTE DEL VALLE DE
MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN GEOTECNIA

Presenta:

LUIS ALFREDO SOLANO BOULLON

Director de tesis:

M.I. Araceli Aguilar Mora

Co-director de tesis:

Dr. Raúl Aguilar Becerril

Puebla, Pue.

Agosto, 2019



BUAP

Oficio No. 1841/2019

C. Luis Alfredo Solano Boullon
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Geotecnia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Caracterización geotécnica de un sector del oriente del Valle de México**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia. Asignándose como Director al M.I. Araceli Aguilar Mora y Co-director al Dr. Raúl Aguilar Becerril.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, agosto 20 de 2019.

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p M.I. Araceli Aguilar Mora y Dr. Raúl Aguilar Becerril, Director y Co-director del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/AAM/sco*

QW

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Presente

Por este medio le informo que después de haber revisado y solicitado las correcciones pertinentes relacionadas a la tesis **"CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE UN SECTOR DEL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO"** elaborada por el Ing. Luis Alfredo Solano Boullón para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia, no existe inconveniente alguno en autorizar la impresión de la misma.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z., a 19 de agosto de 2019



M. I. Araceli Aguilar Mora
Asesora de tesis

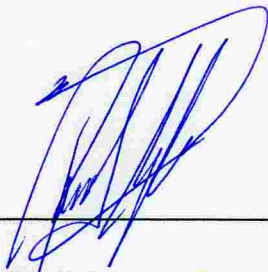
c.c.p. Interesado
c.c.p. Archivo

Puebla, PUE, 15 de agosto de 2019.

A quien corresponda:

Yo, Héctor Raúl Aguilar Becerril, en mi condición de Asesor Externo de la del trabajo de tesis titulado "Caracterización Geotécnica del Oriente del Valle de México", a presentarse en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería en Geotecnia, declaro que tras haber revisado el desarrollo de la mencionada investigación, he observado que su autor, Luis Alfredo Solano Boullon, ha atendido correctamente las observaciones que le he realizado, por lo que doy el visto bueno para la impresión de este documento.

Sin más que agregar:



Dr. Héctor Raúl Aguilar Becerril

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Yoleida, pilar fundamental de mi vida, quien me apoya de forma constante e incondicional, me impulsa a ser mejor y a dar lo mejor de mí.

A mis padres, hermanos y a mi familia en general, que desde la distancia elevan a diario sus oraciones por mi bienestar. Cualquier cosa buena que hoy pueda existir en mí es principalmente gracias a ustedes.

A los excelentes Maestros que me nutrieron con sus conocimientos durante el camino de esta Maestría, especialmente a la M.I. Araceli Aguilar, el Dr. Raúl Aguilar y el M.I. Miguel Figueras, quienes siguieron mis pasos siempre muy de cerca.

A TGC Geotecnia, Sísmica de Suelos y SACMEX, instituciones que facilitaron la información que hizo posible el desarrollo de esta investigación.

A los Ingenieros Mario Trigo y Enrique Santoyo Villa (†), por brindarme la oportunidad de involucrarme en el mundo de la geotecnia.

A mis compañeros de clases, con quienes compartí vivencias inolvidables.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO	7
1.1 Ubicación del área de estudio	7
1.2 Geología del Valle de México	7
1.3 Hundimiento regional en el Valle de México	14
1.4 Geotecnia del Valle de México	16
1.5 Propiedades dinámicas de los suelos	19
1.6 Determinación indirecta de propiedades dinámicas de los suelos	21
CAPÍTULO 2 MARCO METODOLÓGICO	23
2.1 Recopilación de la información	23
2.2 Organización y correlación de datos	24
2.3 Presentación gráfica de los datos	24
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
3.1 Velocidades de hundimiento	28
3.2 Propiedades índice	30
3.3 Propiedades mecánicas	40
3.4 Propiedades dinámicas	48
3.5 Descripción de las capas características del Valle de México	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
REFERENCIAS	62

INTRODUCCIÓN

La zona en la que está asentada la Ciudad de México (CDMX) es un valle que se originó en el período Terciario como resultado de una intensa actividad volcánica que, conjuntamente con fenómenos hidrológicos y sedimentológicos dieron lugar a su cierre en el Cuaternario, generando un sistema lacustre con el que se encontraron los primeros pobladores al llegar a este sector. Fenómenos como este han ocurrido con cierta frecuencia a lo largo de la historia geológica del planeta; sin embargo, el Valle de México se torna peculiar al considerar la desecación artificial de los lagos para asentar en esos territorios una de las urbes más densamente pobladas del mundo, que aunado a las particularidades geotécnicas de los depósitos y la intensa explotación de los acuíferos para cubrir las necesidades de la población, han dado como resultado que el comportamiento de estos materiales, producto de sus altos niveles de humedad y compresibilidad, baja resistencia al esfuerzo cortante, entre otros, resulte en un reto constante. Aún así, esto no ha impedido el desarrollo de obras de infraestructura de gran magnitud que garantizan la funcionalidad de la ciudad, las cuales han sido posibles gracias a la experticia de profesionales de diversa índole, especialmente ingenieros geotecnistas, quienes han propuesto a lo largo del siglo XX soluciones innovadoras que les han valido reconocimiento internacional (Santoyo *et al*, 2005).

Uno de los pilares fundamentales de lo anterior ha sido la extensa campaña de exploración geotécnica que se ha ejecutado en el sitio, gracias a lo cual al día de hoy se conoce de forma muy asertiva la geología, la estratigrafía y el comportamiento geotécnico de los materiales del Valle de México, temas sobre los que han tratado numerosas obras bibliográficas, especialmente tesis de investigación en casas de estudios superiores. Un aspecto común en estos trabajos es la presentación de resultados en forma tabulada, dejando generalmente de lado la cartografía.

En función de lo anterior, la presente investigación propone la recolección de la información geotécnica disponible para su clasificación y representación cartográfica, tomando en cuenta su naturaleza, su posición en el geoide mediante coordenadas UTM, con la premisa de generar mapas de isopropiedades para diferentes profundidades, así como secciones transversales que ilustren el comportamiento de estos parámetros.

Las condiciones geográficas del área metropolitana de la CDMX han llevado a que, desde finales del siglo XX, se desarrollen obras de infraestructura de gran relevancia en el oriente del Valle de México (Vega, 2003), entre las que destacan el Circuito Exterior Mexiquense, la Autopista Peñón Texcoco, el relleno sanitario del Bordo Poniente, el Aeropuerto Internacional Benito Juárez y la zona donde hasta el año 2018 estuvo proyectada la construcción del Nuevo Aeropuerto de la CDMX. Es por ello que se considera que la cartografía geotécnica detallada de esa zona constituirá una fuente de consulta que favorecerá el desarrollo de campañas aún más asertivas y eficaces.

En función de lo anterior, se ha planteado como objetivo general para esta investigación caracterizar geotécnicamente un sector del oriente del Valle de México, que abarca el este de la Delegación Venustiano Carranza en la CDMX, hasta el suroeste de la Zona Federal del Lago de Texcoco, en el Estado de México. Para alcanzar esto, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar un mapa de hundimientos para el área de estudio a partir de datos topográficos.
- Describir el área de estudio de acuerdo a las magnitudes asentamientos verticales medidos.
- Elaborar secciones que permitan establecer la distribución de las propiedades índice de los suelos en el área de estudio.
- Elaborar secciones que permitan establecer la distribución de las propiedades mecánicas de los suelos en el área de estudio.
- Obtener propiedades dinámicas de los suelos del área de estudio a partir de resistencias de hincado de cono eléctrico y representarlas gráficamente.
- Cuantificar para las capas características del Valle de México en el área de estudio el valor de las propiedades geotécnicas tratadas en esta investigación.

Al revisar la bibliografía correspondiente, se encuentra que desde que en la primera mitad del siglo XX se comenzara a estudiar con rigor científico el particular comportamiento de los suelos blandos del Valle de México, han sido innumerables las campañas de exploración geotécnica que se han ejecutado en esa zona. En algunas ocasiones los datos obtenidos se han hecho públicos, en otras se han mantenido bajo

estrictas normas de confidencialidad, pero durante un largo tiempo fueron escasos los esfuerzos de integración del enorme volumen de información existente.

Vega (2003), señaló la poca disponibilidad de información referente a las propiedades dinámicas de las arcillas de la Zona Federal del Lago de Texcoco, por lo que documentó la ejecución de pruebas de laboratorio de cámara resonante y cámara triaxial estática y cíclica para suplir esta falta de información, llegando a calcular parámetros de rigidez y amortiguamiento en función de la deformación angular, observando la poca capacidad de los materiales ensayados para la disipación de energía y estableciendo la conveniencia de la utilización de diferentes modelos dinámicos para estos materiales en particular. Los resultados se presentaron de forma tabulada y la cartografía se limitó a la ubicación de los barrenos de los cuales se extrajeron las muestras a ser ensayadas en laboratorio.

Alanís (2003), realizó una correlación de datos preexistentes para una caracterización geotécnica del ex Lago de Texcoco. Consideró resultados de pruebas de laboratorio para propiedades índice y mecánicas, piezocono, cono eléctrico, y propiedades dinámicas. Presentó sus resultados de forma tabular y gráfica, sin considerar el aspecto cartográfico. Además, propuso relaciones empíricas que relacionan la resistencia en punta al hincado del cono eléctrico con las propiedades mecánicas de las arcillas, planteando que $c_u = \frac{q_c}{13.2}$.

Santoyo, Mooser, Ovando y León (2005) presentaron la “Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México”, donde mencionan la singularidad de los suelos depositados en dicha zona, de los que describen su origen geológico y condiciones climáticas e hidráulicas en las cuales están inmersos. Se tratan también las alteraciones que antrópicamente se han inducido a esos suelos desde el siglo XVI, los retos que estos materiales implican para la sustentabilidad de la CDMX y su zona conurbada actualmente. Este trabajo representa uno de los esfuerzos de integración de datos geotécnicos para los materiales del Valle de México.

Cabrera (2009), basándose en gran medida en los trabajos de exploración e instrumentación ejecutados entre 2001 y 2005, que incluyeron 11 pruebas de hincado de cono eléctrico y la instalación de diez (10) tubos de observación de nivel freático, tres (3) piezómetros abiertos, treinta (30) piezómetros de cuerda vibrante, diez (10) bancos de nivel flotante, veinte (20) bancos de nivel profundo y veintiséis (26) testigos

superficiales para GPS y una prueba de carga, simuló el comportamiento de los materiales en un modelo numérico elaborado en el software PLAXIS, basado en las condiciones de esfuerzo y deformación interpretadas para el corto y el largo plazo, en el que descarta la ocurrencia de mecanismos de falla que comprometan de forma alguna la estabilidad del relleno. Señala también la generación de excesos de presión de poro ante la imposición de cargas, que se disipan muy lentamente (a través de décadas) debido a la colocación de membranas impermeables por encima del terreno natural y por debajo de los rellenos.

Auvinet, Méndez y Juárez (2017) señalan que la geología representa la base fundamental para la descripción de las características del subsuelo del Valle de México, y presentan un resumen del avance en el conocimiento de los aspectos estratigráficos de este sector entre los años 1957 y 2016, así como de las técnicas utilizadas para exploración del subsuelo (muestreo y pruebas de campo). Indican que las series arcillosas están compuestas principalmente por limos y arcillas de alta plasticidad con microorganismos y minerales. Para la zona del Lago de Texcoco, indican que la salinidad de las aguas lacustres modifican el contenido de agua aparente determinado por medios convencionales. En cuanto a la estratigrafía, indican que el límite superior de la Formación Arcillosa Superior está entre 3 y 4.5 m cerca del Bosque de Aragón, llegando a aflorar superficialmente en la zona del Lago de Texcoco; la menor profundidad de la Capa Dura y de la Formación Arcillosa Inferior la señalan en el Peñón de los Baños, encontrándose de manera abrupta a las mayores profundidades en el Aeropuerto Benito Juárez.

En lo referente a la justificación para sustentar la presente investigación, ya se trató antes sobre la abundancia de campañas exploratorias en el Valle de México. De hecho, las particularidades de las arcillas depositadas en esta depresión hacen de la CDMX una de las principales referencias a nivel mundial en lo que se relativo a soluciones geotécnicas innovadoras, que responden a la necesidad de resolver problemáticas que prácticamente no tienen paralelo, como sucedió con la nivelación de la Catedral Metropolitana (Instituto de Ingeniería, 2013), y la cimentación de estructuras como la Torre Latinoamericana, El Palacio de Bellas Artes y el Monumento a la Revolución (Martínez, 2012), por mencionar solamente algunos casos. En este orden de ideas, la integración de estos datos ha llevado a que entre los profesionales de la geotecnia sea ampliamente conocida la distribución de las zonas de Lago, Transición y

Lomas, con lo que las campañas de exploración locales están siendo planificadas en función de ello, lo que se ve reflejado positivamente en su asertividad.

Siendo esto así, queda abierta la posibilidad a correlacionar datos en áreas más específicas, y atendiendo a las características del área metropolitana de la CDMX, en donde las zonas céntricas están prácticamente saturadas de estructuras, espacios como el de la Zona Federal del Lago de Texcoco han recibido especial atención para proyectos de gran envergadura pensando en el desarrollo urbano a mediano plazo (Vega, 2003). Ante esta situación, una caracterización geotécnica que incluya correlación de propiedades y generación de mapas y perfiles de isopropiedades, la cual podría ser utilizada como información previa para cualquier desarrollo de infraestructura en la zona (especialmente de entidades públicas, dado el carácter federal de la zona), queda plenamente justificada.

Finalmente, se definen a continuación los alcances de la investigación, expresando lo que se pretende cubrir en el desarrollo de cada capítulo de la investigación.

- En el Capítulo 1, titulado “Marco teórico”, se pretende dar una breve reseña de la historia geológica del Valle de México, señalando los procesos que dieron lugar a su formación, así como describir la naturaleza de los depósitos que desde entonces se han ido acumulando. Posteriormente se realiza una descripción de las soluciones geotécnicas que se han aplicado en el Valle de México en función de las particulares características de los materiales antes descritos, para luego dar una introducción a los conceptos referentes a las propiedades dinámicas de los suelos.
- En el Capítulo 2, titulado “Marco metodológico”, se describen los procedimientos seguidos por el autor para la elaboración de esta investigación, iniciando por la recopilación de la información sobre propiedades geotécnicas del área de estudio, su organización y clasificación; se explica la utilización de estos datos, específicamente en la elaboración de dos tipos de documentos: los mapas de isopropiedades para iguales profundidades y las secciones que describen la variación lateral de los parámetros analizados.
- En el Capítulo 3, titulado “Resultados y análisis”, se muestran las plantas y las secciones elaboradas para el área de estudio, los cuales son descritos desde un punto de vista geotécnico, señalando particularidades y comparando la

información que ofrece cada una, dando así pie a la asignación de valores característicos para distintas propiedades en cada una de las capas típicas del Valle de México, y finalmente presentar las conclusiones del estudio y recomendaciones para futuros investigadores.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Ubicación del área de estudio

La ubicación del área de estudio fue definida en función de la información de propiedades geotécnicas disponible y su distribución espacial. Cubre parcialmente los municipios Ecatepec, Atenco, Texcoco y Nezahualcóyotl del Estado de México; y las alcaldías Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza e Iztacalco de la CDMX (Figura 1).

1.2 Geología del Valle de México

Breve reseña de la historia geológica del Valle de México:

Mooser (1975, citado en Auvinet, Méndez y Juárez, 2017), señala que el relieve del Valle de México es el resultado de siete fases volcánicas ocurridas entre el Terciario Inferior hasta el Cuaternario Superior, intervalo en el que se configuró una extensa variedad de formaciones de carácter extrusivo con composiciones muy variables (desde ácidas hasta básicas). Con la formación de la Sierra del Chichinautzin al sur del valle, este quedaría definitivamente cerrado y a partir de ese punto iniciaría un proceso de azolvamiento de la depresión, el cual implicaría la acumulación de productos volcánicos y de acarreo fluvial propiciando condiciones que favorecerían el desarrollo de un sistema lacustre. Dicho cierre tuvo lugar entre hace 600.000 (Santoyo *et al*, 2005) y un millón de años (Auvinet *et al*, 2017).

Desde entonces se han depositado en el vaso de la cuenca secuencias más o menos constantes de arcilla blanda separadas por lentes limosos más duros y materiales basálticos y pumíticos producto de emisiones volcánicas que siguieron existiendo, así como suelos duros de origen fluvial y tobas en las zonas topográficamente más elevadas (zona de lomas) (Santoyo *et al* 2005).

Santoyo *et al* (2005) indican que este sistema lacustre persistió hasta la llegada del ser humano al sector y que su desagüe tuvo lugar debido a actividades exclusivamente antrópicas entre los siglos XVII y XX, las cuales se ejecutaron como medidas para evitar que se repitieran las desastrosas inundaciones que tuvieron lugar antes y después de la ocupación española. La zona urbana terminaría expandiéndose hacia los terrenos que se ganaron a los lagos, y es esa la razón de las particularidades de los materiales sobre los cuales está asentada gran parte de la CDMX.

Estratigrafía del Valle de México:

En la Figura 2 se muestra la zonificación COVITUR (citado en Santoyo *et al*, 2005) para la CDMX, la cual está basada principalmente en la estratigrafía de los materiales subyacentes a lo largo del Valle de México, de lo cual se clasifican los materiales de la siguiente forma:

- a) Zona de Lago: Está caracterizada por grandes espesores de arcillas blandas. Su perfil estratigráfico puede resumirse como sigue:
 - La Costra Superficial (CS), que está representada principalmente por un relleno artificial (restos arqueológicos y de construcción) con espesores entre 1 y 7 m, aunque excepcionalmente puede alcanzar hasta 15 m, un depósito aluvial blando de espesor muy pequeño (ocasionalmente imperceptible) y una costra seca fuertemente consolidada, la cual es el resultado de la desecación de zonas del lago que quedaron expuestas a los rayos solares.
 - La Formación Arcillosa Superior (FAS), cuyo espesor varía entre 25 y 50 m. Si bien existe la tendencia a clasificar visualmente estos materiales como arcillosos con ocasionales intercalaciones de lentes duros (ceniza volcánica, piedra pómez y arenas), estudios recientes como el de Almanza, Rangel e Ibarra (2018) indican que pruebas como la de la copa de Casagrande pueden arrojar un valor de límite líquido más alto que el real, debido a la influencia de la propiedad de sensibilidad, que tiende a ser alta en los depósitos arcillosos de la CDMX. Indican que al aplicar pruebas menos influenciadas por la sensibilidad, como la determinación de límites de consistencia mediante la prueba de cono inglés o la clasificación de finos mediante el hidrómetro, lleva a identificar los suelos de la FAS como una mezcla entre arcillas y limos de alta plasticidad.

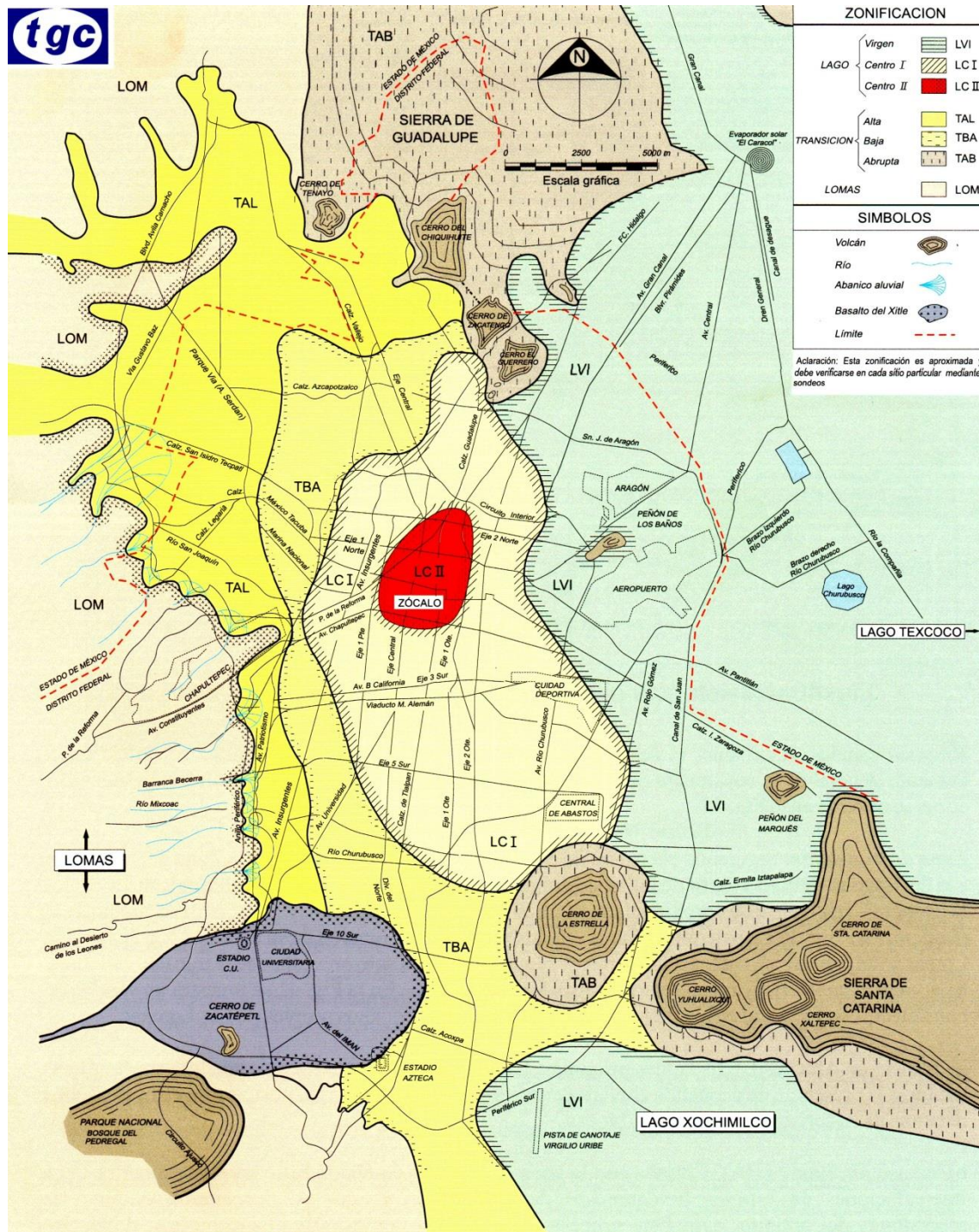


Figura 2 Zonificación de COVITUR para la CDMX. Fuente: Santoyo et al (2005)

- La Capa Dura (CD), en la cual predominan limos arenosos con arcillas y gravas cementados de manera poco uniforme. Su espesor es muy variable, desde

prácticamente nulo en zonas donde no existió la desecación por la cual tuvo lugar, como el lago de Texcoco, hasta unos 5 m en la zona centro de la ciudad.

- La Formación Arcillosa Inferior (FAI), que tiene una disposición similar al de la FAS, con arcillas blandas e intercalaciones de lentes duros, con un espesor total de unos 15 m. Las consideraciones antes mencionadas de Almanza *et al* (2018) también son aplicables a los depósitos de la FAI.
- Depósitos Profundos (DP), definidos por espesores de 1 a 5 m de arenas y gravas limosas muy bien cementadas que suprayacen a capas de arenas menos cementadas y arcillas preconsolidadas.

Para la zona de lago, Santoyo *et al* (2005) establecieron que los lentes duros que se intercalan en la FAS y la FAI son capas características a las que denominaron “marcadores”, los cuales aparecen de manera más o menos uniforme en la zona de lago, pero no totalmente constante, pudiendo llegar a desaparecer en sectores donde los procesos de exposición de los sedimentos a los rayos solares fueron menos intensos o donde no existió una acumulación significativa de cenizas y otros productos de emanaciones volcánicas. En la Figura 3, señalan en una gráfica de prueba CPT la ubicación aproximada de estos marcadores, los que identifican desde A hasta H; asimismo, enumeran del 1 al 7 los substratos arcillosos que quedan intercalados entre los marcadores.

Como ya se mencionó, la estratigrafía de la zona de lago es más o menos constante. Sin embargo, en la zonificación de COVITUR se subdivide en:

- Zona de Lago Virgen (LV), en la que la consolidación de las arcillas por efectos antrópicos es menor, aunque es evidente que en una urbe como la CDMX la nulidad de este tipo de procesos será prácticamente inexistente.
- Zona Lago Centro I (LCI), en donde las arcillas han estado sometidas a la carga de estructuras pequeñas y medianas.

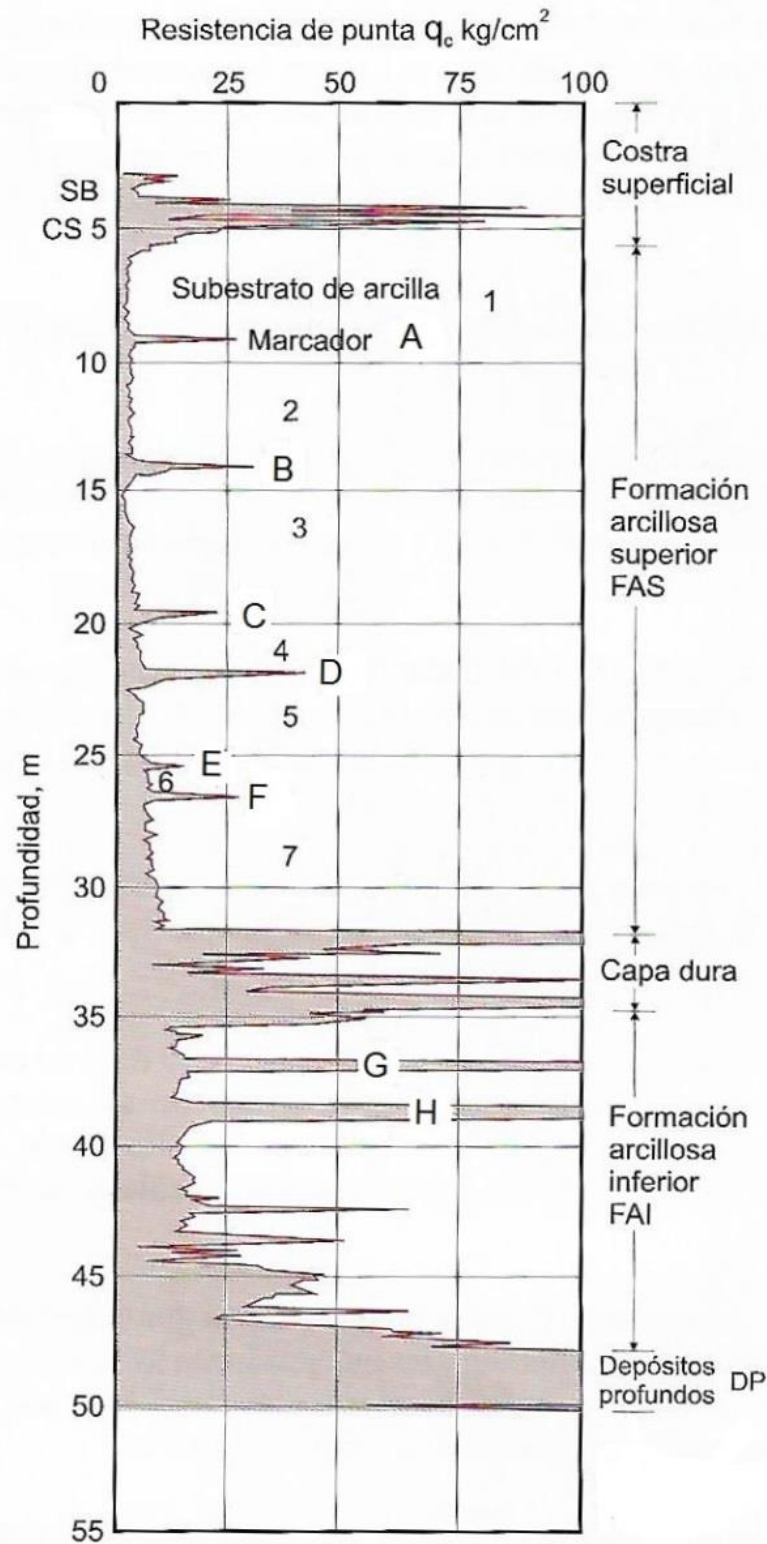


Figura 3 Ubicación de los marcadores característicos y los subestratos de arcilla en la Zona de Lago del Valle de México. Modificado de Santoyo *et al* (2005)

- Zona Lago Centro II (LCII), que es el área que ha estado poblada desde la colonia y en la que las arcillas presentan condiciones extremas, desde estar fuertemente consolidadas por rellenos y grandes sobrecargas; hasta arcillas blandas y muy blandas en zonas de parques y antiguos cruces de canales.
- b) Zona de Transición: Está definida por una profundidad de 20 m para la Capa Dura y la ausencia de la Serie Arcillosa Inferior. Geológicamente sus depósitos se dieron de dos formas: la primera representa una franja entre los lagos y las sierras montañosas que rodean el valle (transición interestratificada), con alternancia entre materiales lacustres y aluviales de la misma forma que ocurre en los ambientes sedimentarios costeros, por avances y retrocesos en el nivel del lago, en este caso; y la segunda frente a los edificios volcánicos que antiguamente se erigían sobre las aguas del lago, lo cuales en su actividad extrusiva debieron ganarle terreno a las aguas, provocando que el cambio en los materiales que se observa actualmente sea más abrupto que en el primer caso (Figura 4).

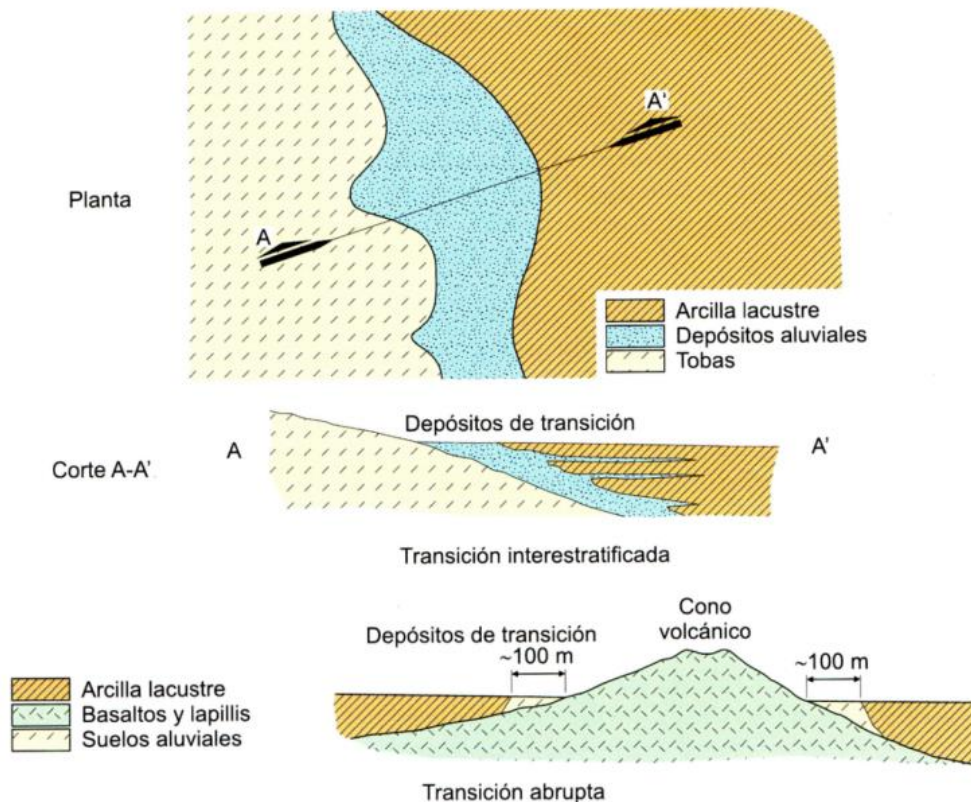


Figura 4 Disposición de sedimentos en las zonas de Transición. Fuente: Santoyo *et al* (2005).

En la zonificación COVITUR se subdivide en:

- Transición Alta (TAL), que es más próxima a la zona de lomas y muestra depósitos aluviales cruzados.
- Transición Baja (TBA), que es más próxima a la zona de lago y en la cual la capa dura alterna con estratos limoarenosos aluviales.
- c) Zona de Lomas: Ubicada principalmente al poniente del valle, está caracterizada por material ígneo extrusivo (principalmente tobas y basaltos), lahares, y depósitos arenosos y glaciales, con mayores indicios de tectonismo en las unidades litológicas más antiguas.

El Oriente del Valle de México:

Auvinet *et al* (2017) realizaron una descripción del subsuelo de la zona lacustre del oriente del valle de México, basándose en el tratamiento geoestadístico de una gran cantidad de barrenos exploratorios. Sus observaciones más importantes fueron:

- En cuanto a la distribución de las capas típicas del Valle de México, en la zona de Aragón y el Aeropuerto Benito Juárez (actual) la profundidad de la frontera superior de la FAS está entre 3 y 4.5 m mientras que en la zona del ex Lago de Texcoco prácticamente aflora en superficie. La menor profundidad para la capa dura se observa en el Peñón de los Baños, alcanzando sus cotas más profundas al poniente del área de estudio cerca del aeropuerto actual y ya dentro de la zona densamente poblada de la CDMX. También en el Peñón de los Baños se encuentra la menor profundidad de la FAI y los DP.
- Los mayores contenidos de agua se registran en la zona del ex Lago de Texcoco y el Aeropuerto Benito Juárez, decreciendo hacia el nororiente.

1.3 Hundimiento regional en el Valle de México

La subsidencia de los suelos en el Valle de México es un fenómeno que ha sido detectado desde mediados del Siglo XIX, cuando ingenieros comenzaron a notar que aparentemente las calles se levantaban frente a las casas y edificios que se hundían. Desde entonces han sido muchas las formas en las que se ha buscado cuantificar el hundimiento en la CDMX y mitigar sus efectos negativos en las estructuras civiles, con resultados y asertividad variables.

Factores que Influyen en el hundimiento regional:

Santoyo *et al* (2005) señala que los factores que desencadenan el hundimiento de los depósitos del Valle de México pueden ser de origen natural o antrópico, pero que el efecto de los segundos es más importante y de acción más inmediata.

- Cargas aplicadas: Se ha determinado que inclusive rellenos superficiales en suelos blandos como los del antiguo Lago de Texcoco pueden inducir asentamientos del orden del espesor del relleno (Santoyo *et al*, 2005). Desde luego, las cargas aplicadas a estratos más profundos mediante pilas y pilotes también inducen asentamientos.
- Extracción de agua somera: El funcionamiento de la ciudad exige esta práctica, que puede ocurrir de manera temporal durante procesos de excavación; o de manera permanente, como sucede al desalojar el agua de algunos sótanos y estructuras como las líneas del metro. Trabajos como los realizados en la renivelación de la Catedral Metropolitana, que exigieron el bombeo de estratos superficiales mediante puntas eyectables han permitido establecer que este tipo de prácticas tienen una gran influencia en los asentamientos que ocurren actualmente (Santoyo *et al*, 2005; Instituto de Ingeniería 2013).
- Extracción de agua de mantos profundos: Es una actividad que se ha venido realizando desde mediados del siglo XX para satisfacer la creciente demanda de la CDMX y su zona conurbada. Para 2005 se estimaba la existencia de 1600 pozos de bombeo profundo en actividad, cuya operación trae como consecuencia un descenso en la presión intersticial que aumenta los esfuerzos efectivos en la fase sólida de los suelos finos, llevando a su consolidación (Santoyo *et al*, 2005).
- Evaporación solar: Alberro, Auvinet y Hernández (2000) determinaron que un período de sequía continua que se extienda por seis meses podría generar bajo ciertas condiciones asentamientos de hasta 75 cm, de los cuales solamente se recuperaría una décima parte en períodos de lluvia posteriores.
- Extracción de agua por árboles: Santoyo *et al* (2005) indica que si bien existe un control detallado de las especies de árboles que se han plantado en las zonas urbanas de la CDMX, no existen datos referentes a la cantidad de agua que estos pueden extraer de este suelo, y que este desconocimiento ha llevado a simplemente descartar la influencia de este fenómeno en el

hundimiento regional del Valle de México. Sin embargo, datos recabados en otras partes del mundo conduce a pensar que su influencia podría no ser despreciable.

- Pozos abandonados: El desarrollo de la CDMX ha exigido la ejecución de extensas campañas de exploración de mecánica de suelos, así como pozos para bombeo de agua y algunas otras actividades que han traído como consecuencia que existan innumerables barrenos abandonados por todo el Valle de México. En algunos casos han sido rellenados con materiales granulares para que funcionen como drenes verticales que faciliten el descenso del agua hasta los estratos inferiores.

1.4 Geotecnia en el Valle de México

Los hundimientos diferenciales en estructuras construidas en el Valle de México han sido advertidos desde épocas precolombinas. De hecho la renovación de los templos mexicas buscaba cubrir los daños debidos a este fenómeno, más allá de las motivaciones religiosas. Durante la colonia existen registros de reparaciones en templos católicos que llegan hasta procesos de recimentación. Sin embargo, es hasta el siglo XIX que estos efectos y sus causas comienzan a ser cuantificados, hasta el punto de estimar que cargas a partir de 5 t/m^2 generaban deformaciones inadmisibles, proponiendo como solución cimentaciones con extensa área superficial que distribuyeran adecuadamente los esfuerzos en el suelo (Santoyo *et al.* 2005).

A inicios del siglo XX la Columna de la Independencia tuvo que ser demolida cuando su construcción había avanzado hasta un tercio de su altura debido a que se observó una inclinación de 3.5° . Como solución para evitar estos efectos al reiniciar la obra, se utilizaron por primera vez en México pilotes de punta de madera con cabeza de concreto, que se instalaron en una excavación sostenida por una tablaestaca perimetral, los cuales estabilizaron y sostienen la estructura mitigando su hundimiento; esto se evidencia en las zonas circundantes que hasta ahora se encuentran a 2 m por debajo del nivel base de la Columna de la Independencia (Martínez, 2012; Santoyo, Ovando y Segovia, citado en Santoyo *et al.*, 2005).

Posteriormente, en la década de 1940 se comienzan a aplicar los principios de la mecánica de suelos moderna, destacando el caso de la cimentación compensada

construida para el edificio de la Lotería Nacional, y más adelante, para la Torre Latinoamericana (Santoyo *et al*, 2005).

Desde entonces, el diseño de cimentaciones ha ido evolucionando y se ha adaptado a las exigencias arquitectónicas y al creciente conocimiento del comportamiento de las ondas sísmicas en los suelos del valle, basándose para ello en mejorar en los procedimientos de exploración del subsuelo desarrollándose nuevas y mejores técnicas de extracción de muestras, análisis de laboratorio y pruebas de campo (Santoyo *et al*, 2005). Asimismo, se han aplicado soluciones innovadoras en la estabilización de taludes, renivelación de edificios, trabajos de recimentación, y mejoramiento de suelos (Instituto de Ingeniería, 2013; Martínez, 2012), entre otros, de los cuales a continuación se resumen los comentarios de Santoyo *et al* (2005) para la zona de lago.

Soluciones típicas para cimentaciones:

- Zapatas de fragmentos de roca y concreto: Se ha demostrado la viabilidad de zapatas desplantadas en la costra superficial para estructuras de menos de tres niveles.
- Losas de cimentación: Se utilizan en edificios de hasta cuatro niveles, aunque han presentado problemas ante sismos por falta de rigidez en trabes y losas.
- Cajones de cimentación: Utilizadas en estructuras de hasta seis niveles. Se trabajan buscando compensar el peso del suelo extraído con el de la estructura. Aunque han demostrado ser estables ante la acción de los sismos, es común que presenten problemas de inclinación por excentricidad de las cargas, exceso de peso no considerado en el diseño y hundimientos locales.
- Pilotes: A inicios del siglo XX, se comenzó a instalar pilotes de punta de madera apoyados en la CD, disminuyendo los valores de hundimiento respecto a las áreas circundantes. Uno de los casos más resaltantes es el antes mencionado de la Columna de Independencia. La mayor incertidumbre en este tipo de cimentación se da en estratos que presentan fricción negativa, lo que arrastra los pilotes hacia abajo y disminuye su capacidad efectiva. Se han construido pilotes de control para ayudar al descenso registrado de las estructuras junto al

área circundante, pilotes con funda para eliminar la fricción negativa y micropilotes (diámetro reducido) para trabajos de recimentación.

Estabilización de taludes:

En taludes temporales de excavaciones previas a la construcción de cimentaciones la estabilización se logra mediante muros tipo Milán o tablaestacados de madera o concreto, además de sistemas de bombeo en arcillas con resistencias al esfuerzo cortante excepcionalmente bajas, que sirven además para controlar el fenómeno de expansibilidad.

Renivelación de edificios:

Cuando debajo de una estructura se presentan diferentes compresibilidades, estas registran un hundimiento diferencial que las desnivela y compromete su estabilidad. El caso mejor documentado de este tipo es el de la Catedral Metropolitana, donde la arcilla de la FAS es más resistente al centro de la estructura. En este sentido, las técnicas más utilizadas para corregir este comportamiento son:

- Subexcavación: consiste en perforar túneles de unos 10 cm de diámetro en el suelo debajo de la estructura, los cuales, si están correctamente dispuestos se cerrarán bajo el peso que soportan induciendo una corrección en la nivelación de la estructura. El proceso debe repetirse hasta alcanzar la nivelación deseada.
- Infiltración de agua: Consiste en la introducción de caudales pequeños de agua en los lentes permeables del suelo. Para el caso del Valle de México, estos lentes permeables están representados por la Capa Dura o por los lentes limosos intercalados en los grandes espesores arcillosos.

Trabajos de recimentación:

Las normas de construcción, que se han tornado más exigentes desde eventos como el sismo de 1985, han hecho necesario el aumentar las capacidades de cimentaciones ya existentes, para lo cual existen técnicas muy diversas que van desde la ampliación de las zapatas hasta adicionar pilotes complementarios. Destaca la reducción de la humedad mediante la inducción de flujos eléctricos para aumentar la capacidad de carga de pilotes.

Mejoramiento de suelos:

Las técnicas de mejoramiento de suelos son muy diversas, pero la naturaleza arcillosa de los suelos de la Zona de Lago y su elevado contenido de agua hacen que la opción con mayor aplicabilidad en estos materiales sea la inyección de morteros en el suelo a tratar para disminuir su compresibilidad. Los efectos son muy variables; es por ello que las inyecciones deben ser controladas en el sitio y de forma muy cuidadosa.

1.5 Propiedades dinámicas de los suelos

Las propiedades más importantes para describir el comportamiento de los suelos ante cargas dinámicas son:

Velocidades de onda:

Las velocidades de propagación de ondas sísmicas son muy variables en los distintos materiales de la corteza terrestre, y esto tendrá implicaciones directas en la respuesta de las estructuras ante sollicitaciones dinámicas.

La principal fuente de ondas en los suelos y rocas son los eventos sísmicos, de los cuales se derivan cuatro tipos de perturbaciones explicadas por Kramer (1996) como sigue:

- Ondas P: Son las que se propagan a mayor velocidad. Su carácter es compresivo y se pueden propagar en medios sólidos y líquidos, por lo que son las responsables de eventos como los tsunamis. En medios muy competentes, como roca maciza, se tiene como referencia que $V_s \approx 10,000$ m/s.
- Ondas S: Son las segundas en registrarse en un evento sísmico. Su carácter es de tipo cortante, por lo que son las que mayores daños generan en las estructuras civiles. No se propagan en medios líquidos. En materiales muy competentes, se pueden alcanzar valores de $V_s \approx 6,000$ m/s.
- Ondas Rayleigh: Son ondas de manifestación superficial. Se propagan en un plano vertical y el efecto que generan es parecido al del oleaje.
- Ondas Love: También se manifiestan a nivel de superficie y su propagación ocurre en el plano horizontal.

Módulos elastodinámicos:

Están física y matemáticamente relacionados con las Velocidades de Onda. En dinámica de suelos, se refieren a la degradación de los módulos elásticos originales ante sollicitaciones cíclicas reflejadas en deformaciones angulares.

- Módulo de Young dinámico (E): El módulo de Young en condiciones estáticas es la pendiente de una gráfica del esfuerzo normal resultante de la compresión (ordenada) vs la deformación unitaria generada en una probeta de suelo (abscisa). Su componente dinámico se refiere a la degradación de ese valor al repetir el proceso de compresión de forma cíclica, alternando etapas de relajación del material (Kramer, 1996)
- Módulo de rigidez dinámico (G): De forma análoga al caso anterior, en condiciones estáticas se puede determinar un módulo de rigidez como la pendiente de una gráfica del esfuerzo cortante generado por torsión a una probeta de suelo (ordenada) vs la deformación angular que se genera por su efecto (abscisa) (Kramer, 1996).

Matemáticamente se tiene que:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad \text{Ec 1}$$

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{Ec 2}$$

Siendo ρ la densidad del material estudiado.

Amortiguamiento:

Se refiere a la capacidad de los materiales de disipar la energía generada por sollicitaciones dinámicas. Así, los materiales con alto amortiguamiento tenderán a ser más estables cuando son impactados por las ondas, mientras que los de bajo amortiguamiento exhibirán con mayor claridad las oscilaciones a las que sean sometidos (Kramer, 1996). Se expresa como un porcentaje y su rango es muy amplio, desde 2% hasta 20%. Los valores típicos para concreto y acero son de 5%.

Matemáticamente se define como:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_c} \quad \text{Ec 3}$$

Siendo C el coeficiente de amortiguamiento de naturaleza viscosa y C_c el coeficiente de amortiguamiento crítico (el mínimo para que no exista oscilación en el sistema) (Vega, 2003).

Período de Vibración:

Es el tiempo que toma a una oscilación completar un ciclo completo en su propagación a través del suelo. Este concepto se ilustra en la Figura 5:

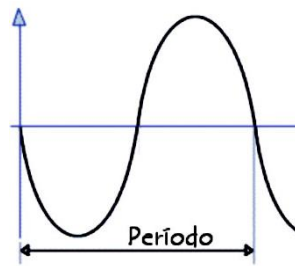


Figura 5 Idealización del período de una oscilación.

En el ámbito de la mecánica de suelos, al considerar H como el espesor de suelo estudiado (asumido como homogéneo e isótropo), matemáticamente el período de vibración T del suelo se define como:

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad \text{Ec 4}$$

1.6 Determinación indirecta de propiedades dinámicas de los suelos

Existen pruebas de campo y ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas que permiten determinar las propiedades dinámicas de los suelos. Sin embargo, cuando no se dispone de la información de estas pruebas o no se cuenta con la posibilidad de ejecutarlas, es posible acudir a correlaciones empíricas que parten de datos mecánicos para estimar propiedades dinámicas. En este sentido, Ovando y Romo (1991) establecieron la siguiente correlación empírica para los suelos del Valle de México, la cual será empleada en esta investigación debido a que durante los últimos años se ha utilizado en numerosas ocasiones para los suelos aquí tratados:

$$V_s = \eta \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh}\gamma_s}} \quad \text{Ec 5}$$

Donde γ_s es el peso volumétrico del suelo considerado, q_c es la resistencia al hincado en prueba CPT medida en t/m^2 y los valores de N_{kh} y η son constantes para cada tipo de suelo y han sido tabulados para los depósitos del Valle de México, y se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Factores empíricos de correlación. Fuente: Ovando y Romo (1991).

Tipo de Suelo	Valores de N_{kh}			Valores de η
	Máximo	Medio	Mínimo	
Arcillas Preconsolidadas del Lago de Texcoco	14.0	9.5	6.7	23.33
Arcillas del Lago Xochimilco-Chalco	14.0	9.9	7.0	26.40
Suelos Areno-Limosos de las capas duras	16.0	11.1	8.0	40.00

Una vez obtenidos los valores correspondientes a V_s se puede aplicar la expresión

$$G = V_s \frac{\gamma_s}{g} \quad \text{Ec 6}$$

Donde G es el módulo de rigidez, g es la aceleración de gravedad y γ_s es el peso volumétrico del suelo. Para casos en los que no se disponga de datos directos relativos al peso volumétrico, Ovando y Romo recomiendan aplicar el criterio de la Tabla 2.

Tabla 2: Factores empíricos de correlación. Fuente: Ovando y Romo (1991).

Tipo de Suelo	Peso Volumétrico (t/m^3)
Arcillas Preconsolidadas del Lago de Texcoco	1.20
Arcillas del Lago Xochimilco-Chalco	1.20
Suelos Areno-Limosos de las capas duras	1.65

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

La metodología de trabajo seguida en el transcurso de esta investigación se condensa en la Figura 6:

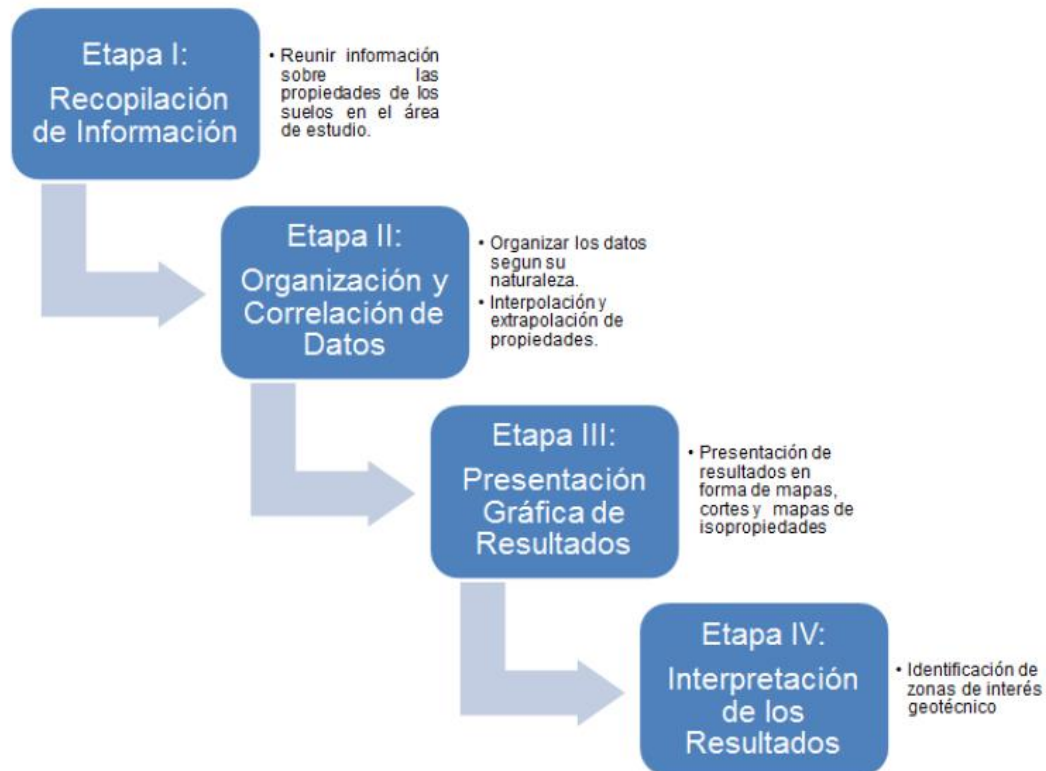


Figura 6: Metodología de trabajo seguida en la investigación

2.1 Recopilación de la información

El oriente del Valle de México es uno de los sectores con mayor densidad de información geotécnica de la República. Sin embargo, el grueso de esa información no tiene disponibilidad al público, por lo que la misma fue obtenida por el autor en las instituciones TGC Geotecnia, Sísmica de Suelos y SACMEX, quedando en el compromiso de guardar con estricto celo la confidencialidad de los datos facilitados.

Con la información recolectada y ubicada espacialmente, se definió el área de estudio mostrada en la Figura 1, procurando que esta abarcara la mayor cantidad de puntos de los que se pudiese extraer información geotécnica.

2.2 Organización y correlación de datos

Los datos recolectados provienen de puntos de referencia topográfica y barrenos perforados con fines exploratorios, y fueron clasificados en función de su naturaleza en las siguientes categorías:

- Velocidades de hundimiento
- Contenido de agua
- Límite líquido
- Índices de plasticidad
- Gráficas resistencia en punta en sondeos de cono eléctrico (CPT por sus siglas en inglés)
- Valores de rigidez
- Velocidad de propagación de ondas

Para cada caso la información fue tabulada en función de sus coordenadas UTM y la profundidad correspondiente. Estos datos fueron vaciados en el sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS 10.1 (Figura 7), el cual consiste en una herramienta informática capaz de almacenar, manipular, analizar y desplegar de diferentes maneras los datos referenciados para cada una de las propiedades geotécnicas consideradas. De esta manera, fue posible el manejo de mapas temáticos para cada una de las propiedades consideradas.

2.3 Presentación gráfica de los resultados

Los resultados fueron presentados de dos formas:

Mapas en planta:

Fueron utilizados para representar las velocidades de hundimiento elaborados a partir de la información asociada a la variabilidad de cotas en un mismo punto a lo largo del

tiempo, para lo cual la información suministrada al SIG se refiere al cálculo de la velocidad en la que ocurre la subsidencia.



Figura 7 Vista del área de trabajo en ArcGIS 10.1, en la que los puntos con información geotécnica se marcan en color negro.

Secciones verticales:

Las secciones verticales representan una forma de visualización muy eficaz de las propiedades del subsuelo. Si bien el campo donde han sido mejor utilizadas es el de la geología estructural, autores como Auvinet *et al* (2017) las emplearon con indudable acierto para exponer gráficamente la distribución de los valores de propiedades geotécnicas como contenidos de agua e índices de sobreconsolidación en todo el Valle de México.

Para el desarrollo de esta investigación, las secciones verticales fueron generadas en el software Surfer 11 (Figura 8), lo cual requirió la tabulación de las propiedades y su profundidad correspondiente.

En lo referente a las secciones donde se representan los valores de propiedades dinámicas, específicamente módulos de rigidez y velocidades de onda cortante, estos se obtuvieron a partir de las correlaciones empíricas mostradas en las ecuaciones 5 y 6. Para ello se partió de graficas de pruebas CPT, de las cuales se muestra un ejemplo en la Figura 9.

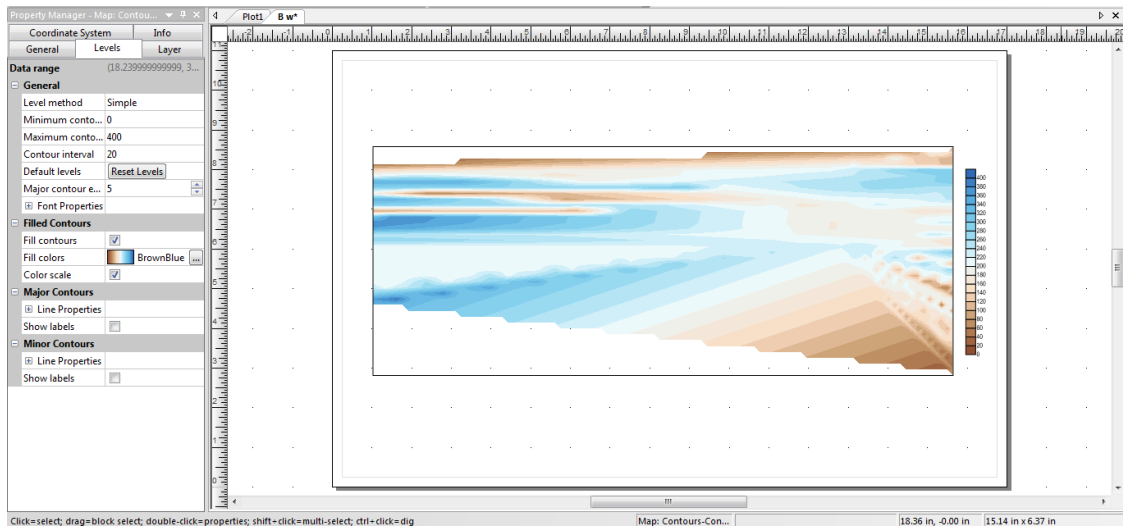


Figura 8: Vista del área de trabajo en Surfer 11 durante la generación de secciones verticales.

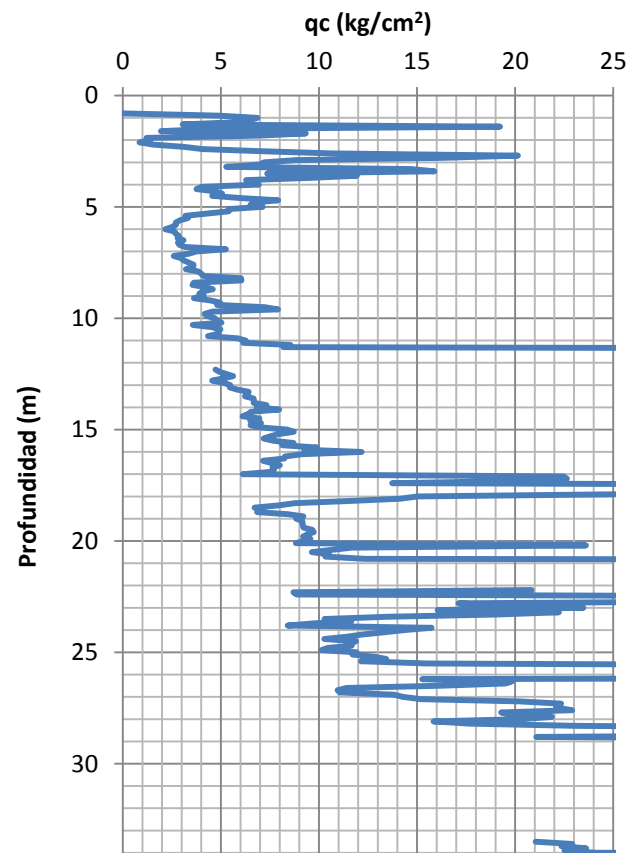


Figura 9: Ejemplo de Gráfica de CPT, donde se muestran los datos de resistencia al hincado (en kg/cm^2) en relación a la profundidad. (TGC Geotecnia, 1995 a 2017)

En todos los casos, la información es interpolada por las herramientas asumiendo que esta varía de forma lineal, mediante triangulación de datos. Para minimizar las posibilidades de fuentes de error asociadas a este método, los mapas y secciones presentados en esta investigación fueron elaborados solamente en aquellas áreas donde la densidad de información sea lo suficientemente alta como para que los resultados sean confiables.

Finalmente, el tipo y el volumen de la información utilizada en esta investigación se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3 Clasificación de la información utilizada en la investigación.

Prueba, Sondeo o Instrumento.	Cantidad
CPT	56
SPT	32
Muestras Inalteradas	40 (17 barrenos)
Puntos GPS	735

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Fueron elaborados mapas y secciones para ilustrar el comportamiento geotécnico de los materiales de la zona de estudio. Los resultados se presentan a continuación:

3.1 Velocidades de hundimiento

Están reflejados en la Figura 10, en función de la distribución de los datos disponibles. Se observa que los mayores valores se presentan desde el Aeropuerto Internacional Benito Juárez hacia el oriente, donde se aprecian velocidades de subsidencia que alcanzan los 0.35 m/año, así como un área de menor extensión pero con hundimientos de similar magnitud al este del sector Río de Los Remedios, de acuerdo a los datos manejados en esta investigación; sin embargo, en trabajos anteriores como los de Santoyo *et al* (2005) y Auvinet *et al* (2017) se mencionan velocidades de hundimiento aún mayores, de hasta 0.4 m/año hacia el centro del Lago de Texcoco. Destaca que justo entre estos dos sectores se encuentra el punto conocido como Peñón de Los Baños, el que es utilizado como referencia topográfica en la CDMX por su hundimiento nulo. La subsidencia decrece desde el Caracol de Texcoco hacia la Avenida de los Insurgentes, en el norte, y hacia el sur de la Calzada Ignacio Zaragoza, hasta valores inferiores a 0.1 m/año. Destaca el caso de la Calzada Ignacio Zaragoza, cuyo trazo coincide con el contacto de depósitos arcillosos blandos y varios conos volcánicos que emergen sobre estos, entre los que se encuentra el Peñón del Marqués. Todo ello da a este sector una condición de transición abrupta, cuyas consecuencias se observan en los hundimientos diferenciales que afectan las infraestructuras en la zona (Santoyo *et al*, 2005; Carreón, 2011)

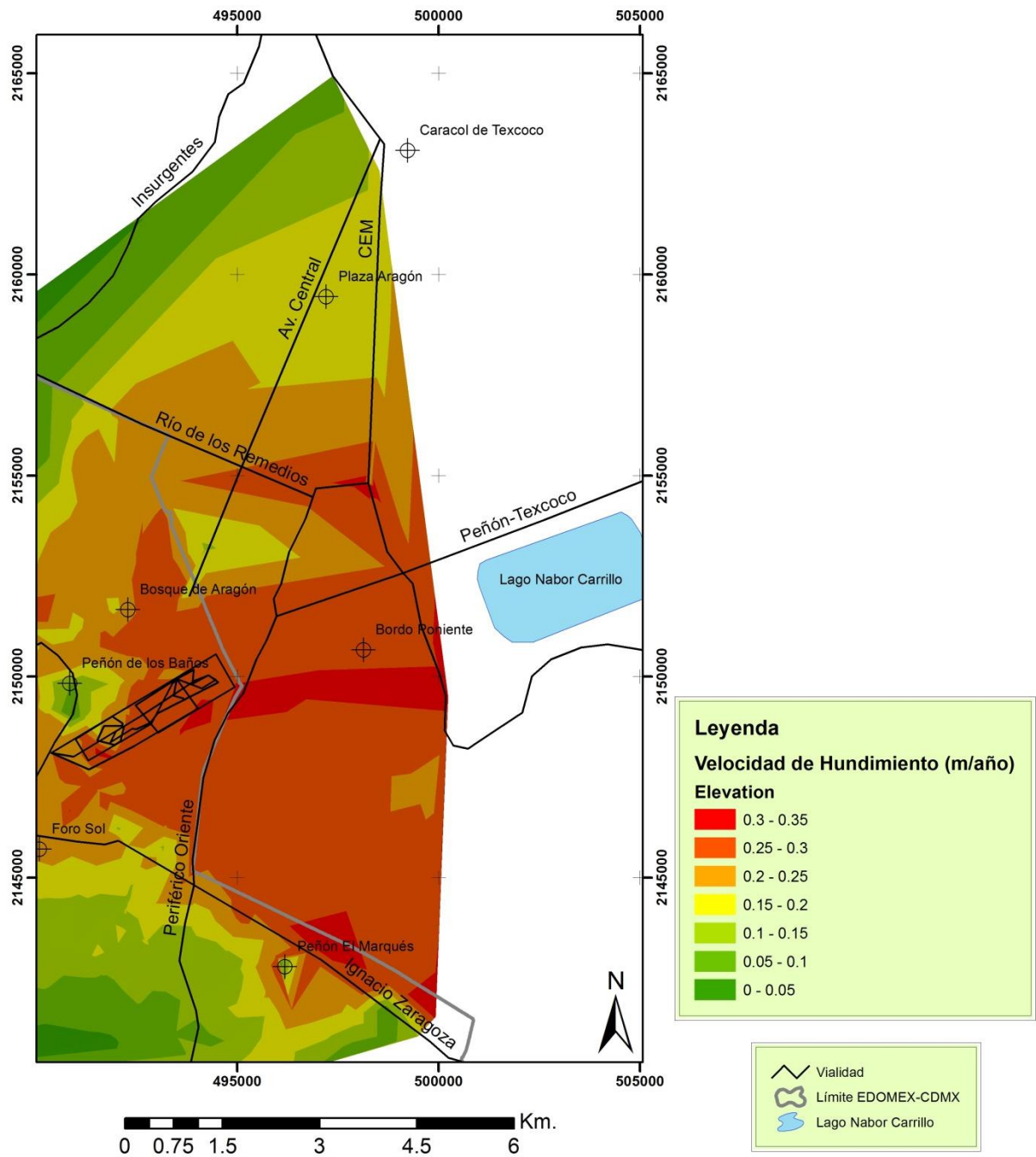


Figura 10 Mapa de velocidades de hundimiento en m/año para el centro-orientel Valle de México.

3.2 Propiedades índice

Se elaboraron las secciones descritas a continuación y presentadas en la Figura 11.

- Una sección recta (A), con rumbo 46NE de contenidos de agua y límites de consistencia desde el entronque de Periférico Oriente y la Autopista Peñón Texcoco, atravesando la zona de construcción del NAICM, hasta la Zona Federal del Lago de Texcoco, casi hasta llegar a la población de San Salvador Atenco.
- Una sección recta (B), con rumbo 46NW de contenidos de agua y límites de consistencia desde Plaza Aragón, frente a la Avenida Central en Ecatepec, hasta el centro del antiguo Lago de Texcoco.
- Una sección recta (C), con rumbo prácticamente N-S para contenidos de agua, desde Plaza Aragón, frente a la Avenida Central en Ecatepec hasta el suroeste del Bordo Poniente

En la Sección A para el contenido de agua (Figura 12) se observa que los valores predominantes son altos, superiores al 200%, entre los cuales contrastan lentes intercalados a los 7, 12 y 20 m de profundidad con contenidos de agua inferiores al 80%, de granulometría limoarenosa, que corresponden con los marcadores A, B y C (Figura 3), indicados por Santoyo *et al* (2005), y que estuvieron expuestos al secado solar o son producto de emisiones volcánicas. Éstos están muy bien definidos al SW de la sección, y se van haciendo difusos desde la ubicación del NAICM hasta desaparecer por completo al NE (el marcador C es el que más se extiende en esa dirección, con contenidos de agua entre 170 y 200% hacia ese extremo), donde se observa un bulbo de contenido de agua superior al 300%, debido a la no desecación del Lago de Texcoco en la Zona Federal y a la naturaleza más arcillosa de los sedimentos, que impiden el flujo del agua. Otra capa con bajo contenido de agua aparece también de forma incipiente al centro de la sección, a 40 m de profundidad, lo cual puede asociarse a la CD, y luego a 60 m, correspondientes a los depósitos profundos, los que no se observan en los extremos de la sección por ausencia de datos disponibles para esta investigación.

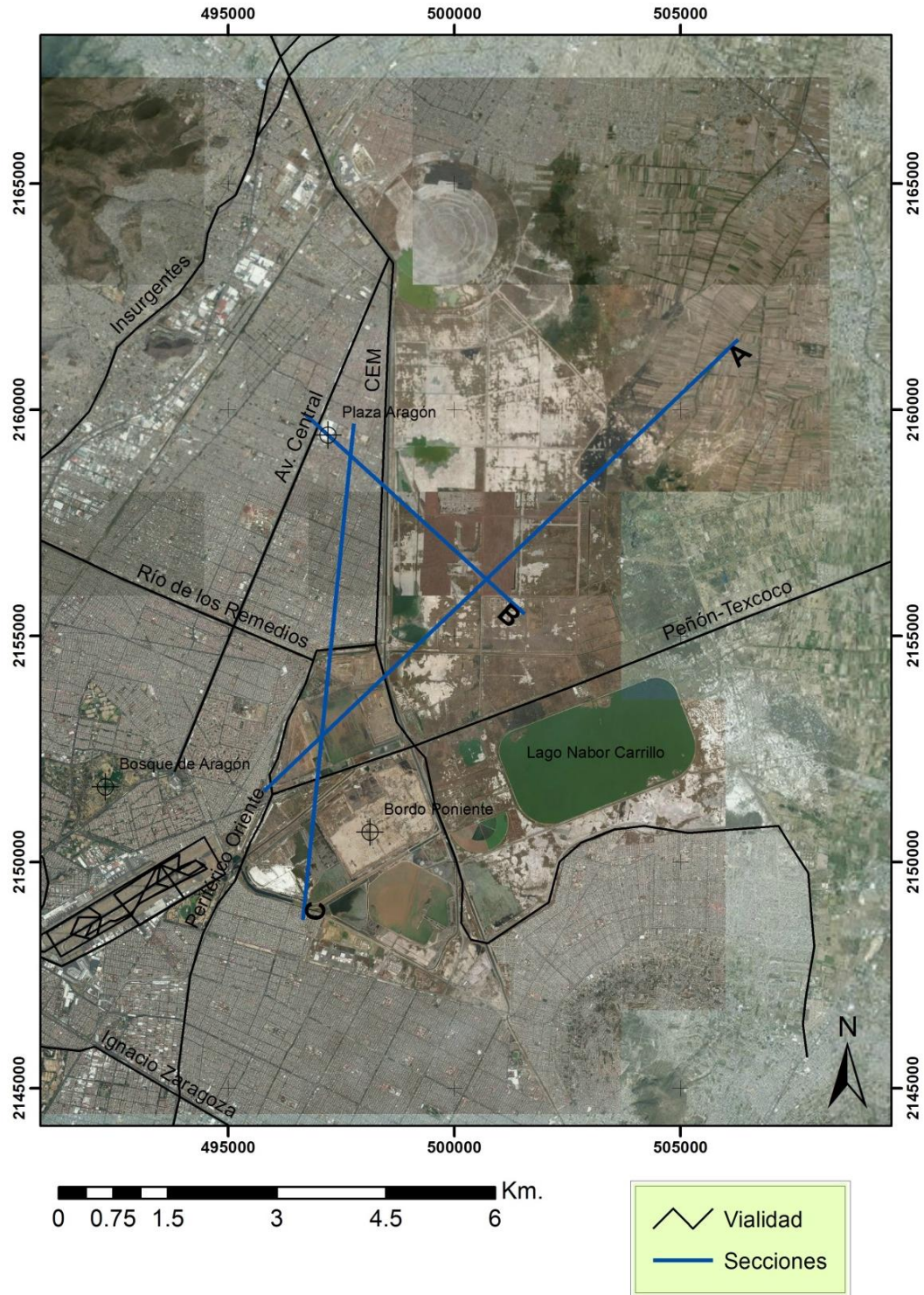


Figura 11 Secciones para contenido de agua y límites de consistencia.

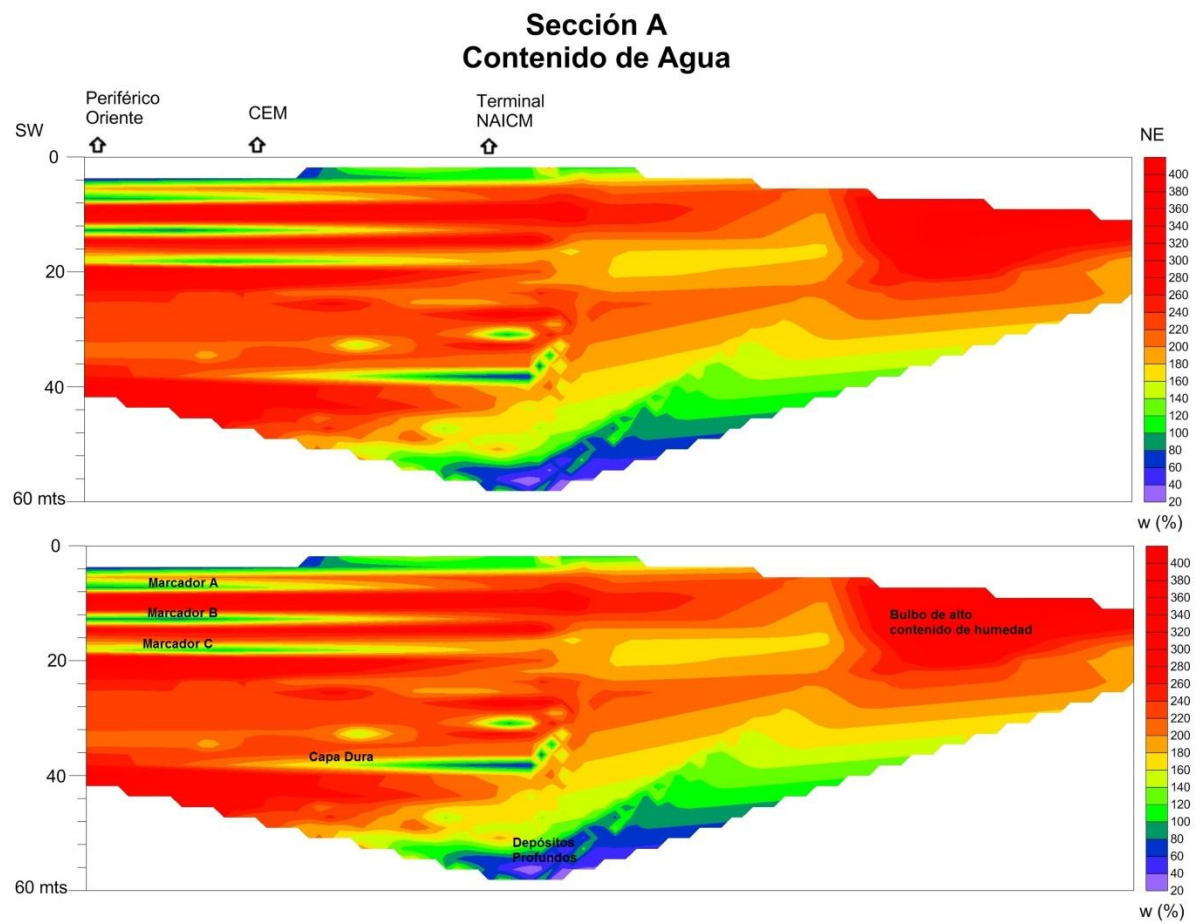


Figura 12 Sección A para contenido de agua.

En cuanto a los valores para límite líquido para la misma sección A (Figura 13), hacia el SW, éstos muestran una tendencia a ser menores al contenido de agua por debajo de los 20 m, profundidades que corresponden a la FAS. Lo anterior es un reflejo de una de las características más particulares de las arcillas del área de estudio, como lo es su muy alta compresibilidad, la cual se ve favorecida por la presencia de lentes arenosos como los observados en la Figura 11 y otros señalados en investigaciones previas (Santoyo *et al*, 2005; Alanis, 2003; Auvinet, *et al*, 2017), pero que al ser de un espesor muy bajo o muy difusos respecto a los depósitos circundantes no se aprecian en secciones como las presentadas en esta investigación. Una situación similar se observa hacia el NE por debajo del bulbo señalado antes para contenidos de agua superiores al 300%, donde los límites líquidos son menores a 180%. Si bien los marcadores son difusos o no existen en esta zona, la expulsión de agua en una situación que implique consolidación de los estratos arcillosos podría ocurrir hacia los depósitos profundos.

En la Sección B (Figura 14) para contenido de agua se observan capas por encima de los 5 m con valores inferiores a 60%, que corresponden a la CS. Así mismo, en el NW, por Plaza Aragón, y hacia el centro de la sección, aparecen los marcadores arenosos, aparentemente los identificados por Santoyo *et al* (2005) como B y C en la Figura 3, aunque la realidad es que esto es complicado de establecer con certeza en la Figura 13 porque los marcadores en este punto ya son difusos, como se había observado antes en la sección A. Al SE de la sección se observan contenidos de agua inferiores a 80% por debajo de los 40 m, correspondientes a la CD. Para profundidades similares al NW de la sección no se tienen datos disponibles para esta investigación.

En cuanto a la sección B para límite líquido (Figura 15), los valores nuevamente tienden a ser similares e inclusive menores que los del contenido de agua en los depósitos de la FAS, pero de forma más clara en una capa entre 22 y 24 m de profundidad hacia el NW de la sección que se hace difusa hacia el centro de la sección, lo cual implica una alta compresibilidad de los materiales en esa zona.

Sección A Límite Líquido

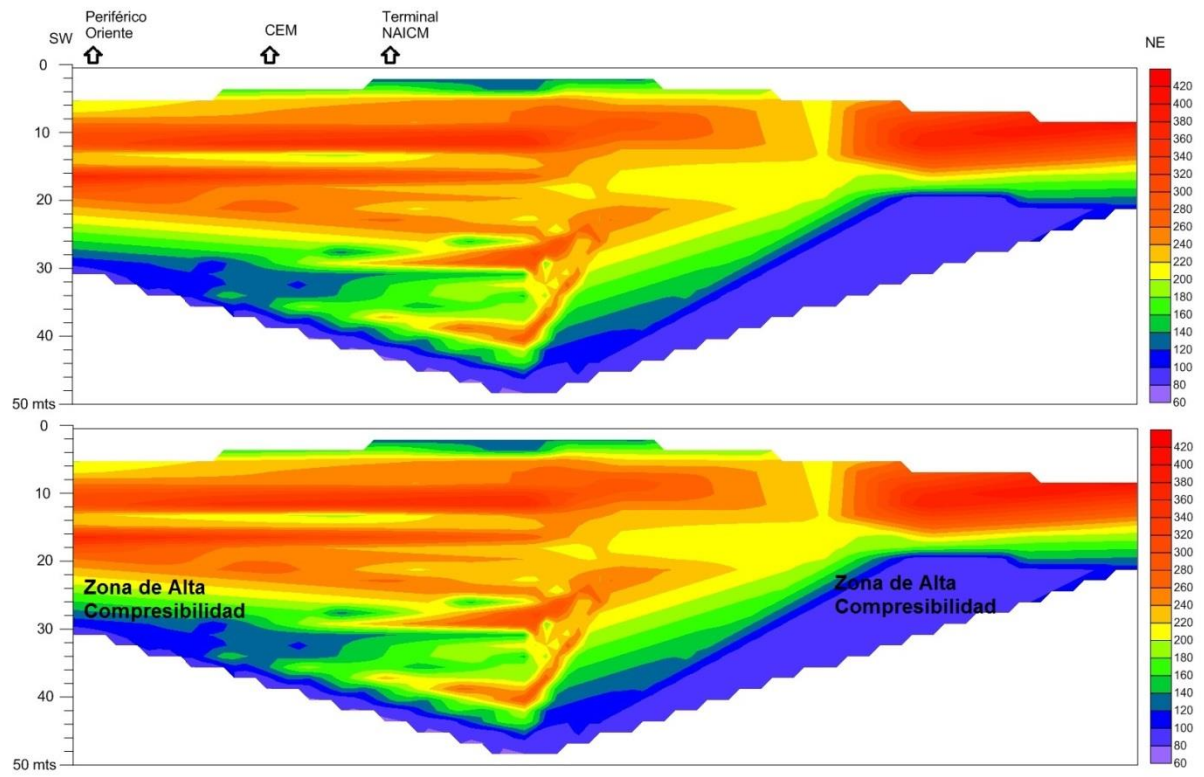


Figura 13 Sección A para límite líquido.

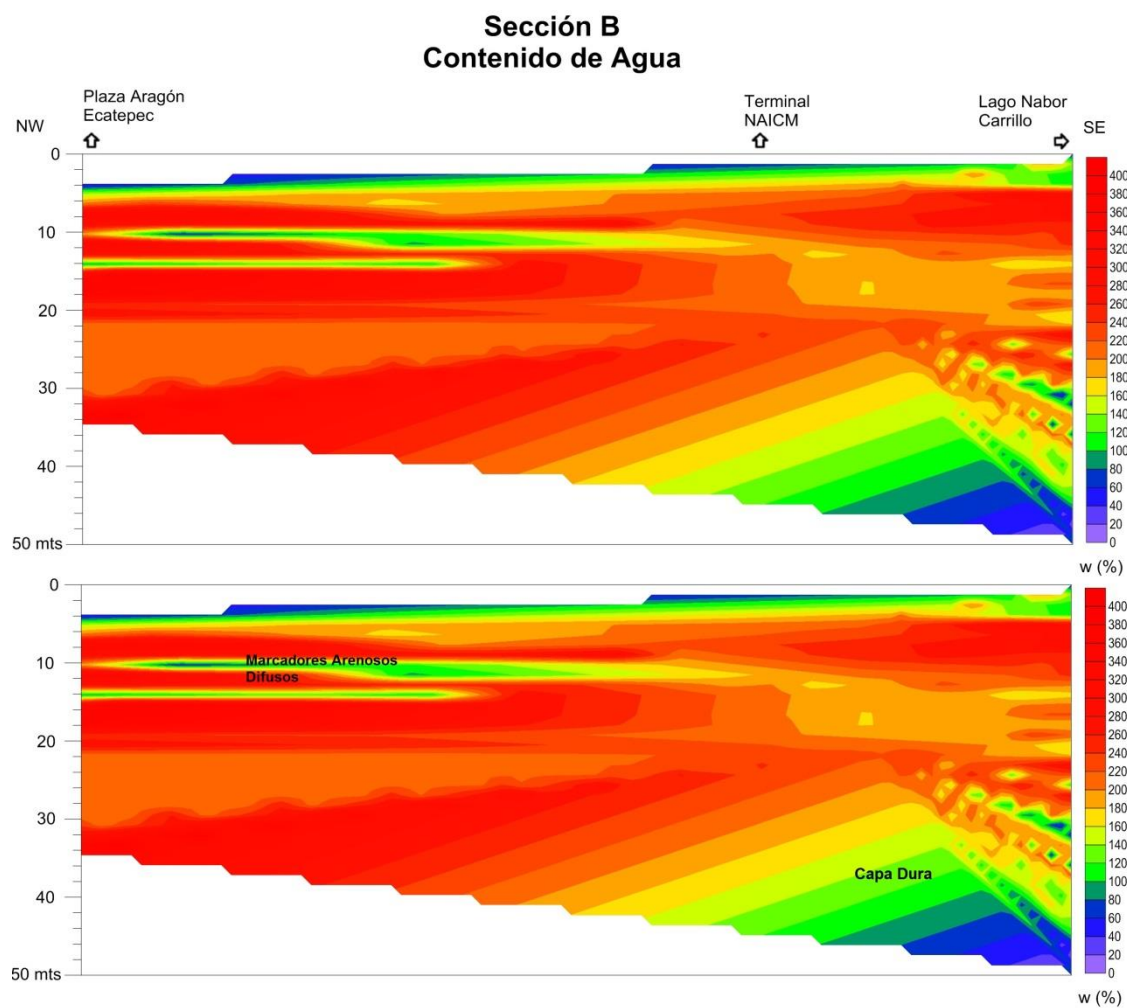


Figura 14 Sección B para contenido de agua.

Sección B Límite Líquido

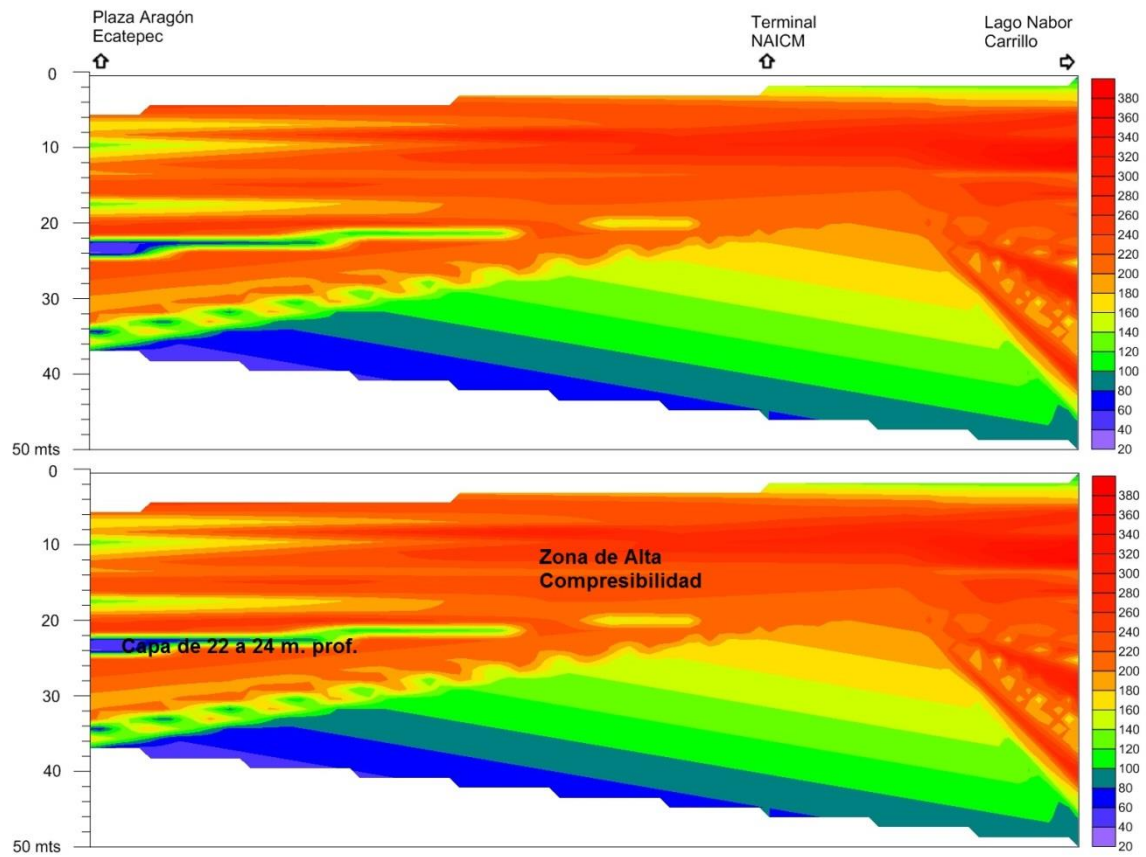


Figura 15 Sección B para límite líquido.

En la sección C para contenido de agua (Figura 16) aparecen nuevamente marcadores arenosos difusos hacia Plaza Aragón en Ecatepec, al norte de la sección, mientras que en Río de los Remedios están mejor definidos, al menos el ubicado a unos 12 m de profundidad. También desde Río de los Remedios hacia el sur, hasta Bordo Poniente llama la atención que debajo de los 34 m los contenidos de agua son altos, superiores a 200%, y que para esas mismas profundidades tanto al norte (lo que correspondería a Plaza Aragón) como al sur (en los alrededores del Peñón de los Baños) los contenidos de agua son contrastantemente menores, por debajo del 100%. Todo ello es un indicio de la ausencia de la CD en este sector. Para el trazado de la sección C no se presenta una sección correspondiente a límite líquido debido a la ausencia de una densidad de datos adecuada

Al comparar las observaciones realizadas a las secciones para propiedades índice con su ubicación en el mapa de hundimientos (Figura 17), se puede determinar que en las zonas con mayor subsidencia se encuentran espesores de depósitos con alto contenido de agua rodeados de materiales comparativamente menos saturados, como es el caso de la CD en la sección C en el sector de Río de los Remedios (Figura 16); o donde los marcadores arenosos señalados por Santoyo *et al* (2005) muestran valores de contenido de agua igualmente contrastantes, como ocurre en el sector entre Periférico Oriente o el Circuito Exterior Mexiquense, al SW de la sección A (Figura 12). Se infiere que los hundimientos ocurren con mayor magnitud en estos puntos porque se ven favorecidos por la presencia de materiales menos saturados por donde es más viable que ocurra la expulsión de agua de las capas compresibles. El movimiento de agua además se vería favorecido por la existencia de una alta densidad de pozos de extracción de aguas subterráneas para cubrir la demanda urbana de la CDMX (Lesser, 2005; Escobar y Palacios, 2012; SEMARNAT, 2015).

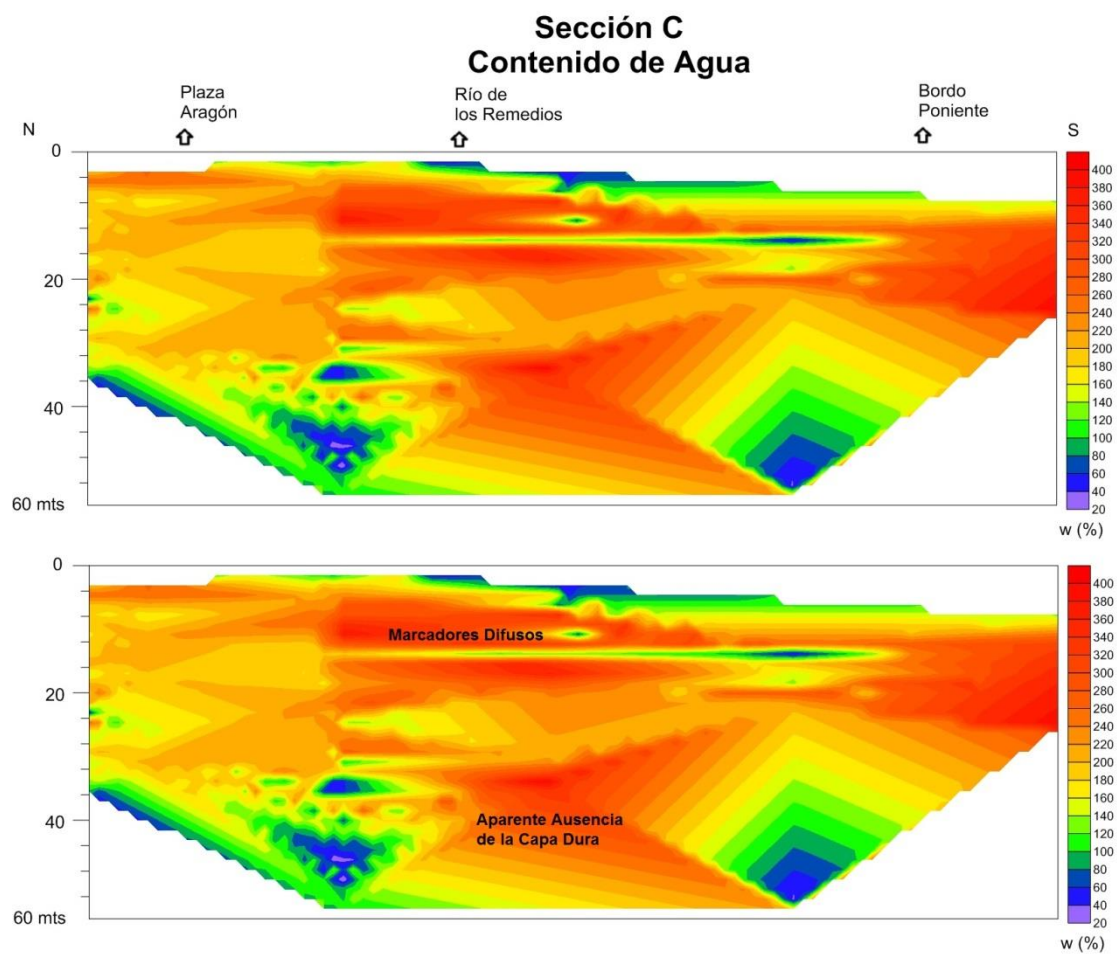


Figura 16 Sección C para contenido de agua.

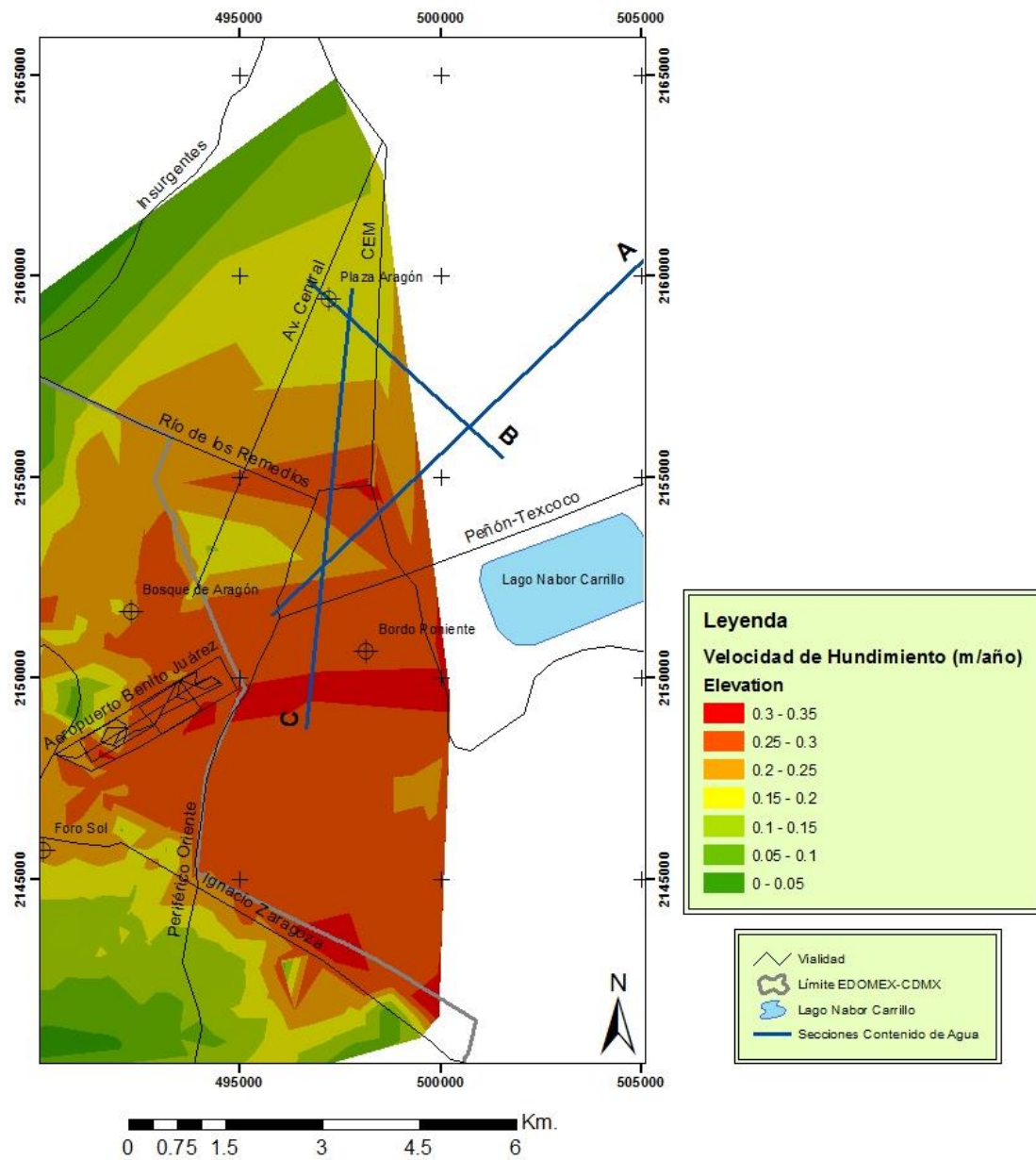


Figura 17: Secciones para contenido de agua superpuestas sobre el mapa de hundimientos para el área de estudio.

3.3 Propiedades mecánicas

Se elaboraron las secciones descritas a continuación y presentadas en la Figura 18.

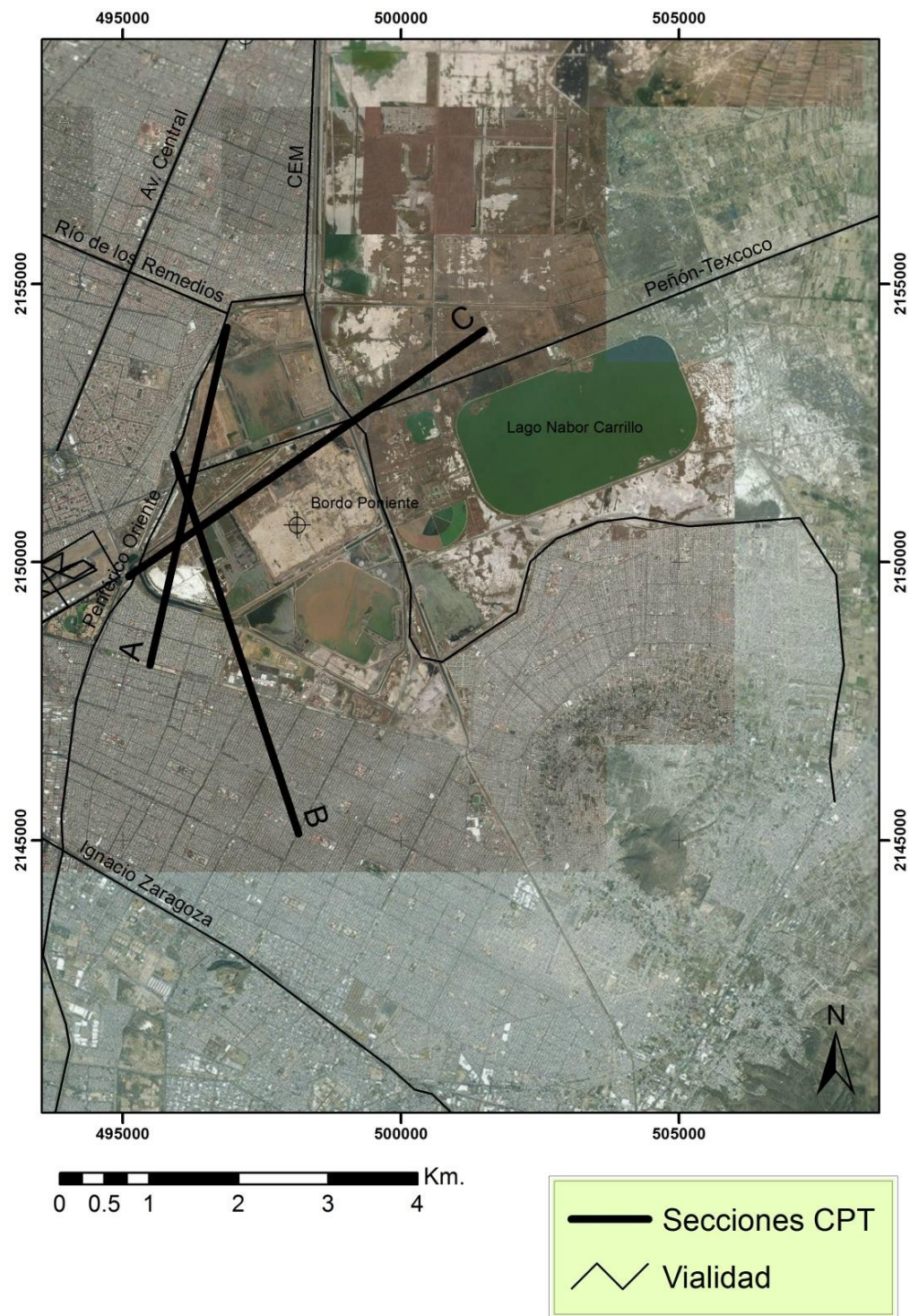


Figura 18 Secciones para resistencia de hincado en CPT.

- Una sección recta (A), con rumbo 13NE de resistencia de punta en prueba CPT desde la Avenida Bordo Xochiaca, cerca del entronque con Avenida Cuauhtémoc en Nezahualcóyotl hasta el entronque de Periférico Oriente con la Avenida Río de los Remedios, en la CDMX.
- Una sección recta (B), con rumbo 19NW de resistencia de punta desde el entronque de Periférico Oriente y la Autopista Peñón Texcoco hasta la Avenida Vicente Villada, cerca del Parque del Pueblo en Nezahualcóyotl.
- Una sección recta (C), con rumbo 60NE de resistencia de punta desde la Alameda Oriente hasta el norte del Lago Nabor Carrillo en los terrenos del NAICM.

En la Sección A para resistencia al hincado en prueba CPT (Figura 19) se observa que en el NE de la sección, hacia la Avenida Río de los Remedios, la FAS prácticamente aflora en superficie, seguramente apenas cubierta por rellenos antrópicos superficiales, mientras que la costra superficial se manifiesta de forma clara hacia Bordo Xochiaca, donde alcanza valores entre 15 y 60 kg/cm². También se aprecia un lente duro entre 8 y 14 m de profundidad, con una resistencia al hincado entre 20 y 30 kg/cm², aunque puntualmente supera los 50 kg/cm² en Río de Los Remedios y en el cruce de la sección con la Autopista Peñón Texcoco; esta capa atraviesa toda la sección y corresponde al marcador identificado por Santoyo *et al* (2005) como A y posiblemente también el B (Figura 3), y se estarían observando unidos en la sección por la poca separación entre ellos y por la triangulación de valores que ejecuta el software Surfer para generar la sección.

Por debajo de los Marcadores A y B y hasta los 28 m de profundidad las resistencias son inferiores a los 5 kg/cm², y se incrementan hasta 10 kg/cm², entre los 28 y los 40 m; en ambos casos correspondiendo a los sustratos de la FAS. Entre los 40 y 48 m de profundidad, aparece la Capa Dura, aunque no de forma constante, pues está ausente al SW de Río de Los Remedios, coincidiendo con los mayores contenidos de agua reportados para ese sector en la sección C. Ya se había citado en este documento que en el centro del Lago de Texcoco la CD tiende a desaparecer por la no desecación del antiguo Lago de Texcoco, aún en los períodos de mayor retroceso de las aguas (Santoyo *et al*, 2005). Entre Río de Los Remedios y la intersección de la sección con la Autopista Peñón-Texcoco, a 28 m de profundidad se observan picos de resistencia que alcanzan los 20 kg/cm², que pueden identificarse como el marcador F

(Figura 3) (Santoyo *et al*, 2005). Finalmente los depósitos profundos aparecen hasta los 56 m entre Río de Los Remedios y el cruce de la sección con la Autopista Peñón Texcoco y a los 52 m hacia el SW de la sección.

En la sección B para la resistencia al hincado en prueba CPT (Figura 20) se aprecian mayores espesores de la costra superficial, especialmente entre Río de Los Remedios y Bordo Poniente, así como los marcadores A y B fusionados, con resistencias al hincado máximas de 45 kg/cm^2 en el mismo sector, que aumentan en dirección SE, hacia la Calzada Ignacio Zaragoza, hasta los 80 kg/cm^2 . Por debajo, se observa la FAS presentando resistencias al hincado inferiores a 5 kg/cm^2 , y algunos lentes duros intercalados, entre los que parece destacar el Marcador F definido por Santoyo *et al* (2005). A partir de los 26 m y hasta los 41 m, la resistencia de las arcillas crece a 10 kg/cm^2 hasta los 41 m, donde se manifiesta la CD, de forma clara al NW de la sección con valores máximos de 90 kg/cm^2 y que decrecen hasta 25 kg/cm^2 hacia el SE. Los depósitos profundos comienzan a aparecer a partir de los 54 m, con intercalaciones arcillosas en el centro de la sección, entre el Bordo Poniente y el Bordo Xochiaca.

En la sección C para resistencia de hincado (Figura 21) la Costra Superficial al SW de la sección alcanza valores cercanos a los 100 kg/cm^2 , haciéndose difusa hacia el NE. Se observan los marcadores A, B y C que se identificaron claramente en la Sección A para contenido de agua (Figura 12) y más abajo, a 28 m y al SW de la sección el Marcador F, con una resistencia al hincado de 20 kg/cm^2 . Todas estas capas están embebidas en la FAS con resistencias entre 5 y 10 kg/cm^2 . La CD se manifiesta desde los 36 hasta los 45 m con una intercalación arcillosa muy bien definida en su centro, con resistencias al hincado de casi 100 kg/cm^2 y que disminuyen por debajo de los 25 kg/cm^2 hacia el NE, después del cruce de la Autopista Peñón-Texcoco y el Circuito Mexiquense. Los depósitos profundos aparecen de manera uniforme desde los 54 m.

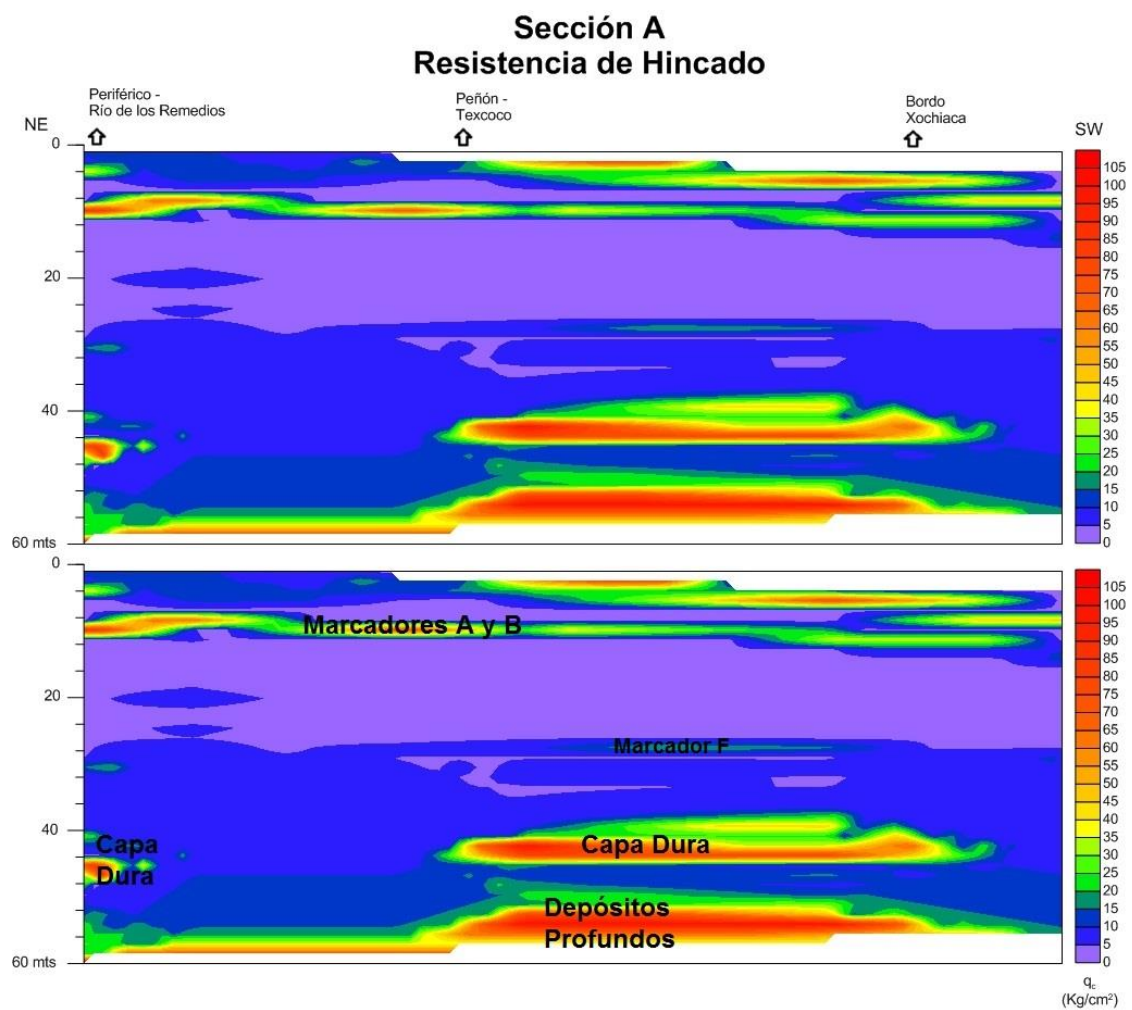


Figura 19 Sección A para resistencia al hincado.

Sección B Resistencia de Hincado

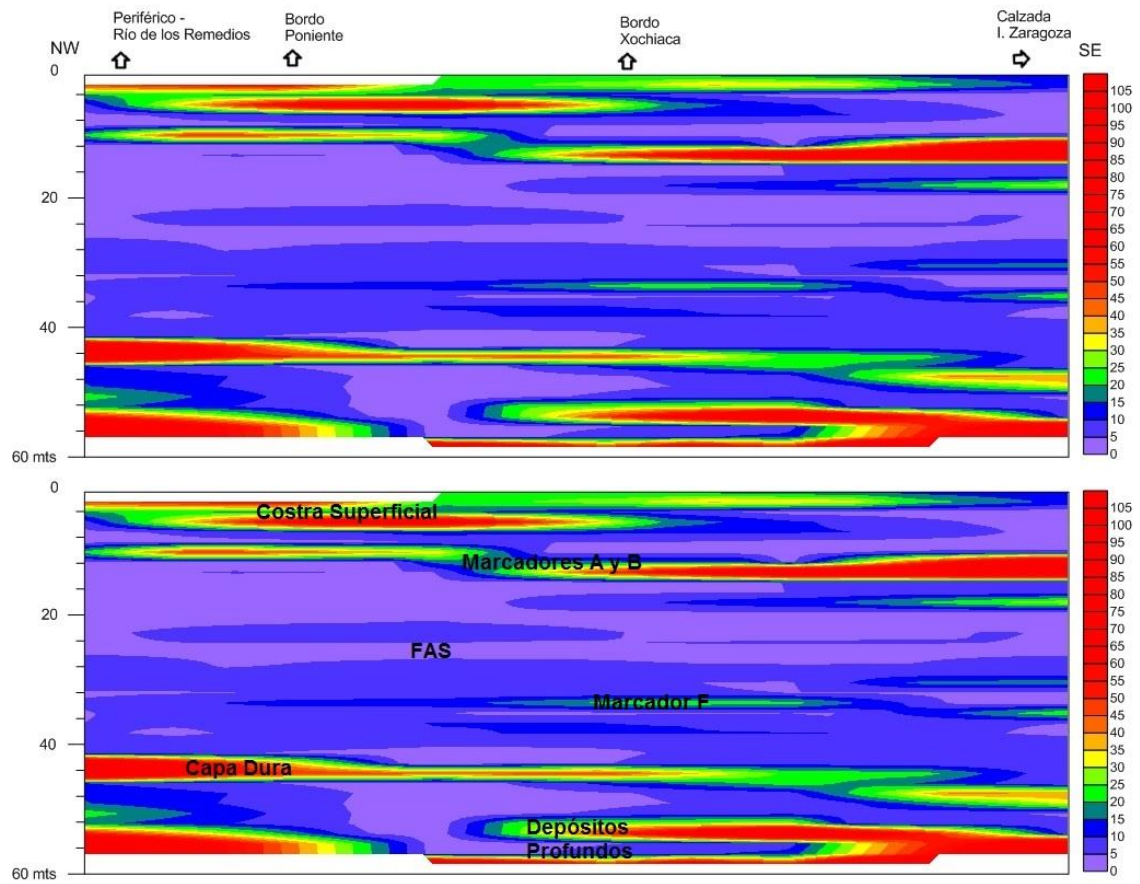


Figura 20 Sección B para resistencia al hincado.

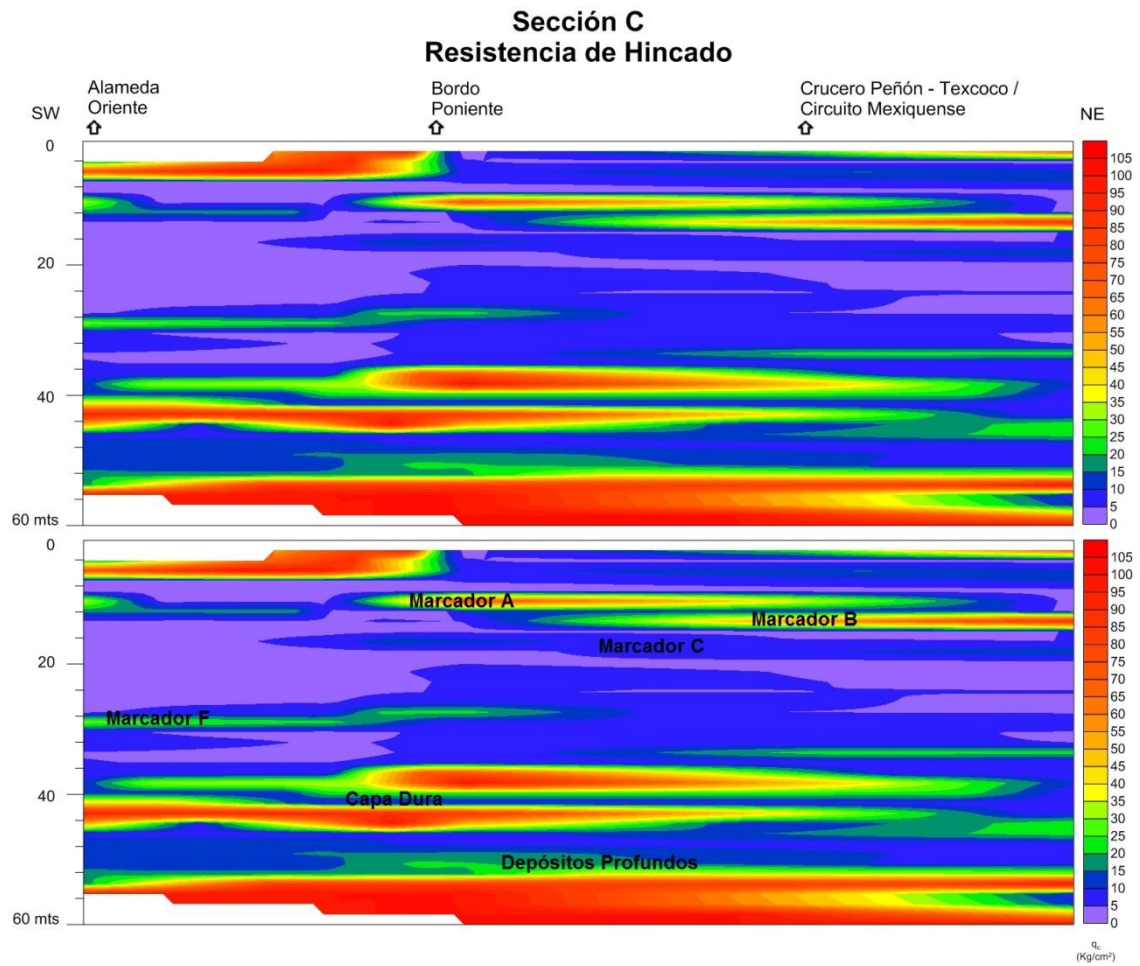


Figura 21 Sección C para resistencia al hincado.

Velocidades de Hundimiento (m/año) Centro - Oriente del Valle de México

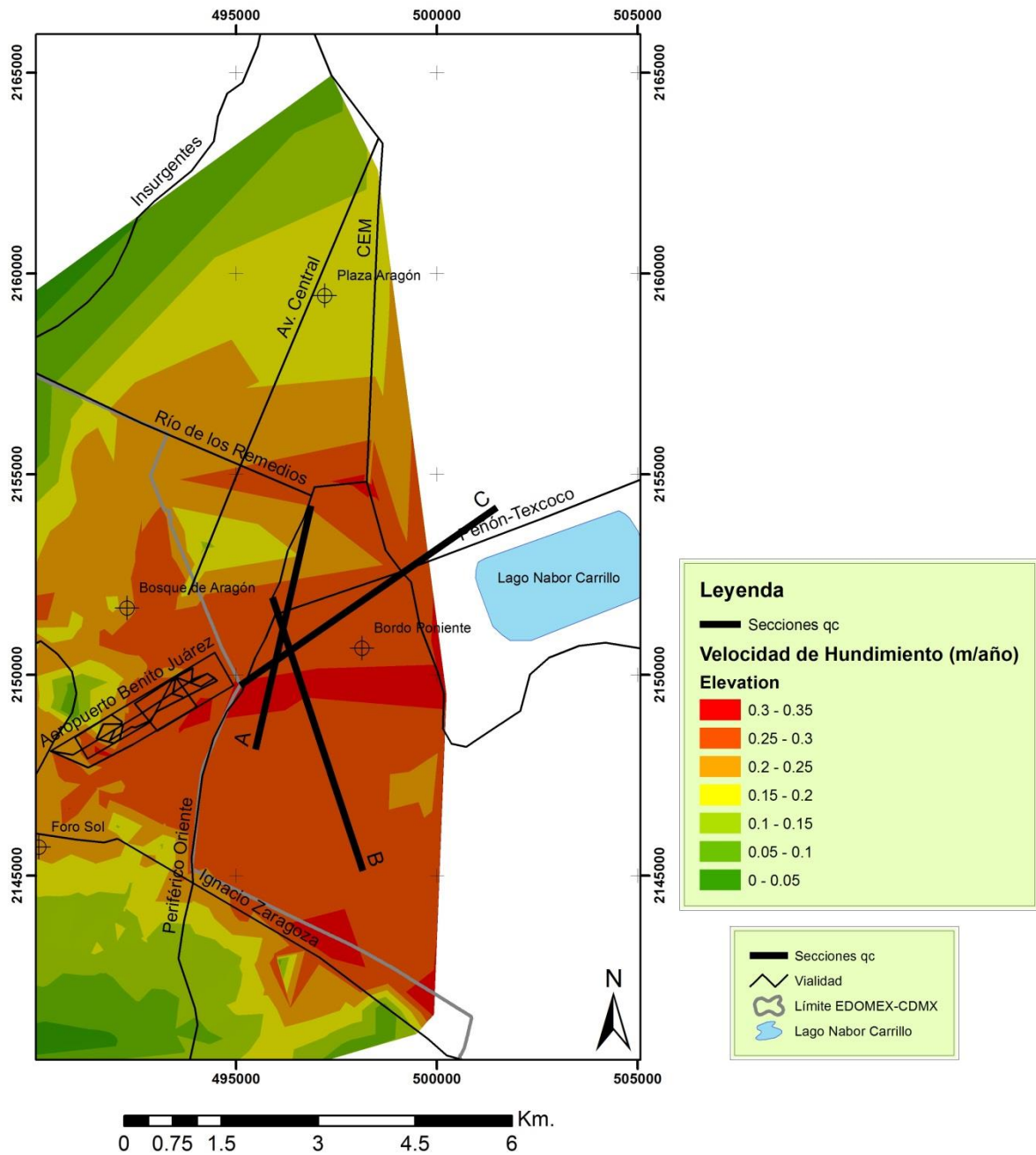


Figura 22: Secciones para resistencia al hincado CPT superpuestas sobre el mapa de hundimientos para el área de estudio.

Se debe señalar que el tramo entre Río de Los Remedios y la intersección de la sección A con la Autopista Peñón Texcoco donde no se manifiesta la CD, coincide con un área de menores hundimientos (entre 0.14 y 0.20 m/año) en relación a las zonas circundantes (superior a 0.30 m/año) (Figuras 19 y 22). También ocurre que, en las secciones B y C para resistencia de hincado ubicadas completamente en el área con hundimientos superiores a 0.3 m/año al sur y al oriente del Aeropuerto Benito Juárez, la CD se manifiesta de manera bastante uniforme.

Lo anterior refuerza la idea antes expresada de que los estratos arenosos sirven como vías de escape para el agua expulsada en los procesos de consolidación de los sedimentos más compresibles. Por ello, en las zonas de mayor hundimiento dentro del área de estudio, la presencia de la CD está asociada con mayores tasas de hundimiento anual. Es importante aclarar que eso no es aplicable en la actualidad para otras zonas del Valle de México, como por ejemplo el centro de la CDMX, donde a pesar de que la CD está documentada como un estrato que se manifiesta de manera constante (Santoyo *et al*, 2005; Auvinet *et al*, 2017), los hundimientos no superan los 0.25 m/año.

Esto puede explicarse al observar que en la actualidad en el área de estudio existe una intensa explotación de acuíferos para cubrir la demanda de la población en la CDMX (Lesser, 2005; Escobar y Palacios, 2012; SEMARNAT, 2015), mientras que en el centro de la ciudad actividades de este tipo prácticamente han desaparecido, lo cual se ve reflejado en procesos de consolidación menos intensos. Adicionalmente, se puede notar que la zonificación COVITUR (Figura 2), el área de estudio se encuentra ubicada en la zona de Lago Virgen, caracterizada por haber sufrido precargas mucho menores que el centro de la CDMX, ubicado en las zonas de Lago Centro I y II, que han sufrido precargas desde los tiempos de la ocupación española en México, lo que afecta de manera local la magnitud de hundimientos, que se ve disminuida en la actualidad para dicho sector.

3.4 Propiedades dinámicas

Las propiedades dinámicas para el área de estudio fueron determinadas de manera indirecta utilizando las correlaciones empíricas planteadas por Ovando y Romo (1991) expuestas en el apartado 1.6 de este documento, y partiendo de los datos de resistencia al hincado en prueba CPT de las secciones de las Figuras 18, 19 y 20. De esta forma, se tiene que para la velocidad de onda cortante se aplicó la expresión mostrada en la Ecuación 5, y de acuerdo a la Tabla 1, los valores de los coeficientes η y N_{kh} fueron asignados de la siguiente manera:

- Para los depósitos considerados como arcillosos, correspondientes a las Formaciones Arcillosas Superior e Inferior, se asignó $\eta = 23.33$ y $N_{kh} = 9.5$.
- Para los depósitos considerados como arenosos, ubicados en la Costra Superficial, la Capa Dura, los Depósitos Profundos o en los marcadores definidos por Santoyo *et al* (2005), se asignó $\eta = 40.0$ y $N_{kh} = 11.1$.

Seguidamente, tras obtener los valores correspondientes a las V_s se aplicó la expresión de la ecuación 6, asignando a los depósitos arcillosos de las FAS e inferior un valor de $\gamma_s = 1.2 \text{ t/m}^3$ y para las capas duras arenosas $\gamma_s = 1.65 \text{ t/m}^3$, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 2.

De esta manera se obtuvieron las secciones A, B y C para velocidad de onda cortante y módulo de rigidez, mostradas en las Figuras 23 a 28.

En la Sección A para velocidad de onda cortante (Figura 23) se observa que los valores de V_s para la costra superficial varían entre 80 y 120 m/s. La FAS presenta valores de entre 20 y 60 m/s, y dentro de ella se observan los marcadores A y B con velocidades de entre 120 y 180 m/s y el difuso marcador F, con valores del orden de los 100 a 120 m/s. La FAI presenta velocidades de 80 a 120 m/s, y finalmente, la CD y los DP tienen un rango entre 120 y 300 m/s.

En la Sección A para módulo de rigidez (Figura 24) los valores de G correspondientes a la costra superficial varían entre 4,500 y 7,500 t/m^2 , mientras que los en la FAS son inferiores a 500 t/m^2 . Para los marcadores A y B los valores se presentan entre 1,000 y 3,500 t/m^2 , con picos puntuales de hasta 8,000 t/m^2 , mientras que en el marcador F crecen hasta los 2,000 t/m^2 . En la FAI se observan valores de entre 500 y 1,500 t/m^2 , y para la CD y los DP varían entre 5,000 y 12,000 t/m^2 .

En la Sección B para velocidad de onda cortante (Figura 25) los valores de V_s en la costra superficial se presentan en un rango desde 120 hasta 210 m/s. En la FAS las variaciones ocurren entre 40 y 70 m/s, estando embebidos en estos depósitos los marcadores A y B con velocidades entre 120 y 240 m/s, con picos puntuales de 320 m/s hacia el SE; asimismo, el marcador F muestra valores del orden de los 100 a 120 m/s. En la FAI las velocidades son entre 40 y 100 m/s y para la CD y los DP el rango es de entre 120 y 260 m/s.

En la Sección B para módulo de rigidez (Figura 26) los valores de G de la CS varían desde 4,500 t/m² hasta picos puntuales de 9,000 t/m², mientras que en la FAS son inferiores a 500 t/m². En los marcadores A y B se observan variaciones entre 1,000 y 4,500 t/m², con picos puntuales de 11,000 t/m² al acercarse a la Calzada Ignacio Zaragoza, mientras que en el marcador F crecen hasta los 2000 t/m². En la FAI se observan valores de entre 500 y 1,500 t/m², y para la CD y los DP varían entre 5,000 y 12,000 t/m², observándose valores máximos para la CD a la altura de Río de Los Remedios.

En la Sección C para velocidad de onda cortante (Figura 27) los valores de V_s para la costra superficial se acercan a los 300 m/s, mientras que en la FAS varían entre 30 y 70 m/s. En los marcadores A y B se observan velocidades entre 130 y 200 m/s. El marcador C, que había sido identificado de forma muy difusa en la sección correspondiente a la resistencia al Hincado no se diferencia aquí de la FAS. El marcador F sí se muestra de forma clara al SW con velocidades de 110 a 130 m/s. Luego, la FAI presenta velocidades de 70 a 130 m/s, mientras que en la CD el rango es entre 150 y 280 m/s, alcanzando toques de 320 m/s en los DP.

En la Sección C para módulo de rigidez (Figura 28) los valores de G en la CS se observan valores superiores a 11,000 t/m², siendo en la FAS inferiores a 500 t/m². Para los marcadores A y B los valores varían entre 2,500 y 5,000 t/m², mientras que en el marcador F apenas superan los 500 t/m². En la FAI se observan valores de entre 500 y 2,000 t/m²; para la Capa Dura el rango está entre 3,500 y 10,000 t/m² y finalmente en los Depósitos Profundos se alcanzan picos superiores a los 12,000 t/m².

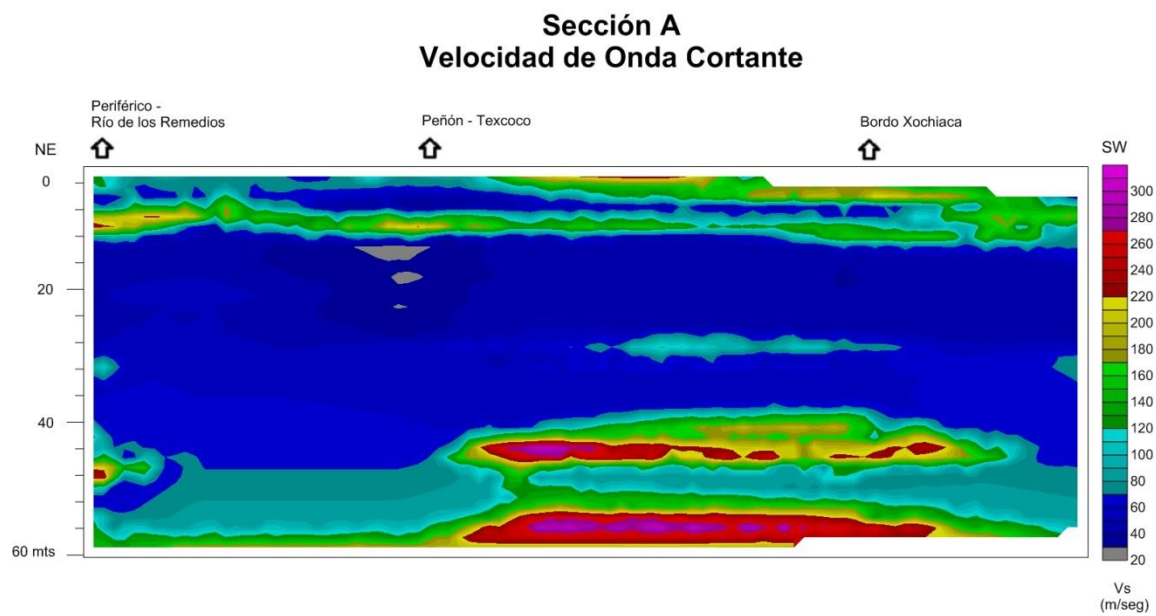


Figura 23 Sección A para velocidad de onda cortante.

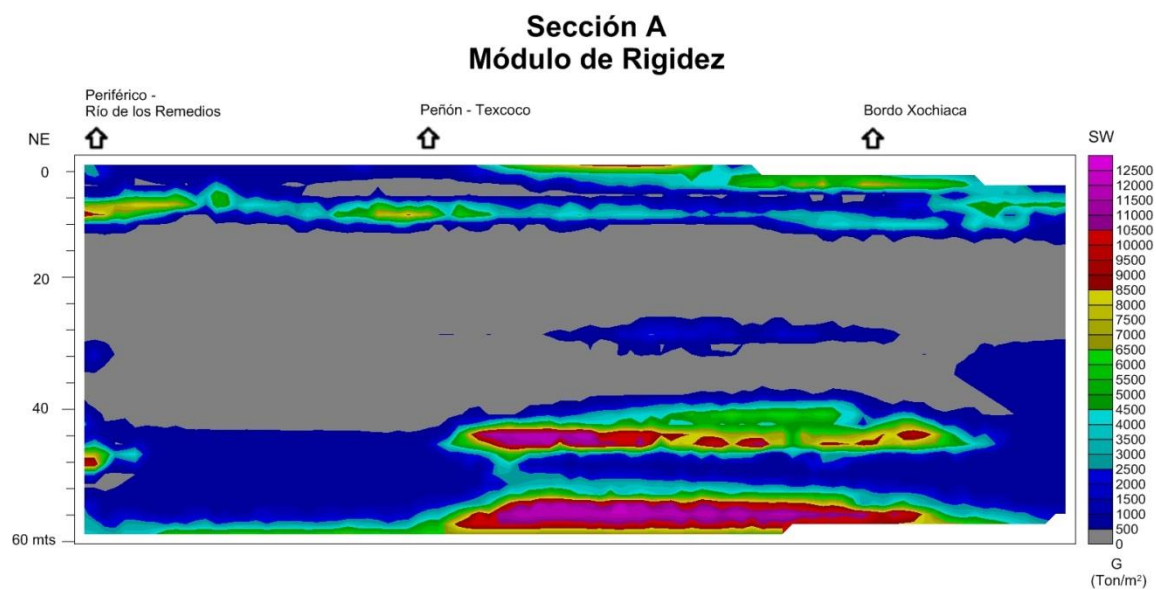


Figura 24 Sección A para módulo de rigidez.

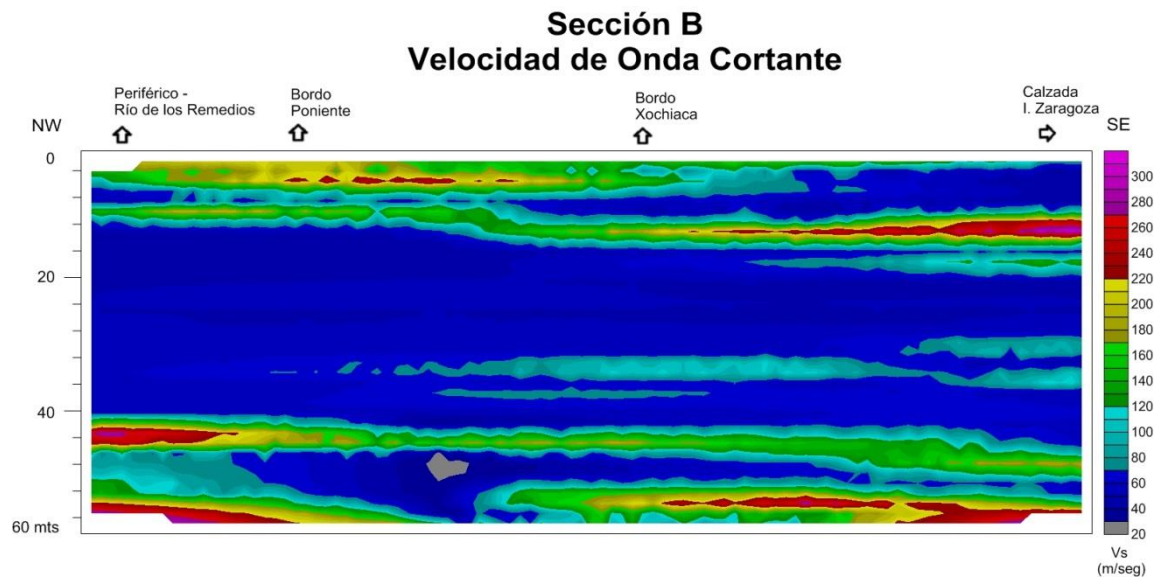


Figura 25 Sección B para velocidad de onda cortante.

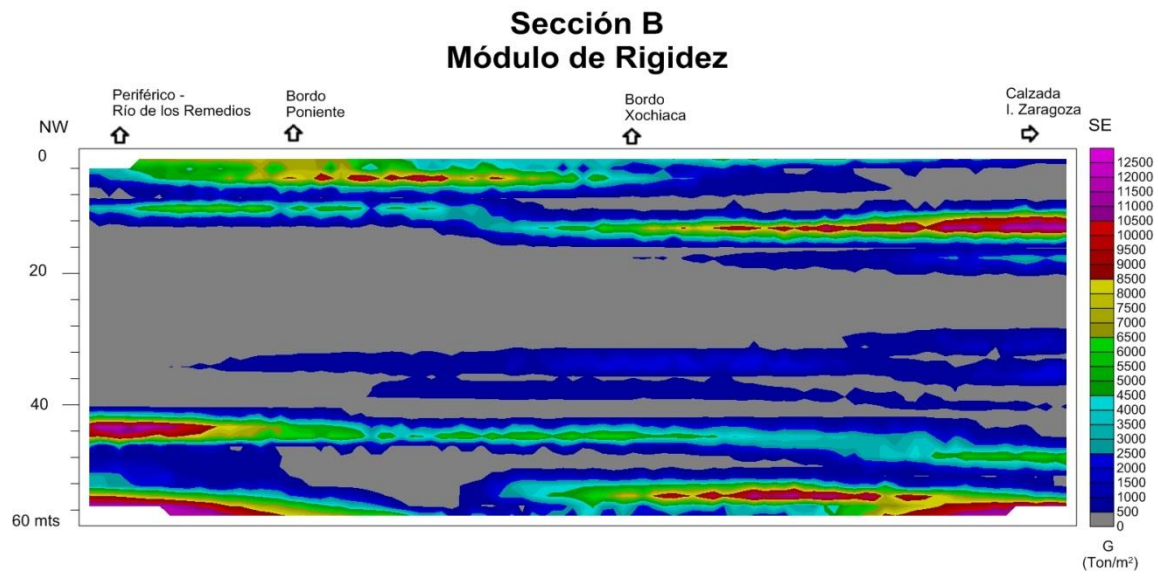


Figura 26: Sección B para módulo de rigidez.

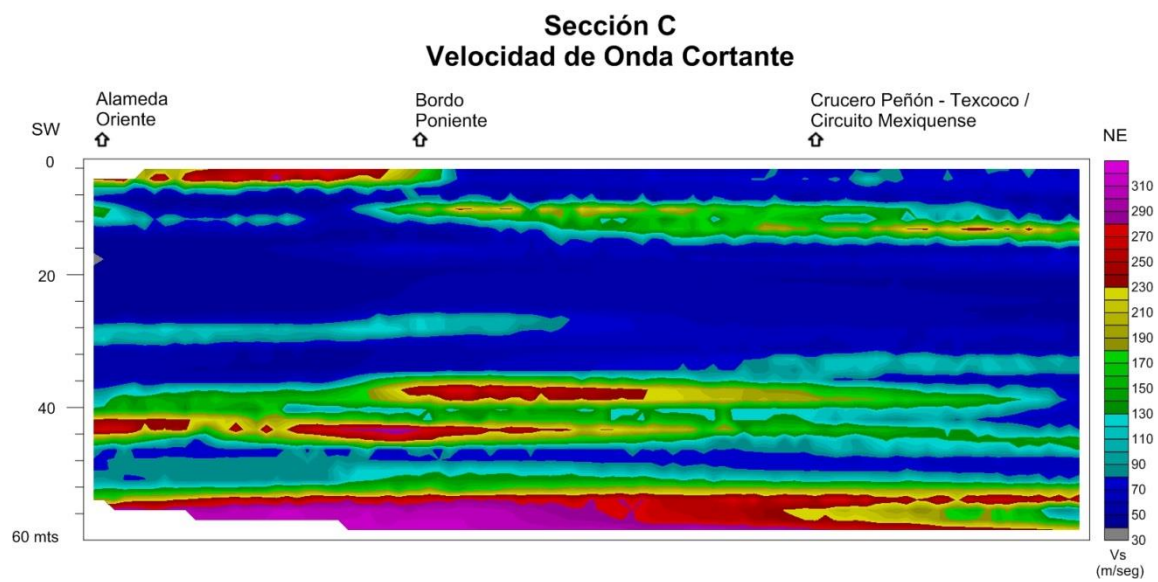


Figura 27 Sección C para velocidad de onda cortante.

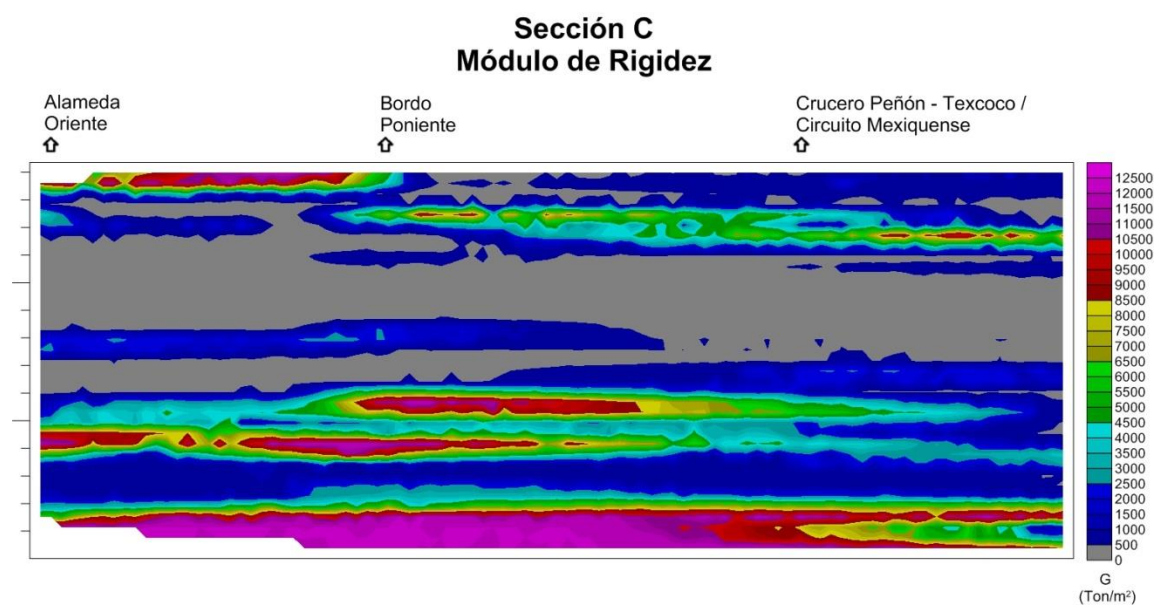


Figura 28 Sección C para módulo de rigidez.

3.5 Descripción de las capas características del Valle de México

A partir de las observaciones realizadas en las Figuras 11 a 27, las capas características del Valle de México fueron descritas como se muestra a continuación:

Costra Superficial (CS):

Se trata de un material de relleno, generalmente granular y afectado por el secado solar. Tiende a aumentar su espesor hasta más de 5 m al oriente del área de estudio, desde el Circuito Mexiquense hasta Río de Los Remedios y Bordo Xochiaca, mientras que desaparece hacia la zona Federal del Lago de Texcoco. Sus contenidos de agua varían entre 40 y 120%, su resistencia al hincado en prueba CPT es superior a 20 kg/cm², alcanzando picos superiores a los 100 kg/cm². En cuanto a sus propiedades dinámicas, su velocidad para propagación de ondas cortantes es de 120 a 200 m/s con picos de 280 m/s, y para el Módulo de Rigidez los valores oscilan entre 3,000 y 8,000 t/m², con picos superiores a 12,000 t/m².

Formación Arcillosa Superior (FAS):

Es un depósito arcilloso producto de sedimentación en un ambiente lacustre durante la existencia del antiguo Lago de Texcoco. Es altamente compresible y prácticamente uniforme en toda el área de estudio. Presenta contenidos de agua altos, de entre 250 y 400%, resistencias al hincado en prueba CPT inferiores a 5 kg/cm² en las capas superiores, que aumentan hasta 10 kg/cm² en la base. En lo referente a propiedades dinámicas, las velocidades de onda cortante son entre 40 y 80 m/s, mostrando mayores valores hacia la base y para el Módulo de Rigidez se observa que es siempre inferior a 500 t/m².

Marcadores Arenosos:

Santoyo *et al* (2005) definieron ocho lentes duros arenosos conocidos como marcadores, de los cuales seis están intercalados en la Formación Arcillosa Superior y otros dos en la Formación Arcillosa Inferior. De ellos, solamente se observaron en las secciones construidas en esta investigación dos de ellos, los identificados como A y B, y otros dos, C y F, de manera muy difusa; todos dentro de la FAS. Aparecen a profundidades de entre 7 y 28 m. Su granulometría es limo-arenosa, con contenidos de agua inferiores al 80%, resistencias al hincado en prueba CPT desde 20 hasta 100

kg/cm² (en ocasiones el imposibilitando el hincado del penetrómetro en la prueba CPT), velocidades de onda cortante entre 80 y 220 m/s y módulo de rigidez de entre 500 y 7,000 t/m², valor cuya amplia variabilidad va de la mano con los diferentes grados de compactación de los marcadores en el área de estudio.

Es importante aclarar que la ausencia en las secciones de los demás marcadores no implica que estos no existan dentro del área de estudio, sino que son tan difusos que es impráctico ubicarlos con herramientas gráficas de este tipo. En cambio, podrían identificarse al observar aumentos en el número de golpes de una prueba de SPT o en picos de resistencia y fricción para una gráfica de CPT para un punto específico.

Finalmente, establecer que por su granulometría arenosa contribuyen a la consolidación de capas arcillosas, pues funcionan como vías de escape al agua expulsada durante dicho proceso.

Capa Dura (CD):

Es un estrato arenoso que es el resultado de retrocesos de las aguas del antiguo Lago de Texcoco. Su distribución en el área de estudio no es uniforme y su presencia coincide con los sectores de mayor tasa de hundimiento (superiores a 0.3 m por año), por lo que se interpreta que tiene una fuerte influencia en la consolidación de los depósitos arcillosos infra y suprayacentes. Su contenido de agua es menor a 140% mientras que la resistencia al hincado CPT muestra valores desde 25 kg/cm² y superiores a 100 kg/cm² que impiden el hincado del penetrómetro cónico con frecuencia. Las velocidades de onda cortante están entre 150 y 250 m/s, superando los 300 m/s puntualmente, y Módulos de Rigidez de 5,000 a 9,000 t/m² y picos puntuales superiores a 12,000 t/m²

Formación Arcillosa Inferior (FAI):

Se trata de depósitos arcillosos más o menos uniformes en el área de estudio, con contenidos de agua entre 200 y 400%, resistencias al hincado CPT entre 10 y 20 kg/cm², velocidades de onda cortante entre 60 y 140 m/s y módulos de rigidez de 2,000 a 5,000 t/m².

Depósitos Profundos (DP):

Son depósitos de origen fluvial, previos a la existencia del antiguo Lago de Texcoco y su sistema asociado. En esta investigación los datos recabados a estos materiales corresponden al tope de los depósitos, por lo que no se puede establecer su espesor total. Presentan contenidos de agua inferiores a 100%, velocidades de onda superiores a 300 m/s y módulos de rigidez por encima de 12,000 t/m².

Finalmente, la información presentada en este apartado se muestra esquematizada en la Tabla 4.

Tabla 4 Cuantificación de valores de propiedades geotécnicas para capas características del Valle de México.

Capa Característica	Espesor (m)	ω (%)	q_c (kg/cm ²)	V_s (m/s)	G (t/m ²)
Costra Superficial (CS)	0-7	40-120	>20	120-280	3000-12000
Formación Arcillosa Superior (FAS)	33-40	250-400	<10	40-80	<500
Marcadores Arenosos	<1	<80	>20	80-220	500-7000
Capa Dura (CD)	5-10	<140	>25	150-200	5000-9000
Formación Arcillosa Inferior (FAI)	5-15	200-400	10-20	60-140	200-5000
Depósitos Profundos (DP)	N/A	<100	>100	>300	>12000

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

Al terminar la investigación se han alcanzado las conclusiones que se enlistan a continuación

- Para el área de estudio las mayores tasas de hundimiento se presentan desde el Aeropuerto Internacional Benito Juárez hacia el oriente, además de otro sector con menor extensión alrededor de la intersección de la Avenida Río de los Remedios con Periférico Oriente, donde se registran desde superficie subsidencias que alcanzan los 0.35 m/año. Los menores hundimientos están asociados a la proximidad con conos volcánicos que emergen sobre las arcillas lacustres e islotes del antiguo Lago de Texcoco, así como a zonas con mayor historial de cargas aplicadas desde la colonización española.
- Las zonas donde ocurre mayor subsidencia muestran, principalmente para la Formación Arcillosa Superior, contenidos de agua entre 200 y 400%, en contacto con capas comparativamente menos saturadas, por las que presumiblemente ocurre la expulsión de agua durante el proceso de consolidación.
- Fueron identificados, para la Formación Arcillosa Superior, espesores en los que el contenido de agua es claramente superior al límite líquido. Por ello, fueron descritos como los materiales con mayor compresibilidad en el área de estudio.
- Las capas arenosas características del Valle de México que están en contacto con depósitos arcillosos potencian la compresibilidad de estos últimos, al servir como estratos drenantes, reflejándose en mayores tasas de hundimiento medidas en superficie. Estos efectos son más apreciables en la actualidad en depósitos arcillosos como los del área de estudio, que están siendo sometidos a una intensiva explotación de sus acuíferos, lo que favorece los procesos de migración de líquido y la consecuente consolidación. Adicionalmente, han sufrido esfuerzos de precarga comparativamente más pequeños que los de otros sectores como el centro de la CDMX, donde el historial de cargas aplicadas al suelo es mayor y tiene una data de alrededor de 500 años.

- En las secciones elaboradas para esta investigación se observa que las Formaciones Arcillosas Superior e Inferior aparecen en el área de estudio de manera uniforme, tanto en espesor como en la magnitud de los valores de las propiedades geotécnicas consideradas. En cambio, los marcadores arenosos se tornan difusos especialmente hacia el centro del antiguo Lago de Texcoco. Adicionalmente, la Capa Dura, desaparece entre Río de Los Remedios y la Autopista Peñón Texcoco y tiende a hacerse difusa desde el Bordo Xochiaca hacia la Calzada Ignacio Zaragoza. Por último, los depósitos profundos se encuentran uniformemente entre 54 y 58 m de profundidad y los datos recabados en esta investigación corresponden únicamente al tope de los mismos.
- Los datos referentes a propiedades dinámicas presentados en esta investigación fueron calculados exclusivamente mediante correlaciones empíricas a partir de la información referente a la resistencia al hincado en prueba CPT, obteniendo resultados acordes con los materiales que componen cada una de las capas características del Valle de México.

Recomendaciones:

Buscando que en el futuro próximo se realicen investigaciones similares a esta, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Elaborar nuevos trazados para secciones verticales en el área de estudio, que se complementen con las ya presentadas y permitan refinar las conclusiones obtenidas.
- Elaborar secciones verticales para propiedades dinámicas utilizando correlaciones empíricas distintas a las presentadas, utilizando pesos específicos obtenidos en pruebas de laboratorio para validar la fiabilidad de los datos obtenidos en cada caso. Asimismo, elaborar secciones a partir de datos para propiedades dinámicas obtenidas en pruebas de campo y laboratorio.
- Complementar los análisis realizados en esta investigación con la clasificación por métodos visuales y por granulometría para refinar las conclusiones referentes a la composición de las capas típicas para el Valle de México.

- Utilizar métodos geoestadísticos diferentes a la interpolación lineal, como el kriging, y comparar los resultados obtenidos.
- Evitar bajo cualquier circunstancia el uso de los resultados presentados como un sustituto a los trabajos de exploración geotécnica. En todo caso, pueden servir como una herramienta que permita planificar campañas de exploración más concretas y asertivas.

REFERENCIAS

- Alanís, R. (2003). *Caracterización Geotécnica del Ex-lago de Texcoco*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alberro, J., Auvinet, G. y Hernández, R. (2000) *Asentamientos por secado de la superficie del terreno*. Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Almanza, F., Rangel J. e Ibarra, E. (2018). Las denominadas Series Arcillosas de los depósitos del Valle de México ¿son realmente arcillas?. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.
- Auvinet, G., Méndez, E. y Juárez, M. (2017). *El Subsuelo de la Ciudad de México*. México DF. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Broms, B. (1978) Subsidence for Lowering Water Level. *International Conference on Evaluation and Prediction of Subsidence*.
- Cabrera, M. (2009) *Evaluación de la Seguridad del Relleno de Desechos Sólidos en la IV Etapa del Bordo Poniente*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carreón, D. (2011). Identificación y Caracterización de los Diferentes Tipos de Fracturas que Afectan el Subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Recuperado el 3 de mayo de 2019 en http://www.ai.org.mx/ai/archivos/ingresos/dora_carreon/trabajo_ingreso_dra_carreon.pdf.
- Del Castillo, R. (1978). *El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México*. Simposio de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Segunda Edición. Nueva York. Wiley-Interscience.
- Escobar, B. y Palacios, O. (2012 Abril/Junio). Análisis de la Sobreexplotación del Acuífero Texcoco. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2, 67-84.
- García, C. (2011). *Control Local del Hundimiento Regional mediante Inyección de Agua en el Valle de México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, T., Rosas, A., Kalach, A. y Quadri, G. (1998). *La Ciudad y sus Lagos*. Ciudad de México. Editorial Clio.
- Hernández, E. et al (2014 Septiembre) *The DRASTIC-Sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers*

subject to differential land subsidence, with application to Mexico City. Hydrogeology Journal, 22, 1469-1485.

Hernández, F., Juárez, M. y Auvinet, G. (2018). Variación Espacial de las Propiedades del suelo en la Zona del Exlago de Texcoco Sometido a Precarga. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.*

Instituto de Ingeniería. (2013). *Catedral Metropolitana, Hundimiento y Rescate.* Catedral. México DF. Universidad Nacional Autónoma de México.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake.* Washington. Prentice Hall.

Lesser, J. (2005) El Agua Subterránea de la Ciudad de México. *V Congreso de Aguas Subterráneas.*

López, N. et al (2018) Evaluación de asentamientos y desplazamientos horizontales en terraplenes de prueba con precarga, drenes y vacío en la zona del ex Lago de Texcoco, México. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.*

Martínez, D. (2012). *Evolución de las Cimentaciones en la Zona de Lago de la Ciudad de México.* Tesis de Especialidad. Universidad Nacional Autónoma de México.

Méndez, E. (2003). Aplicación de la Geoinformática a la Zonificación de los Suelos de la Cuenca de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Mooser, F., Montiel, A. y Zúñiga, A. (1996). *Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla.* Ciudad de México. Comisión Federal de Electricidad.

Moreno, G. (2015 Diciembre/2016 Febrero). *Experiencias Geotécnicas en el Suelo del Lago de Texcoco.* Geotecnia, 238, 11-18.

Murillo, R. (2015 Diciembre/2016 Febrero). *Comportamiento del suelo y obras en el ex Lago de Texcoco.* Geotecnia, 238, 20-27.

Ovando, E. y Romo, M. (1991). Estimación de la Velocidad de Propagación de Ondas S en la Arcilla de México con Ensayes de Cono. *Sismodinámica, vol 2.* 107-123.

Parra, N. y Nava, O. (2018). Estimación de la Magnitud de los Hundimientos Regionales en un Proyecto de Drenaje Pluvial en el Lago de Texcoco. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.*

Ribero, L. (2015). Introducción a los métodos geoestadísticos aplicados a la Hidrogeología. Recuperado el 22 de febrero de 2019 en <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/4796/2/Anexo%202.pdf>.

SACMEX (1983 a 2016). Archivo Histórico.

Santoyo V, E. (2010). *Exploración de Suelos*. México DF. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

Santoyo V, E., Lin X. R., Ovando S. E. (2015). *El Cono en la Exploración Geotécnica*. 1^{ra} reedición. México DF. Editorial TGC geotecnia.

Santoyo V, E., Ovando S. E., Mooser, F. y León P. E. (2005). *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. México DF. Editorial TGC geotecnia.

SEMARNAT. (2015). *Atlas del Agua en México*. México DF. CONAGUA.

Sísmica de Suelos (2010 a 2017). Archivo Histórico.

Schmitter, J., Pérez, A. y Romero W. (2018). Reflexiones sobre el Comportamiento del Subsuelo Arcilloso del Ex-lago de Texcoco, al ser excavado. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.

Súter, M. et al. (1991) *Vulcanism and Active Faulting in the Central Part of the Mexican Volcanic Belk*. University of San Diego.

TGC Geotecnia (1995 a 2017). Archivo Histórico.

Vega, L. (2003). *Análisis y Modelación de algunas Propiedades Dinámicas de las Arcillas del Ex Lago de Texcoco*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Waltam, A. (1989) *Ground Subsidence*. Londres. Editorial Blackie.