

Caracterización de anomalías geotécnicas en las zonas lacustre y de transición de la ciudad de México

Méndez Edgar, Auvinet Gabriel & Matus Ulises
Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, Distrito Federal, México



2011 Pan-Am CGS
Geotechnical Conference

ABSTRACT

The present paper gives a general idea about the advances until now attained in the geotechnical characterization of many sites and sub-zones of Mexico City, that present particular features and where soil profile differs from those commonly found in the typical lacustrine and transition zones of the geotechnical zoning of the Technical Norms for Design and Construction of Foundations of the Federal District Building Code (GDF, 2004).

RESUMEN

El presente trabajo ofrece un panorama general acerca de los avances hasta ahora logrados en la caracterización geotécnica de numerosos sitios y sub-zonas de la ciudad de México que presentan características particulares en los que la estratigrafía difiere significativamente de la considerada como típica de las zonas lacustre y transición de la zonificación geotécnica vigente que se encuentra en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (GDF, 2004).

1 INTRODUCTION

En los últimos diez años, se han logrado avances significativos en el conocimiento del subsuelo de la Cuenca de México, principalmente a través de los trabajos de exploración realizados para diferentes tipos de obras que han permitido la actualización y ampliación del mapa de zonificación geotécnica. Los resultados de estos estudios se encuentran dispersos en los archivos de numerosas instituciones y empresas; sin embargo, se han hecho importantes esfuerzos para recopilar, procesar y sintetizar una gran parte de esta información.

2 ANTECEDENTES

Han transcurrido más de cinco decenios desde la primera publicación de la zonificación geotécnica de la Ciudad de México (*Raúl J. Marsal, 1952*) y a lo largo de este periodo, el Reglamento de Construcciones de la ciudad ha sido objeto de seis actualizaciones con sus respectivas zonificaciones geotécnicas. Con ello, queda demostrado que la elaboración de zonificaciones geotécnicas cada vez más precisas para fines de reglamentación y como soporte de los estudios realizados para proyectos específicos, es una tarea que tiene que efectuarse en forma continua.

La división en tres zonas (Lago, Transición y Lomas) de la zonificación geotécnica se ha conservado en la reglamentación a través de los años por las grandes ventajas que presenta su sencillez para los ingenieros. Sin embargo, se sabe que existen numerosas sub-zonas y sitios particulares en los que la estratigrafía local difiere significativamente de la considerada como típica de cada zona. La presencia de estas anomalías ha sido causa de múltiples problemas de comportamiento de

cimentaciones que por ende ocasionan daños estructurales en las edificaciones. Como ejemplos, se pueden mencionar los casos de la Catedral Metropolitana y el Centro Cultural Universitario Tlatelolco, asentados sobre restos de pirámides.

El grupo del Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM ha emprendido un trabajo sistemático de caracterización geotécnica de las anomalías. Hasta este momento, el énfasis se ha puesto en el Centro histórico (Tenorio, Méndez y Juárez, 2009) y en las anomalías existentes a lo largo del trazo de la futura Línea 12 del Metro (Méndez y Auvinet, 2008). El presente trabajo constituye una etapa adicional en la caracterización de anomalías existentes en las zonas lacustre y de transición.

3 ANOMALÍAS GEOTÉCNICAS

Una anomalía se define como una irregularidad presente en algún medio homogéneo. En consecuencia, una anomalía geotécnica es la que ostenta una discordancia estratigráfica que puede ser de origen natural o antropogénico.

3.1 Metodología

Se recurrió, de manera amplia y sistemática a la utilización de la información contenida en mapas y cartografía histórica, así como en fotografías aéreas antiguas, documentos que dan cuenta de los aportes prehispánicos y de la evolución de la zona de estudio, dejando ver las transformaciones que tuvieron lugar a través del tiempo.

Debe mencionarse que el interés en el tema de las anomalías de la zona lacustre de la ciudad de México no

es algo reciente. Algunos ingenieros precursores de la Mecánica de Suelos han señalado su existencia.

El "Plano reconstructivo de la región de Tenochtitlán al comienzo de la conquista", elaborado por el arquitecto Luis González Aparicio de 1968, proporcionó la distribución espacial inicial de las anomalías prehispánicas que se caracterizaron, Figura 1. El trabajo de González Aparicio no parece totalmente exento de errores, pero constituyó una excelente base de información inicial para definir la existencia y la geometría de algunas anomalías.

Posteriormente se consultaron otras fuentes para encontrar anomalías que no estuvieran indicadas en el trabajo anterior, tales como las chinampas y rellenos artificiales construidos en años recientes, entre otras.

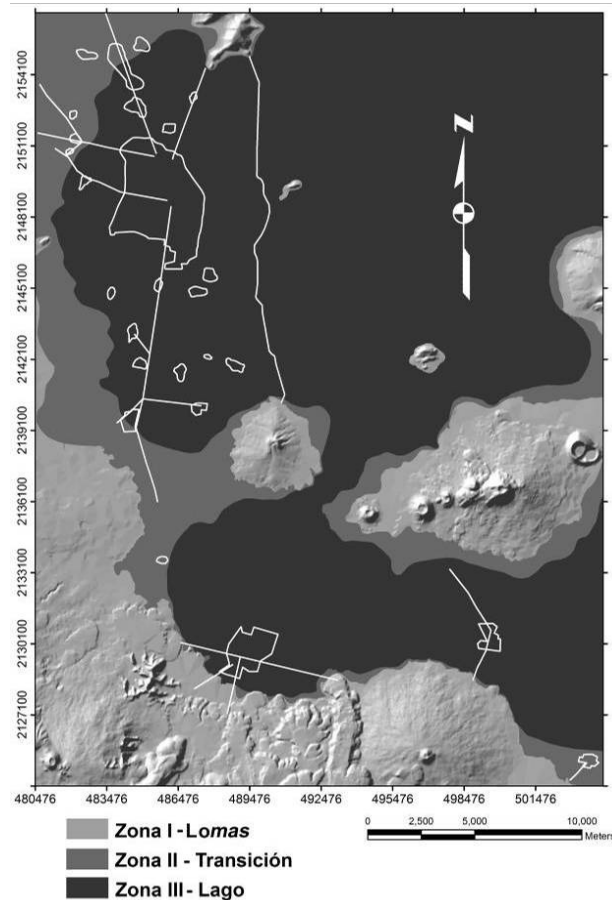


Figura 1. Anomalías geotécnicas tomadas del Plano de L. González Aparicio de 1968, bajo el contexto de la zonificación geotécnica

Se llevaron a cabo recorridos de campo en los sitios identificados en el plano de L. G. Aparicio, con el propósito de buscar evidencias que demostraran la presencia de las anomalías. La emersión aparente del terreno, grietas, hundimientos diferenciales, o existencia de pirámides prehispánicas, eran el tipo de evidencias que se buscaban en los recorridos. Afortunadamente, en un buen número de los sitios de estudio, se encontró la presencia de edificios antiguos de periodo colonial

(principalmente iglesias) construidos sobre las ruinas de edificios prehispánicos, en los que se encontraban varias de las evidencias mencionadas.

En cada uno de los sitios visitados, se tomaron varias fotografías para documentar los sitios. En la Figura 2 se muestra una fotografía de las afueras de la Iglesia de San Andrés Mixquic en donde se puede observar la emersión aparente del edificio y la formación de grietas.



Figura 2. Entrada del atrio de la Iglesia de San Andrés Mixquic, donde se aprecian los efectos del hundimiento regional y la presencia de anomalías prehispánicas

Por otra parte, se empleó la información puntual sobre la estratigrafía y propiedades del subsuelo, que proporcionan los diferentes sondeos geotécnicos, almacenada en formato digital en una base de datos denominada Sistema de Información Geotécnica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG), para identificar los espesores de los materiales de relleno, los cuales constituyen la evidencia más importante de la existencia de anomalías.

En el Sistema SIG-SG del grupo del Laboratorio de Geoinformática se han almacenado sondeos desde hace más de 15 años.

Se analizaron sólo 73 sondeos geotécnicos de los más de 10,000 existentes en el Sistema SIG-SG, debido a que sólo estos se encontraron dentro o en los alrededores de las anomalías estudiadas. En la Figura 3 se muestra, la distribución espacial de los sondeos geotécnicos.

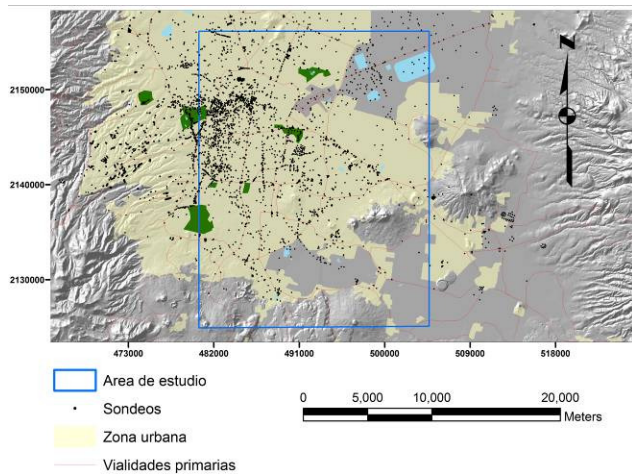


Figura 3. Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, Laboratorio de Geoinformática, I de I, UNAM

Una segunda base de datos consultada, corresponde a la información desarrollada por la Dirección de Salvamento Arqueológico del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), en la que se presentan los sitios arqueológicos en los que el personal de dicha dependencia ha realizado calas en diversos puntos de la ciudad. Esta base proporciona información acerca de la función y composición de los materiales que forman algunas de las anomalías. Estas características se consideraron convenientes para evidenciar las anomalías.

Así también, la base de datos de Eras Arqueológicas desarrollada a partir del trabajo realizado por W. T. Sanders, J. Parson y R. Santley (1979) es la tercera fuente considerada por el Laboratorio de Geoinformática para fundamentar la existencia de anomalías en función de la evolución de los asentamientos humanos en la Cuenca de México.

3.2 Caracterización geotécnica de anomalías

3.2.1 Tlatales

La palabra *tlatel*, proviene del vocablo náhuatl *tlatlalli*, el cual significa terraplén, montículo o tierra elevada. Un *tlatel* es una estructura artificial, que se presenta en forma de montículo, el cual puede estar formado principalmente de suelo y materiales variados, como gravas, rocas, lodos y ramas de árboles.

Se identificaron 35 sitios con posibilidades de presentar anomalías de tipo *tlatel*. Tres de estas anomalías no pertenecen a la época prehispánica, y se describirán más adelante. De estos 32 *tlatales* prehispánicos, solo se pudieron definir diez como subzonas con anomalía, ya que en los demás sitios no se encontraron exploraciones geotécnicas en la base de datos.

El primero y más grande de los *tlatales* estudiados, corresponde al área del centro de la ciudad de México donde se ubicaba la ciudad prehispánica de México-Tenochtitlán. Este *tlatel* fue objeto de estudio en el

periodo 2007 - 2009 por A. Tenorio. En la Figura 4 se muestra un modelo que describe la distribución espacial de los rellenos arqueológicos identificados en el trabajo de Tenorio (Méndez y Juárez, 2009) y un sondeo realizado en el Palacio Nacional marcando el espesor de los rellenos que alcanza hasta 12m.

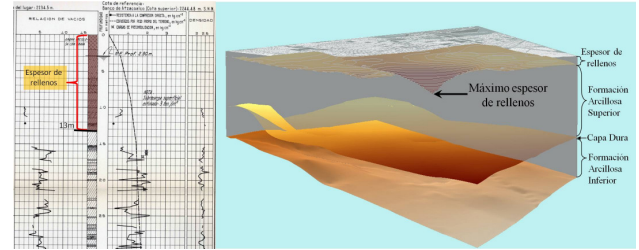


Figura 4. Espesor de rellenos en la zona centro de la ciudad de México

Se identificó que los *tlatales* de Churubusco (*Huitzilopochco*) (Figura 5), Xochimilco, Mexicaltzingo (Figura 6), Tlahuac, Mazantzintamalco, Ahuehuetlan, Zacatlamanco, Acachinanco y Xochimanca, pertenecieron a asentamientos humanos de gran importancia y entre los más antiguos (anteriores a la llegada de los aztecas al valle de México) en la zona lacustre. Estos se caracterizan por presentar espesores de rellenos mayores que el de la costra superficial considerada en el modelo estratigráfico de Marsal y Mazari (1959).

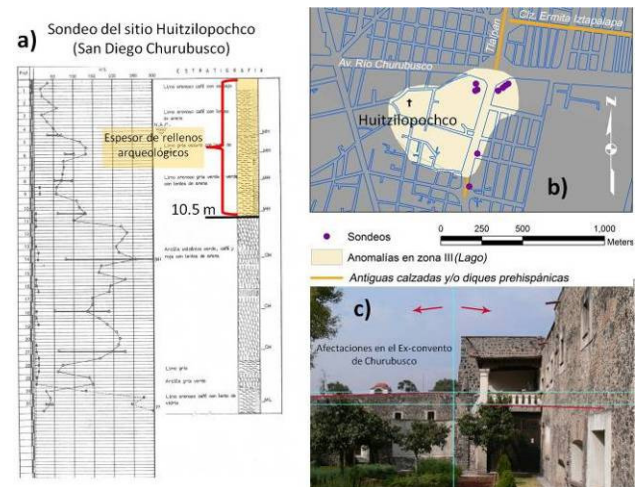


Figura 5. Tlatel de Huitzilopochco. a) Sondeo geotécnico; b) Ubicación; c) Fotografía del sitio



Figura 6. Tlatel de Mexicaltzingo

En otros nueve tlateles, no se cuenta con exploraciones geotécnicas como evidencia sustancial de la existencia de anomalías geotécnicas. Sin embargo, las fotografías tomadas en las visitas de campo y los mapas antiguos se utilizaron para evidenciar las probables anomalías (emersión del terreno, daño en estructuras, grietas, desplome, etc.). En la Tabla 1, se enlistan estos tlateles.

Tabla 1. Sub-zonas con probabilidad de anomalías

No.	Zona	Tlatel	Ubicación
1	Lago	Ticumac	San Simón Ticumac, cerca de la colonia Portales.
2	Lago	Altepetlac	Colonia Peralvillo.
3	Lago	Tepetlatzincó	Sobre eje Central y Cumbres de Maltrata.
4	Lago	Iztacalco	Centro histórico de Iztacalco.
5	Lago	Xocotitla	En los alrededores del Centro Médico la Raza
6	Lago	Coatlayauhcan	En la colonia Magdalena de las Salinas.
7	Lago	Mixiuhca	En la colonia Magdalena Mixiuhca.
8	Transición	Mixquic	Pueblo de Mixquic.
9	Transición	Huacalco	Sobre Av. Cuitlahuac en la Unidad Habitacional Cuitlahuac.

Los restantes trece tlateles prehispánicos, no presentaron suficientes evidencias como para indicar la existencia de anomalías geotécnicas importantes. Sin embargo, se sabe que llegaron a ser pequeños asentamientos humanos, según el INAH. Sólo con nuevos sondeos geotécnicos, se tendrá la certeza de la condición de estos sitios.

Por otra parte, no todos los tlateles presentes en el valle de México fueron construidos por los pueblos prehispánicos. Como es bien sabido, la Ciudad de

México continúa creciendo de manera desordenada en zonas de Chalco y Tlahuac. En esta zona, se ha identificado el surgimiento de un relleno que constituye un verdadero tlatel moderno que se emplea para el desplante de viviendas. Este tlatel se ubica en la colonia Ampliación San Miguel Tlahuac en el límite del Estado de México y el Distrito Federal y se le ha denominado "tlatel Cartolandia". En la Figura 7, se observa la ubicación y construcción del tlatel Cartolandia, que consiste en el vaciado a volteo de materiales de desecho no controlados formando un extenso relleno.



Figura 7. Imágenes del procedimiento constructivo del tlatel *Cartolandia* en la zona de Tlahuac-Chalco, Google Earth 2010

Así también se identificaron otros dos tlateles en el antiguo lago de Texcoco (Figura 8), de los cuales se desconoce su origen, pero que fueron empleados como mojoneras para delimitar el Distrito Federal del Estado de México y actualmente generan grietas en los alrededores.

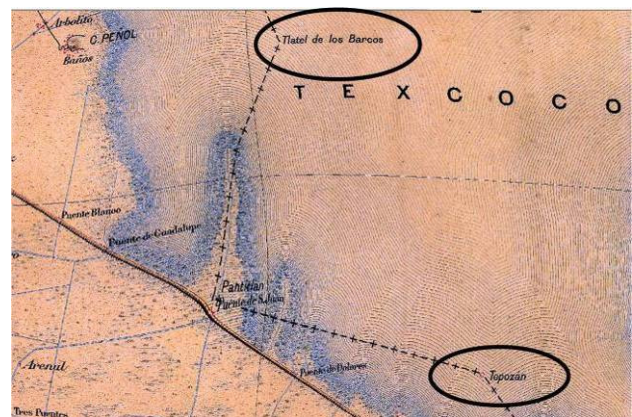


Figura 8. Tlatel de los Barcos y Tepozán en la Carta Corográfica del Distrito Federal, Fernández Leal, 1899

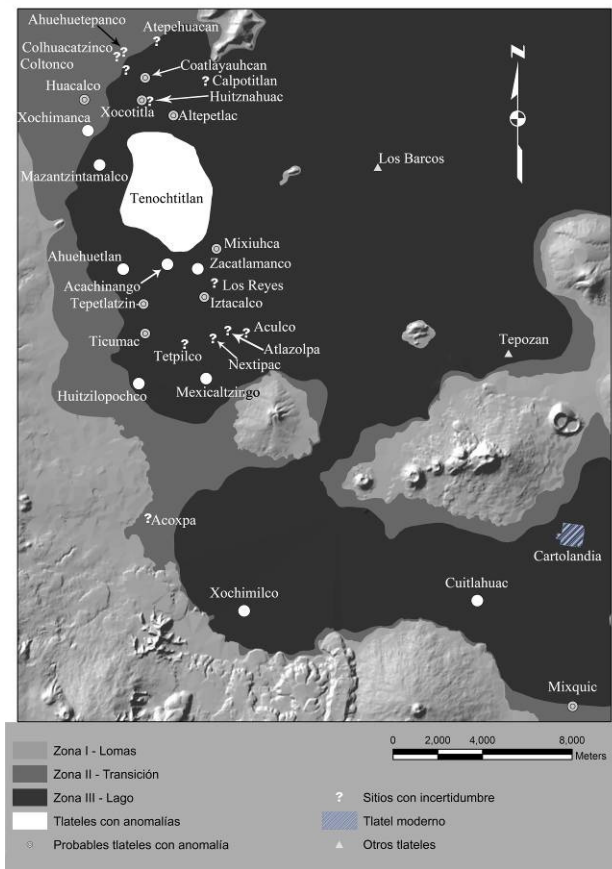


Figura 9. Distribución espacial de tlateles

3.2.2 Calzadas y diques

La función principal de las calzadas-diques de la época prehispánica consistía en la protección y manejo de las aguas de los lagos que rodeaban los distintos islotes y chinampas. Como segunda función, permitían la comunicación entre los pobladores inmersos en el interior de los lagos con las zonas ribereñas (Carballal y Flores, 1989).

Las calzadas-diques prehispánicas eran construidas sobre el lecho de los lagos con materiales diversos, como arenas, gravas, y rocas, traídos de las zonas ribereñas de los lagos. Prácticamente todas las calzadas prehispánicas son actuales avenidas de la ciudad de México. Esto se debe a que los españoles aprovecharon la infraestructura ya existente.

Las calzadas-diques estudiadas son: Calzada Tepeyac, actualmente Calz. de los Misterios (Figura 10); Calzada Tenayuca, actualmente Calzada Vallejo; Calzada Nonoalco, actualmente Ferrocarriles Nacionales (Figura 11); Calzada Ixtapalapa, actualmente Calzada de Tlalpan; Calzada Mexicaltzingo, actual Calzada Ermita-Ixtapalapa; Calzada México-Tacuba; Calzada Cuitlahuac, sección de la actual Av. Tlahuac; Calzada Xola, actual Av. Obrero Mundial; y la albarrada de Nezahualcóyotl.

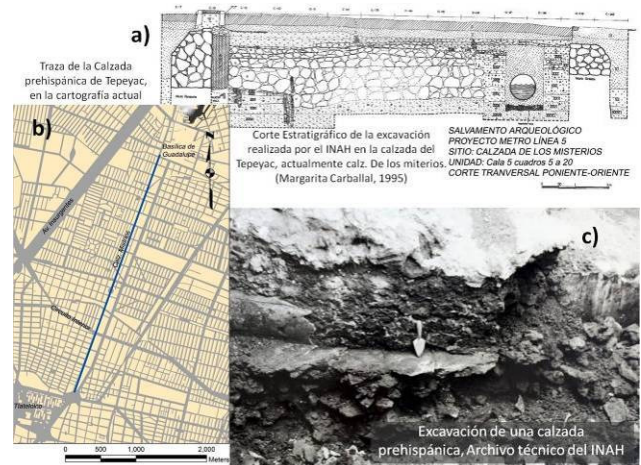


Figura 10. Calzada-dique de Tepeyac. a) Sección estratigráfica del INAH; b) Ubicación; c) Fotografía de las excavaciones.

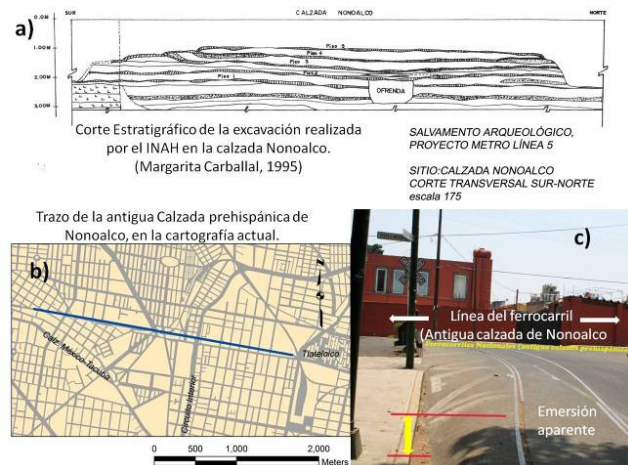


Figura 11. Calzada-dique de Nonoalco. a) Sección estratigráfica del INAH; b) Ubicación; c) Fotografía mostrando cómo luce actualmente

La Calzada México-Tacuba es un caso especial, ya que durante muchos años fue una de las principales avenidas que llegaban a la ciudad de México. A finales de la década de 1960, se llevó a cabo la primera etapa del Metro, y se construyó la línea 2 (solución cajón) que sigue el trazo de la calzada prehispánica.

En algunas calzadas-dique, como Calzada Vallejo y Calzada de Tlalpan, el ancho de la calzada-dique era menor que el de la actual avenida, por lo que es fácil apreciar la emersión debida al hundimiento regional y la presencia de la antigua calzada prehispánica (Figura 12).



Figura 12. Imagen de la Calzada Vallejo mostrando el desnivel provocado por los rellenos de la calzada prehispánica

No fue posible definir el trazo de la antigua albarrada construida por Nezahualcóyotl de manera precisa; sólo se cuenta con trazos aproximados (por ejemplo los propuestos por Tito Rosas, 1869 y L. González Aparicio, 1968) y una sección transversal. Después de la caída del "imperio" Mexica, la albarrada fue abandonada, y durante muchos años sirvió como banco de materiales.

La ubicación de las calzadas-dique y de la antigua albarrada dentro de la zonificación geotécnica se muestra en la Figura 13.

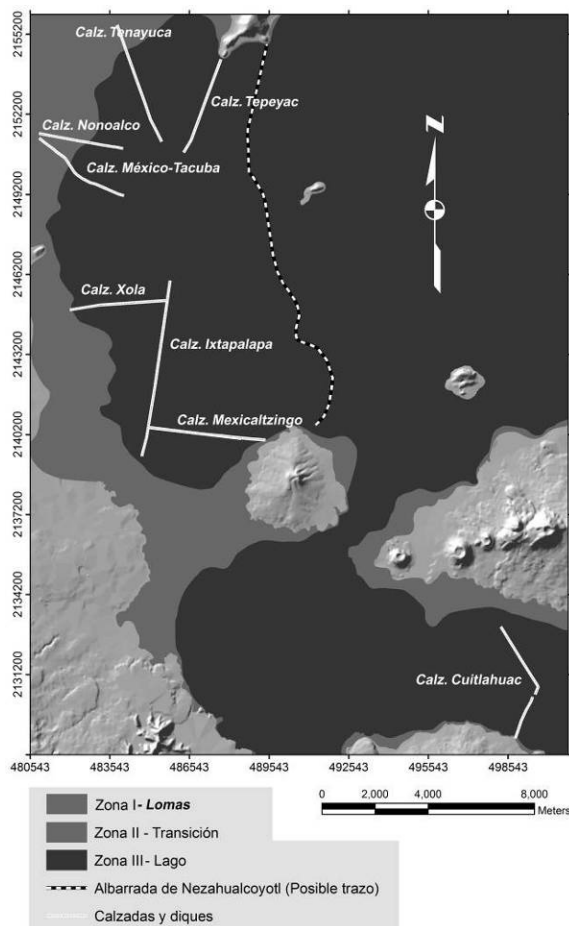


Figura 13. Distribución espacial de las calzadas-dique prehispánicas bajo el contexto de la zonificación

3.2.3 Chinampas

Las chinampas son plataformas de tierra y materiales diversos construidas artificialmente en las zonas lacustres, cuya función consistía en extender las áreas de cultivo, formando depósitos de suelo con gran cantidad de materia orgánica sobre el lecho de los lagos.

Actualmente, las chinampas sólo se encuentran en zonas específicas de las delegaciones Xochimilco y Tlahuac del Distrito Federal pero anteriormente se encontraban distribuidas en grandes áreas del centro y sur de la actual ciudad de México.

Para definir la distribución espacial de las zonas de chinampas, se recurrió ampliamente a documentos antiguos, tales como mapas, cartas topográficas y fotografías aéreas. La Figura 14 muestra la ubicación de las chinampas en el contexto de la zonificación geotécnica.

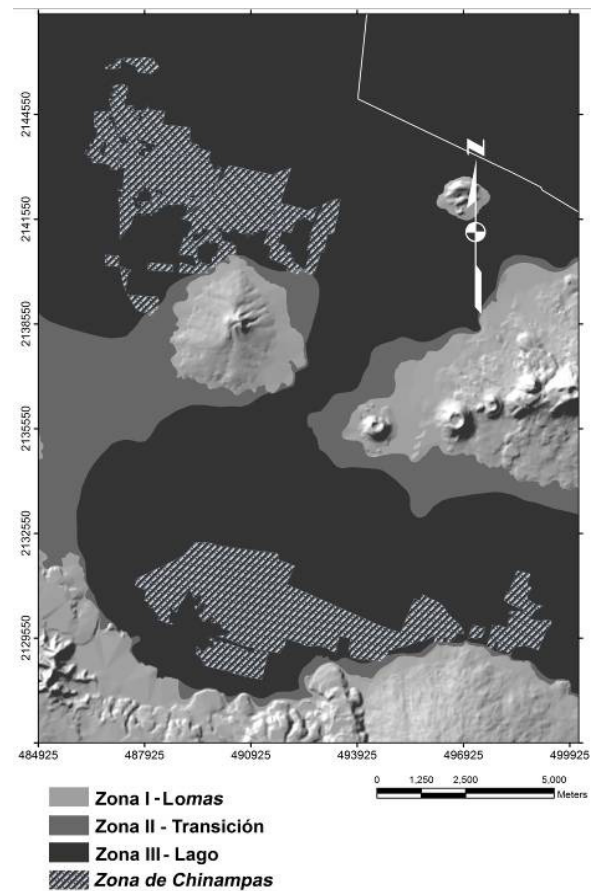


Figura 14. Distribución espacial de las zonas de chinampas

3.2.4 Canales

Con el inicio en el proceso de desecación de los lagos alrededor de la ciudad de México, fue necesaria la construcción de canales en las zonas aluvio-lacustre y lacustre para conducir el agua de los ríos que provienen de las regiones montañosas que circundan a la ciudad hacia la zona del lago de Texcoco. Sin embargo, con la

explosión demográfica en la ciudad a mediados del siglo XX, se inició el entubamiento de ríos y cauces en la zona urbana con el propósito de mejorar las condiciones sanitarias, aprovechando estos espacios para dar alojamiento a grandes vialidades y con ello mejorar la estética urbana de la ciudad.

En la siguiente figura se presenta la distribución espacial de los canales más importantes construidos en diversas épocas, en el contexto de la zonificación.

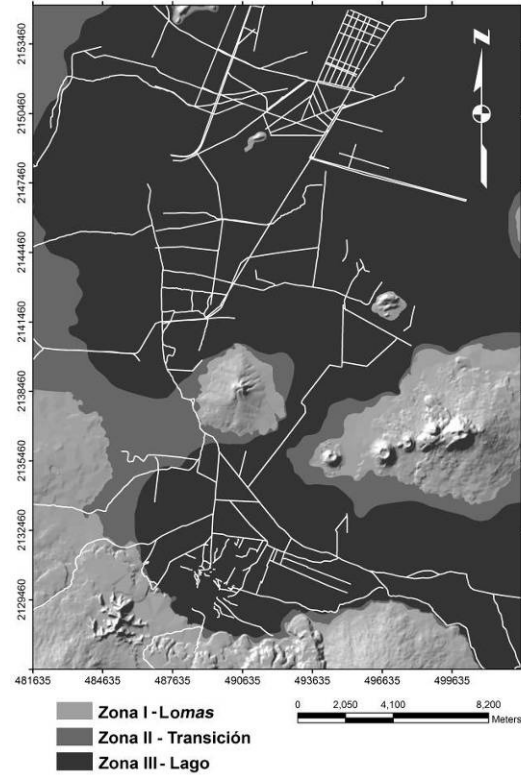


Figura 15. Distribución espacial de canales

3.2.5 Anomalía geomorfológica

Se ha identificado una anomalía geomorfológica perteneciente al cuerpo rocoso de la Sierra de Santa Catarina, la cual se adentra en el ex lago de Xochimilco a semejanza de una escollera tal como se señala en color rojo sobre el Plano de la ciudad de México de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas de 1927 de la Figura 16.

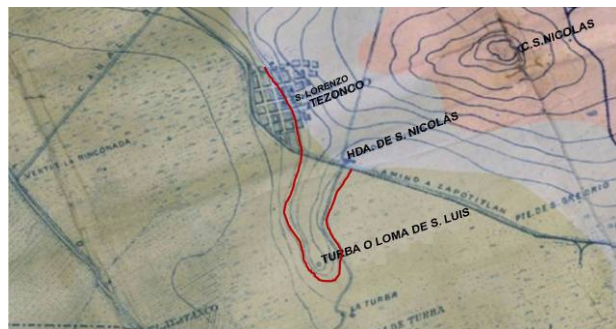


Figura 16. Sección del plano de la ciudad de México, SCOP, 1927.

A lo largo de la cara poniente de la Loma de San Luis, se observan grietas de transición abrupta, originadas por el hundimiento regional (Figura 17), así como los daños ocasionados en la Ex hacienda de San Nicolás, ubicada sobre dicha anomalía.

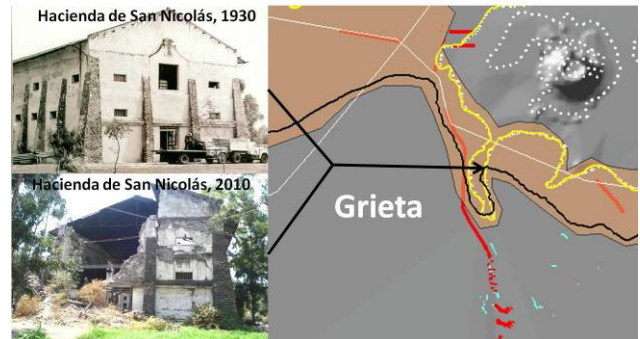


Figura 17. Fotografías de la Ex hacienda de San Nicolás en 1930 y 2010; y grieta originada por la "Loma de San Luis"

3.2.6 Anomalía geológica

Esta anomalía tuvo su origen en un evento volcánico reciente que arrojó una nube piroclástica que interrumpió la sedimentación de las arcillas, solidificándose a través del tiempo en un estrato o capa de espesor importante de toba (Figura 18). El hundimiento regional inducido por la extracción de agua del acuífero, ha provocado la ruptura de esta capa dura de toba, lo que ha generado graves problemas de agrietamiento en la zona

Es importante destacar que sólo se tiene el conocimiento puntual y no espacial de esta anomalía y en la medida de que se tengan nuevos sondeos, se podrá tener una mejor descripción de la misma.



Figura 18. Sondeo geotécnico del sitio y fotografía de una grieta ocasionada por la presencia del estrato de toba

4 CONCLUSIONES

El conocimiento de la existencia, ubicación y geometría de las anomalías geotécnicas que existen en el contexto de la zonificación geotécnica reglamentaria es de gran relevancia y valor para los diseñadores y constructores porque les permite anticipar los posibles problemas que

pueden llegar a presentarse durante la vida útil de las edificaciones en general ubicadas en tales sitios. También proporciona un elemento de juicio para explicar las posibles causas de mal comportamiento de estructuras coloniales, porfirianas y otras.

En la Figura 19, se muestra el mapa índice de todas las anomalías identificadas hasta ahora bajo el contexto de la zonificación.

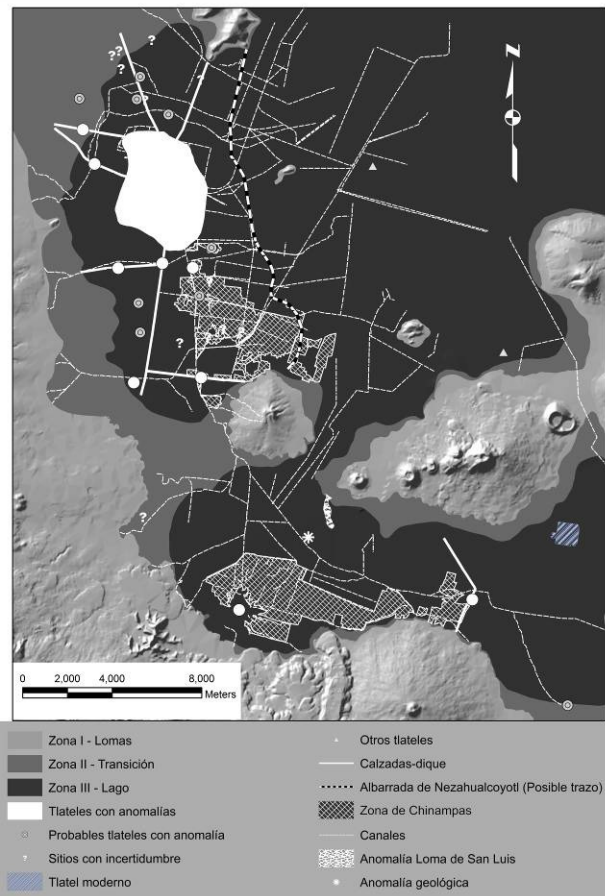


Figura 19. Distribución espacial del total de anomalías

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido por parte del arqueólogo Miguel Medina Jaen de la Dirección de Salvamento arqueológico del INAH, así como las valiosas aportaciones de compañías y consultores geotécnicos que dieron amablemente acceso a sus acervos de exploraciones geotécnicas.

REFERENCIAS

Apenes, O. 1984. *Mapas Antiguos del Valle de México*, Sociedad de ex alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.

Apenes, O. 1943. The tlatales of lake Texcoco, *American Antiquity*, Society for American Archeology, 9: 29-32.

Auvinet, G. et al. 1997. *Geotecnia del valle de México, evolución de los conocimientos y perspectivas, Memorias del simposio 40 años de Investigación y practica en Geotécnia*, Tomo II, ICA-Instituto de Ingeniería UNAM, México D.F.

Auvinet, G., Méndez, E. y Matus, U. 2009. Toponimia y Geotecnia en el valle de México, *Gaceta del Instituto de Ingeniería*, 51: 17-21.

Auvinet, G. et al. 1995. Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos”, *Proceedings, Xth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Guadalajara, Jalisco, México, 1: 312-324.

Carballal, M. 1989. Las calzadas prehispánicas de la isla de México, algunas consideraciones acerca de sus funciones, *Arqueología*, 1: 71-80.

Chávez, E. 2003. *Contribución a la zonificación Geotécnica del área Poniente de la Ciudad de México*, Tesis de Licenciatura, FI-UNAM, México D.F.

Gobierno del Distrito Federal 2004. *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*, Gaceta Oficial, México, D. F.

González, L. 1968. *Plano reconstructivo de la región de Tenochtitlán*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México D.F.

Lombardo, S. 1997. *Atlas Histórico de la Ciudad de México*, Cartón y Papel de México, Conaculta, INAH, Smurfit, México D.F.

Marsal, R.J. y Mazari, M. 1959. El subsuelo de la ciudad de México, *Contribución al 1^{er} Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.

Mazari, M. 1993. *Algo más sobre la isla de los perros, el Colegio Nacional y el agrietamiento de arcillas lacustres*, El Colegio Nacional, México D.F.

Mazari, M., et al. 1989. Deformaciones inducidas por chinampas en depósitos lacustres de la Cuenca de México, *Antropológicas*, 3: 107-121.

Mazari, M., et al. 1994. Influencia de las construcciones aztecas en edificios de la colonia, en *Centro Histórico. Ayer, hoy y mañana*, INAH, México D.F.

Mazari M., Marsal R.J. y Alberro J. 1985. *Los asentamientos del Templo Mayor analizados por la mecánica de suelos*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.

Méndez, E. 2005. *Aplicación de la geoinformática a la zonificación geotécnica de la cuenca de México*, Tesis de maestría, DEPMI, UNAM, México D.F.

Pérez, J.J. 2004. *Contribución a la zonificación Geotécnica del área del ex-lago de Texcoco*, Tesis de Licenciatura, FES-ACATLAN, México D.F.

Sanders W. T., et al. 1979. *The basin of Mexico: Ecological processes in the evolution of a civilization*, Studies in archaeology, New York, NY, USA.

Tenorio A. E. 2009. *Caracterización Geotécnica del subsuelo del Centro Histórico de la ciudad de México*, Tesis de Licenciatura, ESIA. IPN, México D.F.