

Contribución a la caracterización geotécnica de la zona norte de la cuenca de México

Juárez Moisés, Auvinet Gabriel
Instituto de Ingeniería, UNAM, México
Hernández Francisco & Méndez Edgar
Instituto de Ingeniería, UNAM, México



ABSTRACT

In this paper a characterization of the lacustrine subsoil of the north of Mexico basin is presented. The characterization was made from results of geotechnical explorations. Geostatistical techniques are used to analyze the spatial distribution of water content and depth of typical strata in the area of study. As results of this analysis some contour maps for typical layers of subsoil are presented.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una contribución a la caracterización del subsuelo de origen lacustre de la zona norte de la cuenca de México, a partir de los resultados de exploraciones geotécnicas. Se emplea la Geoestadística como herramienta para analizar la distribución espacial del contenido de agua y de las diferentes profundidades de los estratos típicos en la zona de estudio. Como resultado, se presentan cortes virtuales estimados del contenido de agua y mapas de contorno de la profundidad de cada uno de los estratos típicos del subsuelo.

1 INTRODUCTION

Generalmente, la caracterización del subsuelo para fines de ingeniería se realiza mediante la elaboración de perfiles y cortes construidos en forma intuitiva, por lo que contienen un grado considerable de subjetividad. En muchos casos, estos modelos no son totalmente satisfactorios debido a la complejidad de la formación geológica y la variación espacial de las propiedades del subsuelo.

Actualmente se cuenta con herramientas matemáticas relativamente modernas, como la Geoestadística, que ayudan a eliminar hasta cierto grado la subjetividad en las interpolaciones, logrando una mejor aproximación de las condiciones del subsuelo.

Existen algunos trabajos antecedentes sobre la aplicación de la geoestadística a la caracterización del subsuelo del valle de México, los cuales han sido realizados con el propósito de evaluar la eficiencia del método aplicado a la Geotecnia (Juárez y Auvinet, 2000; Juárez, 2001) y a la descripción del subsuelo del Valle de México (Medina, 2001; Juárez y Auvinet, 2002), mostrando que el método puede ser empleado para estimar de manera racional los espesores y profundidades de las formaciones típicas del subsuelo y las propiedades índice o mecánicas del subsuelo a partir de una base de datos de sondeos disponibles. También se han realizado algunos trabajos de caracterización geotécnica para la zona norte del valle de México (Laboratorio de Geoinformática, 2007), pero con algunas limitaciones debido a la escasez de datos.

En el presente trabajo, se analiza la distribución espacial del contenido de agua $w(\%)$ a lo largo del trazo de una obra subterránea de drenaje profundo y la variación de la profundidad de los estratos típicos de la zona lacustre. El contenido de agua es una propiedad índice que permite identificar el tipo de suelo y que resulta

fácilmente correlacionable con propiedades mecánicas, lo que posibilita la interpretación estratigráfica del subsuelo.

2 UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona norte de la cuenca de México, entre las latitudes $19^{\circ}56'18.39''N$ y $19^{\circ}29'12.37''N$ y entre las longitudes $98^{\circ}50'24.44''W$ y $99^{\circ}20'43.85''W$, ocupa un área aproximada de $2,607 \text{ km}^2$. En la figura 1 se ilustra la ubicación del área de estudio.

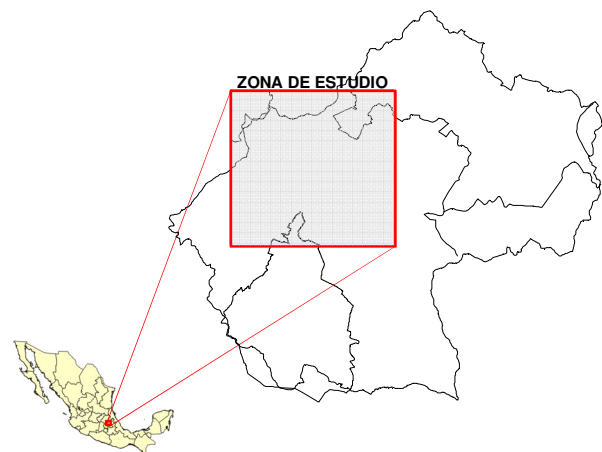


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

3 TOPOGRAFÍA

La topografía superficial en la zona de estudio es, prácticamente plana con una pendiente suave hacia el sur, en dirección hacia el ex lago de Texcoco. La zona está rodeada por varias series montañosas: En la figura 2 se presenta un Modelo de Relieve Sombreado (MRS; Méndez, 2005) que ilustra la configuración topográfica del área de estudio.

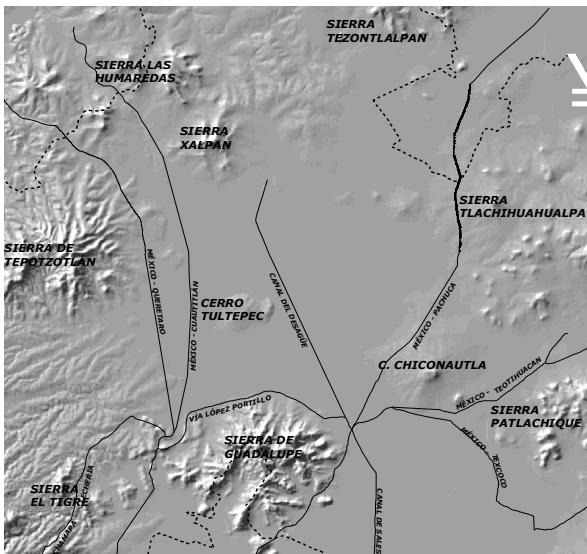
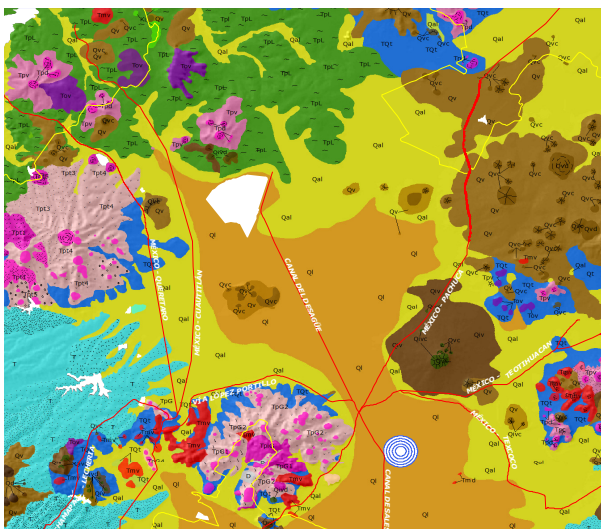


Figura 2. Modelo de relieve sombreado de la topografía (Méndez, 2005)

4 GEOLOGÍA

En la figura 3 se muestra la geología del área de estudio (Mooser, 1996). En el sur de la planicie, superficialmente se encuentran suelos lacustres con restos de materia vegetal; por debajo de estos y en el resto de la zona plana existen suelos correspondientes a una serie clásica aluvial y fluvial, constituidos por materiales granulares arcillosos y limosos, con intercalaciones de pómez, arena negra, vidrio volcánico y lava.



SIMBOLOGÍA	
Ql	Depósitos lacustres del cuaternario
Qal	Depósitos aluviales del cuaternario
T	Vulcanitas del cuaternario (formación Tarango)
TQt	Tobas en Depósitos de flancos del cuaternario
Qv	Vulcanitas del cuaternario superior
Qiv	Vulcanitas del cuaternario inferior
Qivc	Conos vulcaníticos del cuaternario inferior
TpL	Depósitos lacustres del Plioceno medio
Tpv	Vulcanitas del Plioceno
Tpd	Domos vulcaníticas del Plioceno
TpG	Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos de la sierra de Guadalupe
TpT	Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos de la sierra de Tepotzotlan
Tmv	Vulcanitas del Mioceno
Tov	Vulcanitas del Oligoceno
Ki	Formaciones del Cretácico Inferior

Figura 3 Geología de la zona de estudio

La periferia de la planicie se encuentra en contacto con depósitos de ladera formados por suelos tobáceos y pumíticos derivados de lluvias de ceniza, lahares, ignimbritas, fenobasaltos y por lava andesítica y dacítica, Mooser (1996).

5 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA

5.1 Zonificación geotécnica

Actualmente, en el DF se cuenta con un mapa de zonificación geotécnica. Este mapa incluye una reducida extensión del sur del área de estudio considerada en este trabajo, por tanto, es posible extender los mismos criterios de las (NTC-DCC-DF) e incluir en el mismo mapa el área de estudio.

El Laboratorio de Geoinformática propuso en 2007, un mapa de zonificación geotécnica para una porción de los lagos del norte del valle de México (figura 4). (Valencia, 2007).



SIMBOLOGÍA	
[Código]	Subzona Ia Lomerios
[Código]	Subzona Ib Aluvial
[Código]	Subzona IIa Transición Baja
[Código]	Subzona IIb Transición Alta

Figura 4 Propuesta de zonificación Geotécnica (Laboratorio de Geoinformática, 2007; Valencia, 2007)

Dicho mapa fue elaborado considerando las características y distribución de los materiales del subsuelo, aplicando los criterios establecidos en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF; GDF, 2004) y empleando como herramienta la Geostatística para estimar las profundidades de los estratos típicos del subsuelo pero con algunas limitaciones debido a la escasez de datos de las propiedades. En este mapa de zonificación geotécnica propuesto se definen las subzonas:

Zona I, Lomas

Subzona I a, Lomerios. Formada por rocas o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre.

Subzona I b, Aluvial. Integrada por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla altamente resistentes.

Zona II, Transición

Subzona II a, Transición Alta. Está formada por estratos de arcilla lacustre con espesores menores a 2.50m.

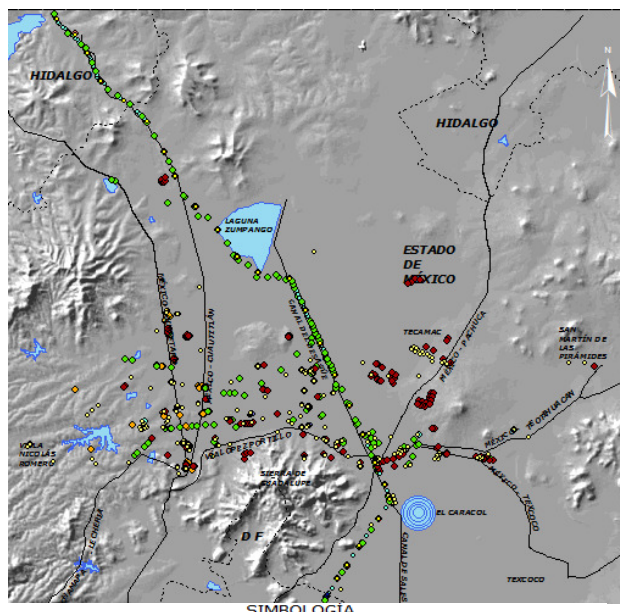
Subzona II b, Transición Baja. Está formada por estratos de arcilla lacustre con espesores mayores a 2.50m.

5.2 Sondeos geotécnicos

Los sondeos geotécnicos empleados para este estudio fueron proporcionados por diferentes dependencias e instituciones gubernamentales, así como por varias empresas privadas que han realizado sondeos para diversas obras dentro del área de estudio. En la figura 5 y en la tabla 1 se indica respectivamente la ubicación y el número de sondeos por tipo empleados en este trabajo.

Tabla 1. Número de sondeos para el análisis geoestadístico

Tipo de sondeo	Número
Mixto (SM)	200
Penetración Estándar (SPT)	258
Continuo (SC)	70
Dilatómetro (DMT)	9
Fuente Bibliográfica	43
Total de sondeos	580



SIMBOLOGÍA

- SM
- PCA
- DILATOMETRO
- AVANCE CONTOLADO
- SPT
- CONTINUO
- FUENTE BIBLIO

Figura 5. Ubicación de los sondeos

5.3 Integración de la información

La información básica de ingeniería anteriormente descrita ha sido incorporada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el propósito de facilitar el estudio e interpretación de la distribución y naturaleza de los materiales del subsuelo y formaciones geológicas de la zona estudiada.

La integración de la información en un Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG) para la zona norte de la cuenca de México consiste en arreglar y agrupar ordenadamente la información en capas de diferentes temas bajo un sistema de referencia y proyección geográfica.

Para incorporar la información básica disponible al SIG-SG fue necesario realizar un pre-procesamiento de la información, es decir, realizar una transformación de formato analógico a formato digital que puede ser de tipo raster (información celdarizada) o vectorial (información numerizada) dentro de un marco de referencia de coordenadas geográficas, proyección y parámetros coherente. Actualmente, el sistema incluye la información que ha sido posible recopilar y una base de datos con las imágenes de los perfiles geotécnicos que pueden ser ágilmente consultados.

Para incorporar la información disponible en un SIG-SG fue necesario recurrir a varios métodos, técnicas y herramientas computacionales. La información procedente del INEGI (Cartografía y Topografía) está definida en formato digital en el sistema UTM, con el Datum horizontal ITRF-92 (INEGI, 1999).

La base de datos de los sondeos geotécnicos se organizó de acuerdo con el tipo de sondeo realizado en la exploración, a los cuales se les asignó un código (color) para facilitar su identificación y consulta en el sistema.

La consulta del sistema es de forma interactiva con el usuario, mediante el despliegue y visualización de las capas temáticas de información en forma simultánea, lo que se conoce como composiciones o arreglos de información espacial. La visibilidad de cada capa puede ser activada o desactivada de acuerdo con la información de interés que se desee consultar.

En la figura 6 se presenta una vista del sistema implantado para la zona estudiada, misma que ilustra el funcionamiento y consulta del SIG-SG.

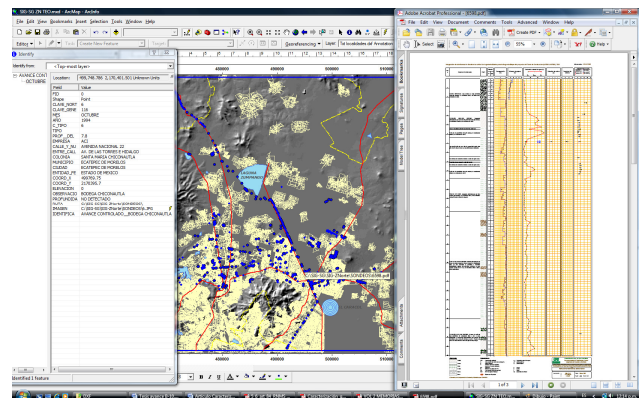


Figura 6. Vista del SIG-SG con despliegue de ubicación y consulta de sondeos

6 CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO

Con base en los sondeos geotécnicos disponibles se realizó un estudio de la distribución espacial de las propiedades índice, mecánicas y geométricas del subsuelo. Los datos disponibles muestran que es necesario actualizar el mapa de la figura 4. Se cuenta ahora con información más detallada que permite definir dentro de la formación arcillosa del sur de la planicie, unos substratos consistentes en una costra superficial (CS), una formación arcillosa superior (FAS), una capa dura (CD) y una formación arcillosa inferior (FAI) subyacida por depósitos profundos (DP), en la figura 7 se presenta un perfil típico del área lacustre donde se distinguen esos substratos.

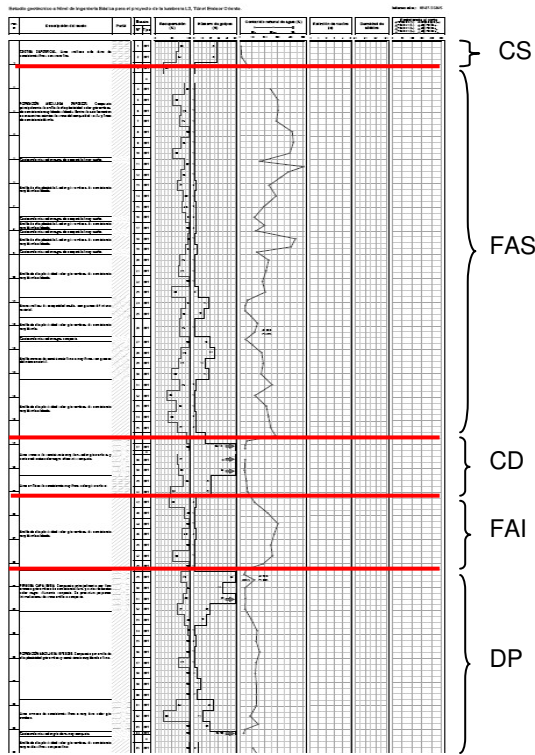


Figura 7. Perfil de sondeo continuo (CFE, 2008)

En lo que sigue, se analiza la distribución espacial de la profundidad y espesor de los estratos típicos del subsuelo y del contenido de agua, empleando como herramienta la geoestadística. Los conceptos teóricos principales del método geoestadístico han sido presentados en otros trabajos en forma detallada (Auvinet, 2002, Juárez 2001, Medina, 2001). Por tanto, en este trabajo únicamente se presentan aplicaciones empleando la metodología que a continuación se indica.

6.1 Metodología del análisis geoestadístico

La distribución espacial de las propiedades del subsuelo se analiza por medio de la estimación de perfiles, cortes, mapas y modelos 3D siguiendo la siguiente metodología (Juárez y Auvinet, 2002):

1. Análisis exploratorio, empleando los sondeos, se determinan los principales parámetros estadísticos. Se evalúa la tendencia y se obtienen campos residuales.

2. Análisis estructural, se calculan los correlogramas direccionales experimentales considerando campo original o residual. Se determinan las distancias de correlación en ambas direcciones. Por último, los correlogramas se ajustan a un modelo teórico, en este trabajo, por sencillez se adopta una función de tipo exponencial.

3. Estimación y simulación, con base en los datos y el modelo teórico de correlación espacial se realizan estimaciones y simulaciones puntuales que definen perfiles estimados (virtuales) de las propiedades de interés.

4. Mapeo, para facilitar la interpretación de los resultados numéricos obtenidos en la estimación y simulación se recurre al uso de técnicas de graficación

para construir mapas o modelos de diferente tipo: contornos, en escala de colores, superficies o modelos 3D..

6.2 Análisis geoestadístico de la distribución espacial de profundidad y espesor de estratos típicos

El análisis de la distribución espacial de las diferentes profundidades de los estratos típicos en la zona de estudio, se realizó puntualmente considerando la misma malla regular espaciada a cada 250 m en direcciones X e Y.

6.2.1 Análisis de la distribución espacial de la profundidad superior de la Formación Arcillosa Superior

El análisis de la distribución espacial de la profundidad superior de la *Formación Arcillosa Superior* (FAS), que corresponde también al espesor de la costra superficial, se realizó empleando la misma metodología y con la información de los sondeos indicados en la figura 5.

Eliminando la tendencia y empleando el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en cuatro direcciones preferenciales (0° , 45° , 90° y 135°), determinándose distancias de correlación de $Az\ 0^\circ=750m$, $Az\ 45^\circ=1000m$, $Az\ 90^\circ=1600m$ y $Az\ 135^\circ=1500m$. Empleando conservadoramente las distancias de correlación en las direcciones 90° y 135° se obtienen los modelos de correlación espacial (figura 8).

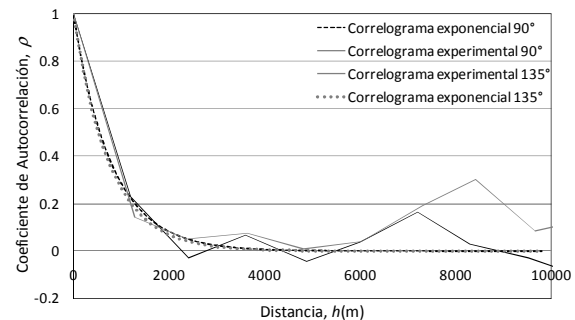


Figura 8. Modelos de correlación espacial

La estimación de esta formación se realiza puntualmente en una malla de puntos espaciados a cada 250 m en ambas direcciones empleando los modelos de correlación previamente definidos, las distancias de correlación espacial (δ_{hor} y δ_{ver}) y aplicando la técnica de Kriging (Krige, 1962; Matheron, 1965; Auvinet, 2002).

Empleando técnicas de graficación se construye un mapa de contornos de la profundidad estimada de la FAS (figura 9).

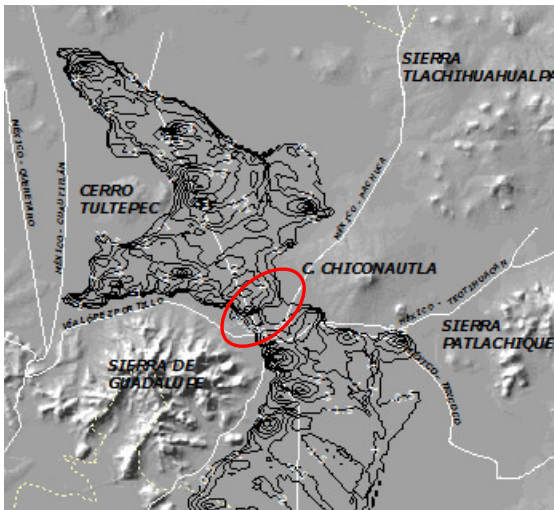


Figura 9. Profundidad del límite superior de la FAS

Como se observa, entre la sierra de Guadalupe y el cerro de Chiconautla aparece una frontera que divide los ex lagos de Xatocan y Texcoco. Al norte de esta frontera, la FAS inicia a profundidades de entre 0.5 y 3.5 m, y al sur inicia a profundidades de entre 0.5 y 2.0 m.

6.2.2 Análisis de la distribución espacial de la profundidad superior de la primera capa dura

Empleando la misma metodología y la información de la figura 5 se realiza el análisis de la distribución espacial de la profundidad del límite inferior de FAS, que corresponde también a la profundidad en la que se encuentra la primera Capa Dura (CD).

Eliminando la tendencia y empleando el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en cuatro direcciones preferenciales, se determinaron distancias de correlación de $Az 0^\circ = 2500$ m, $Az 45^\circ = 4000$ m, $Az 90^\circ = 1500$ m y $Az 135^\circ = 2000$ m.

Empleando conservadoramente las distancias de correlación en las direcciones 0° y 45° se obtienen los modelos de correlación espacial (figura 10).

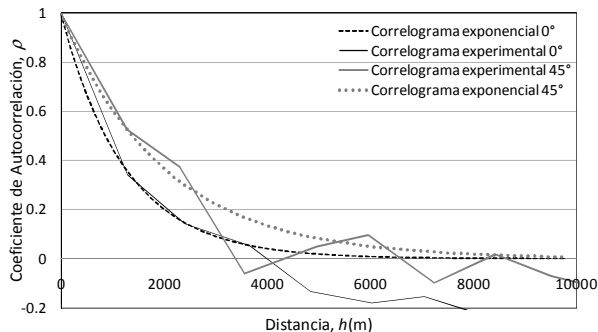


Figura 10. Modelos de correlación espacial

La profundidad se estima en una malla de puntos espaciados a cada 250 m en ambas direcciones (X e Y) y se construye un mapa de contornos de la profundidad superior estimada de la CD (figura 11).

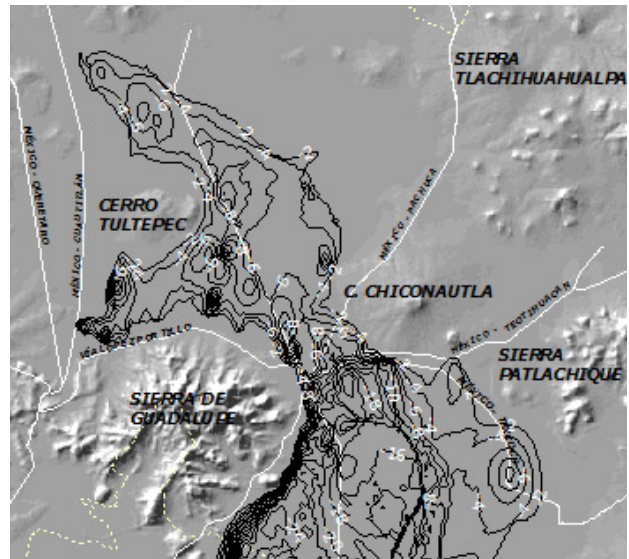


Figura 11. Profundidad de la frontera superior de la CD

En la figura 11 se aprecia una diferencia entre los espesores de arcilla de los ex lagos de Xatocan y Texcoco; al sur del área estudiada la CD se encuentra a mayor profundidad.

6.2.3 Análisis de la distribución de la profundidad de la frontera superior de la Formación Arcillosa Inferior

El análisis de la distribución espacial de la profundidad de la frontera superior de la Formación Arcillosa Inferior (FAI) se realizó a partir de los datos de los sondeos indicados en la figura 5.

Eliminando la tendencia y empleando el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en las mismas direcciones preferenciales. Los modelos de correlación espacial (figura 12) se determinan empleando en forma conservadora las distancias de correlación en las direcciones $Az 0^\circ = 2000$ m y $Az 45^\circ = 2500$ m.

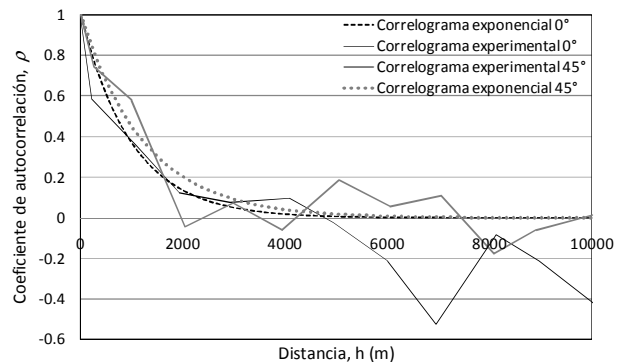


Figura 12. Modelos de correlación espacial.

La estimación de la profundidad superior de la FAI se realizó en puntos separados a cada 250 m en ambas direcciones (X e Y), con los resultados se construyó un mapa de contornos de profundidad superior de la FAI (figura 13).

Comparando las figuras 11 y 12, se tiene que el espesor de la capa dura tiene un valor promedio de 3.13 m, con valores máximos en algunos puntos de hasta 8.0 m.

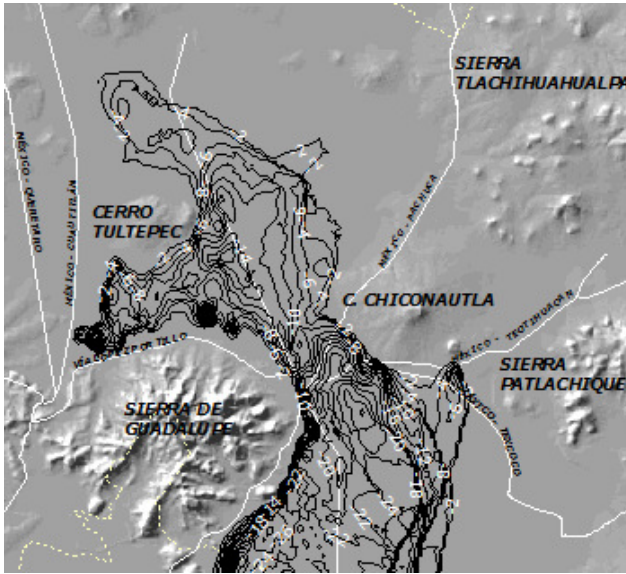


Figura 13. Profundidad de la frontera superior de la FAI

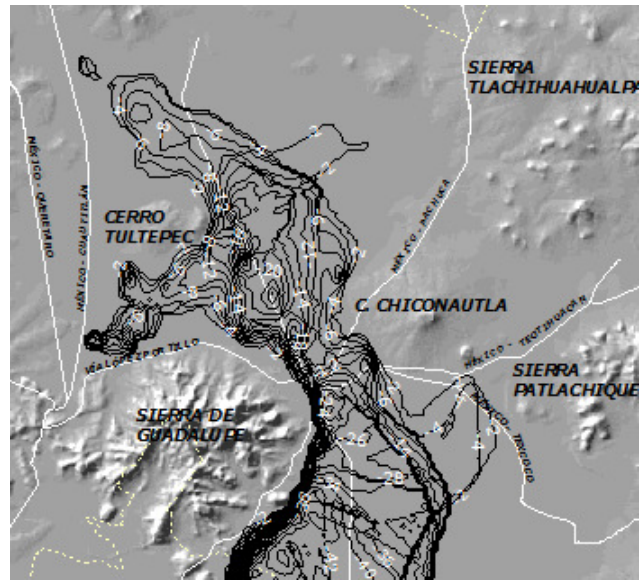


Figura 15. Profundidad de la frontera superior de los DP

6.2.4 Análisis de la distribución de la profundidad de la frontera superior de los Depósitos Profundos

Eliminando la tendencia y empleando el campo residual se calculan los correlogramas experimentales las mismas direcciones preferenciales. Los modelos de correlación espacial se definen empleando, en forma conservadora, las distancias de correlación en las direcciones $Az 0^\circ = 5000 \text{ m}$ y $Az 45^\circ = 4500 \text{ m}$ (figura 14).

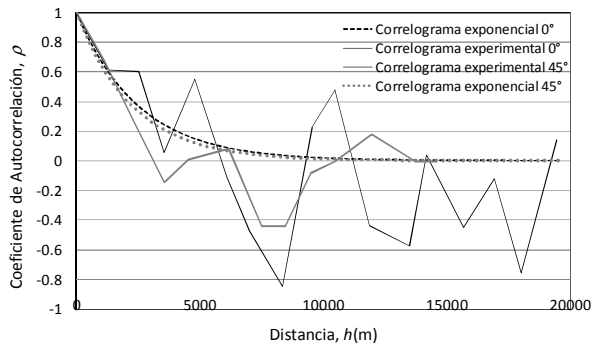


Figura 14. Modelos de correlación espacial

La estimación se realizó puntualmente en una malla de puntos separados a cada 250 m. Con los resultados se construyó un mapa de contornos. En la figura 15 se observa que el espesor de suelo lacustre es de hasta 26 m en la zona del ex-lago de Xaltocan y al sur de 44 m aproximadamente.

6.3 Análisis geoestadístico de la distribución espacial del contenido de agua

El análisis de la distribución espacial del contenido de agua se realizó para el trazo de una obra de drenaje profundo, empleando la misma metodología anterior.

El análisis exploratorio de los datos, se realizó con 181 sondeos (figura 16), en la tabla 2 se indica la ubicación y el número de sondeos por tipo empleados.

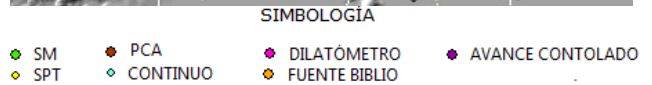
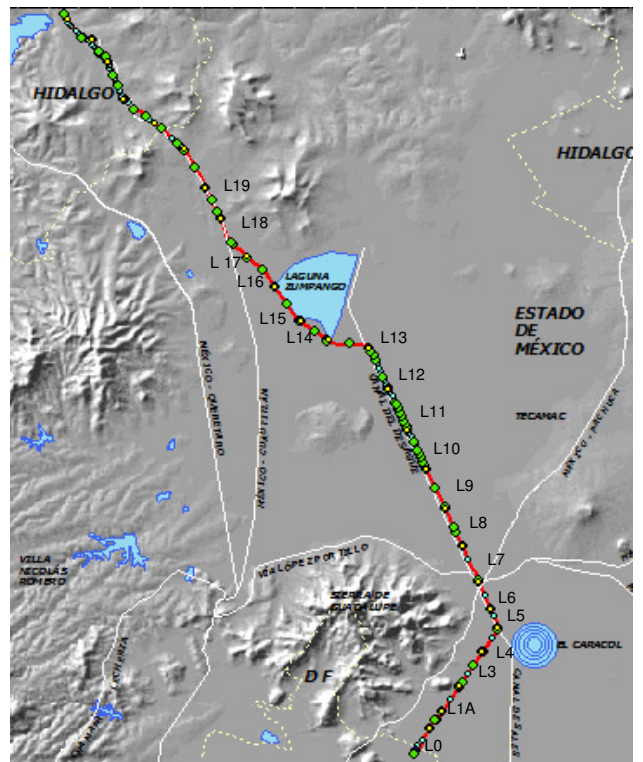
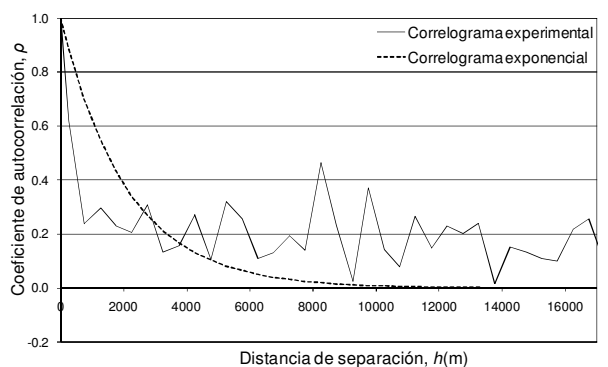


Figura 16. Ubicación del trazo y sondeos

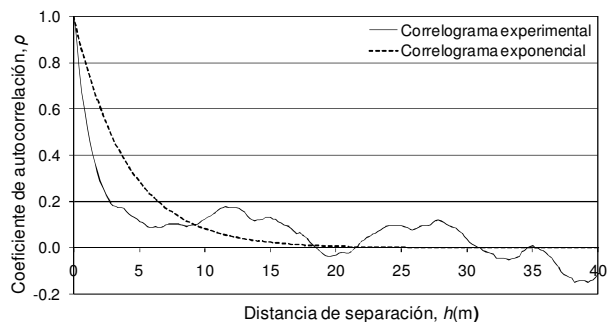
Tabla 2. Sondeos empleados en el análisis de contenido de agua

Tipo de sondeo	Número
Mixto (SM)	77
Penetración Estándar (SPT)	25
Continuo (SC)	70
Dilatómetro (DMT)	9
Total de sondeos	181

Los correlogramas experimentales para el contenido de agua se calculan en las direcciones vertical y horizontal, determinándose distancias de correlación de 9.5 m en dirección vertical y de 3000 m en dirección horizontal. Las funciones de autocorrelación vertical y horizontal se estimaron considerando un incremento de desplazamiento de 20 cm y horizontalmente un incremento de desplazamiento promedio de 500 m. Los correlogramas se muestran en la figura 17.



a) Correlograma horizontal



b) Correlograma vertical

Figura 17. Modelo de correlación espacial del contenido de agua

6.3.1 Estimación

El perfil de contenido de agua se estima a lo largo del eje definido en la figura 20 con distancia de separación horizontal de 500 m y en el sentido vertical a cada 0.20 m.

6.3.2 Mapeo

En la figura 18 se muestra el perfil longitudinal estimado de contenido de agua y su desviación estándar y en la figura 19 una vista tridimensional, donde se aprecia que en el inicio del perfil la cantidad de agua tiene valores de hasta 340% asociados con materiales blandos como las arcillas de la zona de lago y van disminuyendo a lo largo del eje indicando que el trazo pasa a un ambiente no lacustre asociado con la zona de lomas.

7 CONCLUSIONES

La información geológica, topográfica, la zonificación geotécnica de la zona norte de la cuenca de México y los sondeos geotécnicos disponibles son la base fundamental para la interpretación de las condiciones geotécnicas del subsuelo.

El empleo de la geoestadística, como herramienta para elaborar cortes estimados (virtuales) y mapas de contorno de las propiedades del subsuelo, permite evaluar la variación espacial de los espesores de los estratos típicos del subsuelo y por tanto proporciona mayor certidumbre al momento de diseñar obras de infraestructura, así como advertir la existencia de las diversas anomalías geotécnicas en la zona norte de la cuenca de México.

La elaboración de mapas de contornos de los distintos estratos típicos del subsuelo permite definir la extensión de los ex-lagos de Zumpango, Xaltocan y la parte Norte del lago de Texcoco, donde actualmente se encuentran las localidades de Ecatepec, Coacalco, Tultitlán, Tonatitla, entre otras.

Estimar perfiles y cortes de las propiedades de interés, permite tener una idea de la distribución espacial de dichas propiedades y definir la extensión y potencia de las formaciones típicas del subsuelo.

Actualmente se encuentra en proceso la elaboración de un mapa de zonificación geotécnica actualizado con base en los resultados que se presentan en este documento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el valioso apoyo brindado por la Comisión Nacional del Agua, la Dirección General de Apoyo al Personal Académico, UNAM, así como a las distintas empresas privadas que aportaron información geotécnica para la realización de este trabajo.

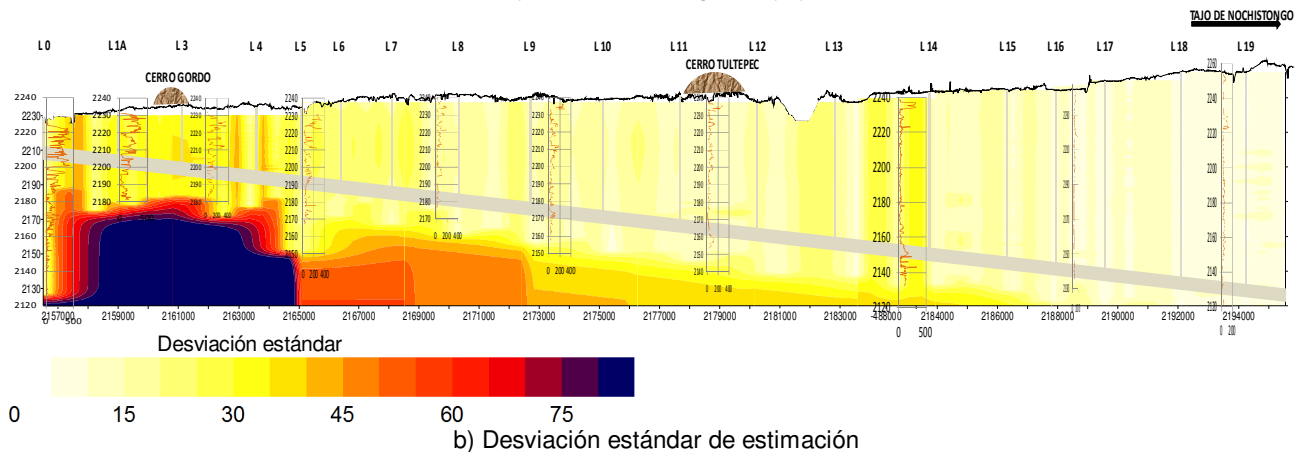
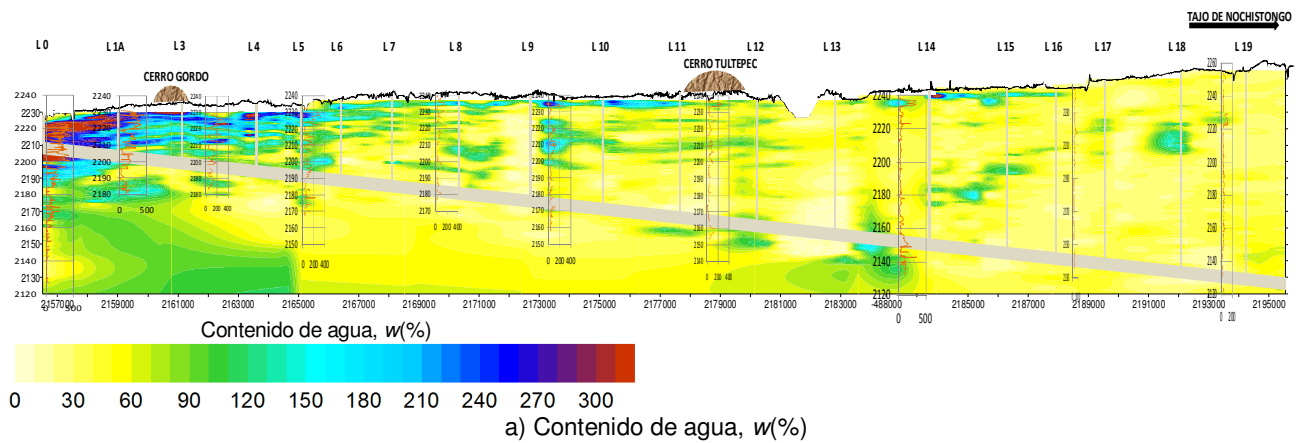


Figura 18. Modelo de estimación del contenido de agua

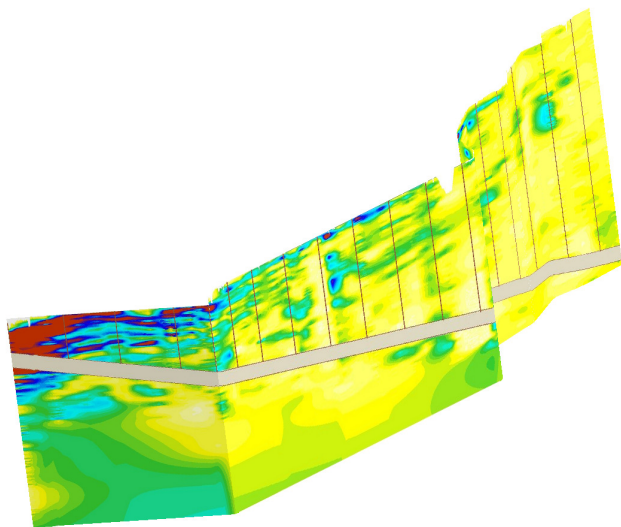


Figura 19. Vista tridimensional del perfil estimado de contenido de agua

REFERENCIAS

Auvinet, G., et al. 1996. Geotecnia del valle de México, Evolución de los conocimientos y perspectivas, *Memorias del simposio 40 Años de Investigación y practica en geotecnia*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

- Auvinet, G. 2002. Incertidumbre en Geotecnia, *Decimo sexta conferencia Nabor Carrillo*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Querétaro, México.
- Comisión Federal de Electricidad. 2008. *Estudio de ingeniería básica TEO, Geotecnia*, Informe técnico de la CFE, México.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF). 2004. *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de Octubre del 2004, México.
- Juárez, M., et al. 2010. Caracterización geotécnica del subsuelo a lo largo del Túnel Emisor Oriente, *Simpósio sobre túneles y lumbreras en suelos y rocas*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica y Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, México.
- Krige D. G. 1962. *Statistical application in mine evaluation*, J. Institute Mine Survey, South Africa.
- Marsal R. & Mazari M. 1959. El subsuelo de la Ciudad de México, Facultad de Ingeniería, Tomos I y II, UNAM, México, D.F.
- Matheron G. 1965. *Les variables généralisées et leur estimation*, Masson et Cie, France.
- Mooser, F., Montiel, A. and Zuñiga. A. 1996. *Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla*, Comisión Federal de Electricidad, Primera Edición, México.
- Valencia, G. J. 2007. *Contribución a la Zonificación Geotécnica de la Zona Norte del Valle de México*, Tesis de Maestría, ESIA Zacatenco, IPN, México.