

29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica

CONTRIBUCIÓN A LA ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA SUR DE LA CUENCA DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Incluye un disco Compacto.

PRESENTA:

Luis Isaac ^{Nemer} Flores Tapia

Director: Dr. Gabriel Auvinet G.



México, D.F.

278507

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

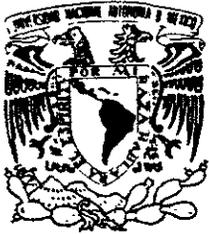


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/145/98

ESTAMPADO

Señor
LUIS ISAAC NEMER FLORES TAPIA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. **GABRIEL AUVINET GUICHARD**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

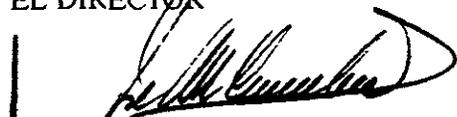
**"CONTRIBUCION A LA ZONIFICACION GEOTECNICA DE LA ZONA SUR
DE LA CUENCA DE MEXICO"**

- I. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO
- II. PROBLEMAS GEOTECNICOS
- III. EVALUACION DE LA INFORMACION GEOTECNICA DISPONIBLE
- IV. CIMENTACIONES MAS COMUNES EN EL AREA DE ESTUDIO

Ruego a usted *cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.*

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 1 de octubre de 1998
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS
JMCS/GMP/mstg.

Agradecimientos

Este tema de tesis fue posible desarrollarlo, gracias a que se contó con el apoyo, en cuanto a información se refiere, de las siguientes empresas, sociedades e instituciones:

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos

TGC Geotecnia S. A. de C.V.

Departamento del Distrito Federal

ISTME

ACI Asesores en Cimentaciones S.A. de C.V.

Instituto de Ingeniería U.N.A.M.

ICA

Ingenieros Especialistas en Cimentaciones

PEMEX

Molina y Asociados S.C.

ICCE, S.A.

Laboratorios LIAC, S.A.

SOILTEC, S.A.

Proyectos Especializados de Ingeniería, S.C.

GHI

Se da especial agradecimiento al Instituto de Ingeniería y al Servicio Geológico Metropolitano por su apoyo incondicional.

CONTRIBUCIÓN A LA ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA SUR DE LA CUENCA DE MÉXICO.

INDICE

Introducción

Objetivo	3
Metas	3
Antecedentes	3

I Descripción del área de estudio

I.1 Localización	17
I.2 Hidrografía	18
I.3 Desarrollo urbano	21
I.4 Topografía	24
I.5 Geología general	25
I.6 Antecedentes geotécnicos	33

II Problemas geotécnicos

II.1 Discontinuidades	44
II.2 Cavernas	49
II.3 Bloques inestables	53
II.4 Minas	54
II.5 Hundimiento regional	56
II.6 Grietas	58

III Evaluación de la información geotécnica disponible.

III.1 Metodología	64
III.2 Información recopilada	66
III.2.1 Sondeos geotécnicos	66
III.2.2 Fotografías	68
III.2.3 Mapas digitales	69
III.3 Cortes estratigráficos	71
III.4 Propuesta de zonificación geotécnica	107

IV Cimentaciones más comunes en el área de estudio

IV.1 Cimentaciones superficiales	110
IV.1.1 Zapatas aisladas	111
IV.1.2 Zapatas corridas	111
IV.1.3 Losas de cimentación	113
IV.1.4 Aplicabilidad en la zona estudiada	114
IV.2 Cimentaciones profundas	117
IV.2.1 Cimentaciones compensadas	117

IV.2.2 Pilotes	118
IV.2.3 Aplicabilidad en la zona estudiada	122
Conclusiones	124
Futuras líneas de trabajo	126
Referencias	
Anexos	
A) Base de datos	
B) Planos	
b.1) Localización del área de estudio	
b.2) Hidrografía	
b.3) Topografía	
b.4) Ubicación de sondeos	
b.5) Localización de fotografías	
b.6) Zonificación geotécnica 1995	
b.7) Geología	
b.8) Localización de cortes estratigráficos	
b.9) Propuesta de zonificación geotécnica	

Introducción

La Cuenca de México es una depresión cerrada, que en el año de 1789, fue modificada artificialmente (se abrió el tajo de Nochistongo) para controlar las inundaciones en la ciudad. Hacia el Norte, está limitada por las sierras de Tezontlalpan y Pachuca; al Sur, por la Sierra de Chichinautzin-Ajusco; al Este, por las sierras: Nevada, Río Frio y Calpulalpan; y al Oeste por la Sierra de las Cruces y de Tepozotlán. La cuenca tiene una superficie aproximada de 9600km². El Distrito Federal ocupa aproximadamente una superficie de 1500km² en la región Suroeste de la cuenca, y en ella se levanta la Ciudad de México (fig. 1).

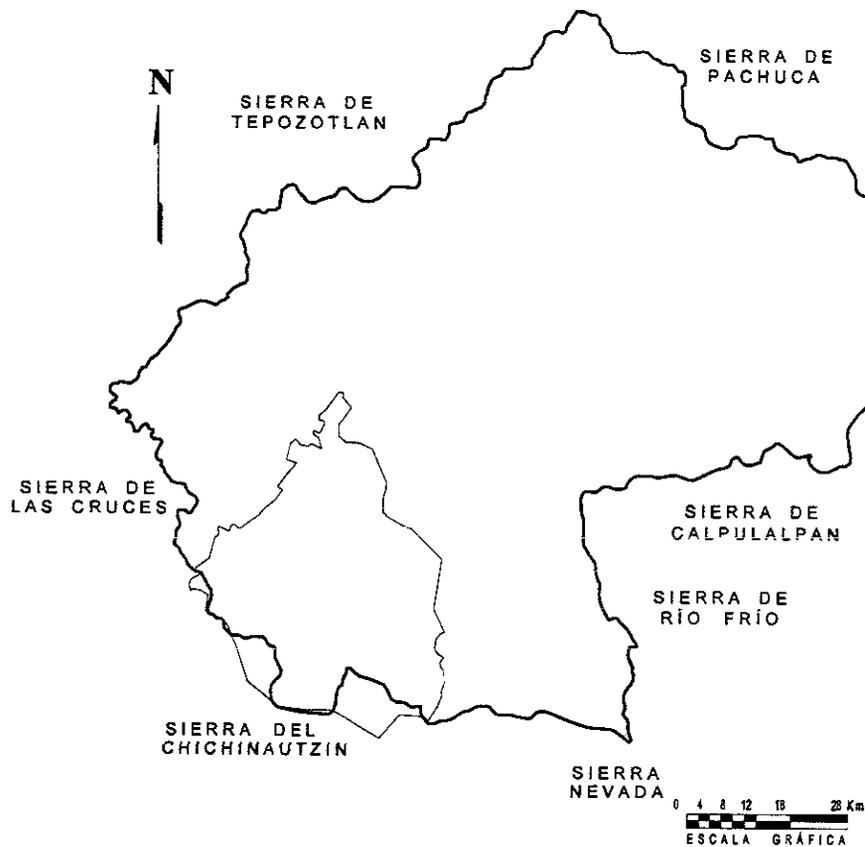


Fig. 1 Cuenca de México y Distrito Federal

Debido al desarrollo geológico de la cuenca, el subsuelo de la Cuenca de México presenta características excepcionales que han motivado numerosos estudios. Los trabajos de recopilación y análisis de la información geotécnica que se han efectuado en el pasado han tenido como propósito conocer y actualizar el estado del conocimiento sobre el subsuelo en la Ciudad de México. Lo anterior, constituye una de las tareas de gran tradición y costumbre que realiza el hombre desde que este empezó a construir en esta difícil zona.

Se tiene que hacia el Sur de la Ciudad de México existe un cambio gradual de suelo blando a un suelo duro hasta llegar a roca, estas condiciones se han nombrado bajo una zonificación geotécnica como **zona de lago**, **zona de transición** y **zona de lomas**. El conocimiento actual que se tiene es el producto de un largo proceso de aprendizaje. Sin embargo, ante el desarrollo de la ciudad se plantean nuevos retos y con ello la necesidad de ampliar y afinar los conocimientos sobre el subsuelo.

En los últimos años, el crecimiento del Sur de la ciudad ha sido importante, sobre todo en las áreas conocidas como los Pedregales. Dado que esta zona se encuentra formada en su mayor parte por lavas del Xitle, era de esperarse que no se tuvieran inconvenientes geotécnicos para las cimentaciones, pero por el contrario los hay y son difíciles de localizar debido a la dureza de la roca; estos problemas se pueden presentar en forma de cavernas, fracturas y vesículas.

En la planicie lacustre, los problemas más serios derivan de la alta compresibilidad y baja resistencia al corte de las arcillas.

La extracción de agua potable por bombeo en los acuíferos del subsuelo ha producido zonas o áreas de abatimiento piezométrico de consideración, provocando incrementos de esfuerzos efectivos en los depósitos de suelo que se traduce en consolidación de los mantos de arcilla, lo cual da origen al hundimiento regional y agrietamientos en las formaciones lacustres y aluviales.

Como cada tipo de suelo tiene sus propias características y, por tanto, sus propios problemas, es conveniente hacer una distinción entre ellos, la cual ya se ha mencionado al introducir las **zonas de lago**, **de transición** y **de lomas**. En el presente trabajo se propone una actualización de la zona Sur del mapa de zonificación geotécnica vigente, basada en la información que se ha generado por más de cuarenta décadas, tiempo durante el cual ha sido objeto de estudio la zonificación geotécnica del subsuelo de la Ciudad de México. La información recopilada es procesada y analizada con la ayuda de las nuevas herramientas de trabajo que ofrece la computación.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo es el estudio de la formación y características de la zona Sur de la Ciudad de México, con la finalidad de elaborar una propuesta para actualizar el mapa de zonificación geotécnica, del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Propuesta basada en el estudio de la geología, de la información geotécnica recopilada y de una serie de mapas con información de utilidad. Así como describir los tipos de cimentaciones más comunes, y discutir su aplicabilidad en el área de estudio.

Metas

Para cumplir con el objetivo se llevarán a cabo las siguientes actividades:

1. Recopilación y selección de información bibliográfica de simposios y reuniones de Mecánica de Suelos.
2. Campañas de recopilación de sondeos en distintas empresas privadas y públicas.
3. Recorridos de campo.
4. Selección y empleo de mapas con información de interés.
5. Proceso e interpretación de la información recabada.
6. Elaboración de la zonificación geotécnica en cartografía urbana.
7. Comparación con trabajos previos de zonificación geotécnica.
8. Estudio del comportamiento de las cimentaciones en el área de interés.
9. Conclusiones.

Antecedentes

Sobre la base de información recopilada hasta el año de 1952, se zonificó a la ciudad, atendiendo a la composición del subsuelo, es decir, se elaboró la primera zonificación geotécnica (Marsal, J., 1952) en el área urbana de aquella época (fig. 2).

Se zonificó en cuatro regiones (ref.1):

Zona A, formada por terrenos limo-arenosos compactos, conglomerados o derrames basálticos, típicos de Las Lomas, parte de Tacubaya, Mixcoac y El Pedregal.

Zona B, de transición entre la anterior y el Lago de Texcoco, en la que pueden encontrarse mantos de arcillas en la parte superficial, relativamente de poco espesor (5 a 10m), de composición y características muy variables; debajo se encuentran depósitos de aluvión gruesos y compactos.

Zonas C y D son semejantes; las diferencias entre ambas se deben principalmente, al efecto de cargas superficiales y perturbaciones ocasionadas por el bombeo en los acuíferos profundos. En esta parte del lago de Texcoco, la corteza arcillosa, extraordinariamente compresible, tiene un espesor medio de 40m.

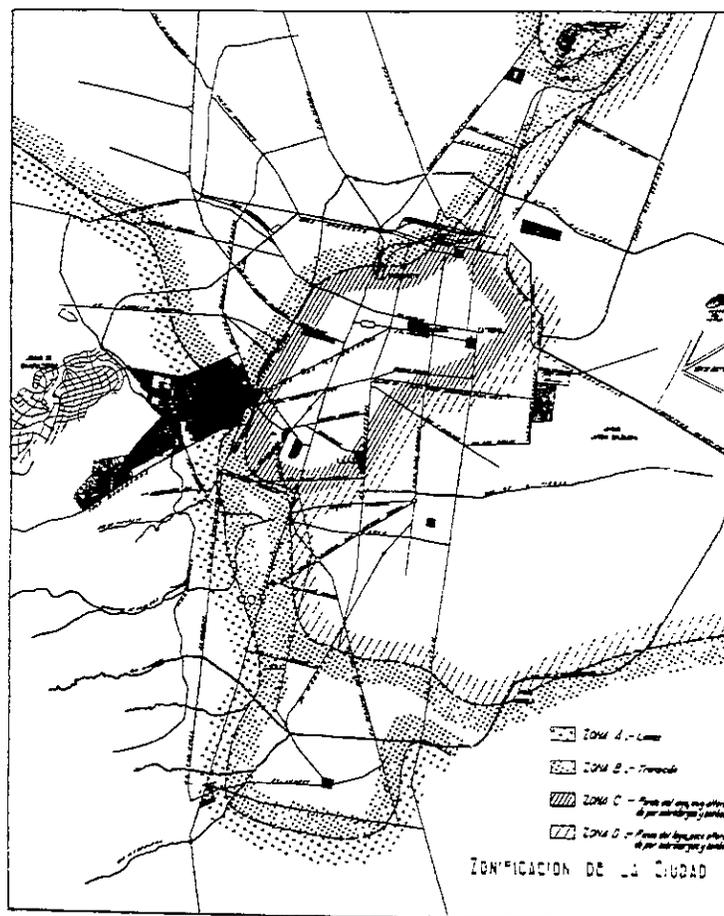


Fig. 2 Zonificación geotécnica 1952 (ref.1)

En esta primera zonificación se da el nombre a las zonas A y B, de "Lomas" y "Transición" respectivamente, sin embargo para las zonas C y D aún no se definía un nombre específico, llamándolas: "Fondo del lago, muy alterado por sobrecargas y bombeo" y "Fondo del Lago, poco alterado por sobrecargas y bombeo", respectivamente.

Pocos años después, se recopila mayor cantidad de información geotécnica de investigaciones realizadas a partir de 1947 a 1959; la recopilación y análisis del conjunto de datos se confiaron al Instituto de Ingeniería. Con estos datos se zonificó atendiendo principalmente a las propiedades de los materiales, que se encontraron en sondeos perforados a una profundidad de 50m o menor, llegando en algunos puntos hasta 100m (Marsal, R., Mazari, M., 1959).

La zonificación geotécnica (fig. 3) se divide de la siguiente manera (ref.2);

El nombre de **zona de lomas** se da al derrame basáltico de El Pedregal (lavas del Xitle) y a las faldas de la serranía de Las Cruces, debido a su altitud relativa, que presentan generalmente condiciones favorables para cimentar estructuras; la capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcilla compresibles que puedan ser causa de asentamientos diferenciales de gran magnitud.

La **zona de transición** la localizan entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, donde las condiciones estratigráficas del subsuelo varían en forma extraordinaria de un punto a otro. En general, se tienen superficialmente los depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la formación Becerra, cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos en los que el material predominante es la grava y la arena.

Llaman **zona del lago a las fronteras interiores de la zona de transición**, tomando como base la formación típica de la parte centro y oriente de la ciudad construida sobre el fondo del lago de Texcoco, un sondeo de esta zona exhibe los siguientes estratos: 1, depósitos areno-arcillosos o limosos, con abundancia de restos arqueológicos, o, bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la ciudad llegan hasta 10m de profundidad; 2, arcillas volcánicas extraordinariamente compresibles, de variados colores y consistencias entre blanda y media, intercaladas con pequeñas capas o lentes de arena; su potencia total varía de 15 a 32m; 3, la primera capa dura, de unos 3m de espesor, constituida por suelos arcillo o limo-arenosos, compactos y rígidos; 4, arcillas volcánicas de características semejantes a las de la formación superior, aunque más comprimidas y resistentes; este manto tiene una potencia comprendida entre 4 y 14m; 5, depósitos de arena con grava, separados por estratos de limo o arcilla arenosa. En algunos lugares han encontrado una tercera formación compresible integrada por arcillas volcánicas, a 65m de profundidad aproximadamente.

Para esta última zona, los autores tomaron en consideración que la estratigrafía antes definida puede sufrir variaciones importantes, debido principalmente, a la historia de las cargas aplicadas en la superficie del terreno, por tanto, subdividieron la zona del lago en dos regiones. La primera abarca a la antigua traza de la ciudad, refiriéndose a la zona ocupada por los monumentos Aztecas y de la Colonia; la segunda pertenece a la parte del área urbana, que en aquella época, no había experimentado cambios sensibles debido a que las cargas actuantes en la superficie eran moderadas o nulas.

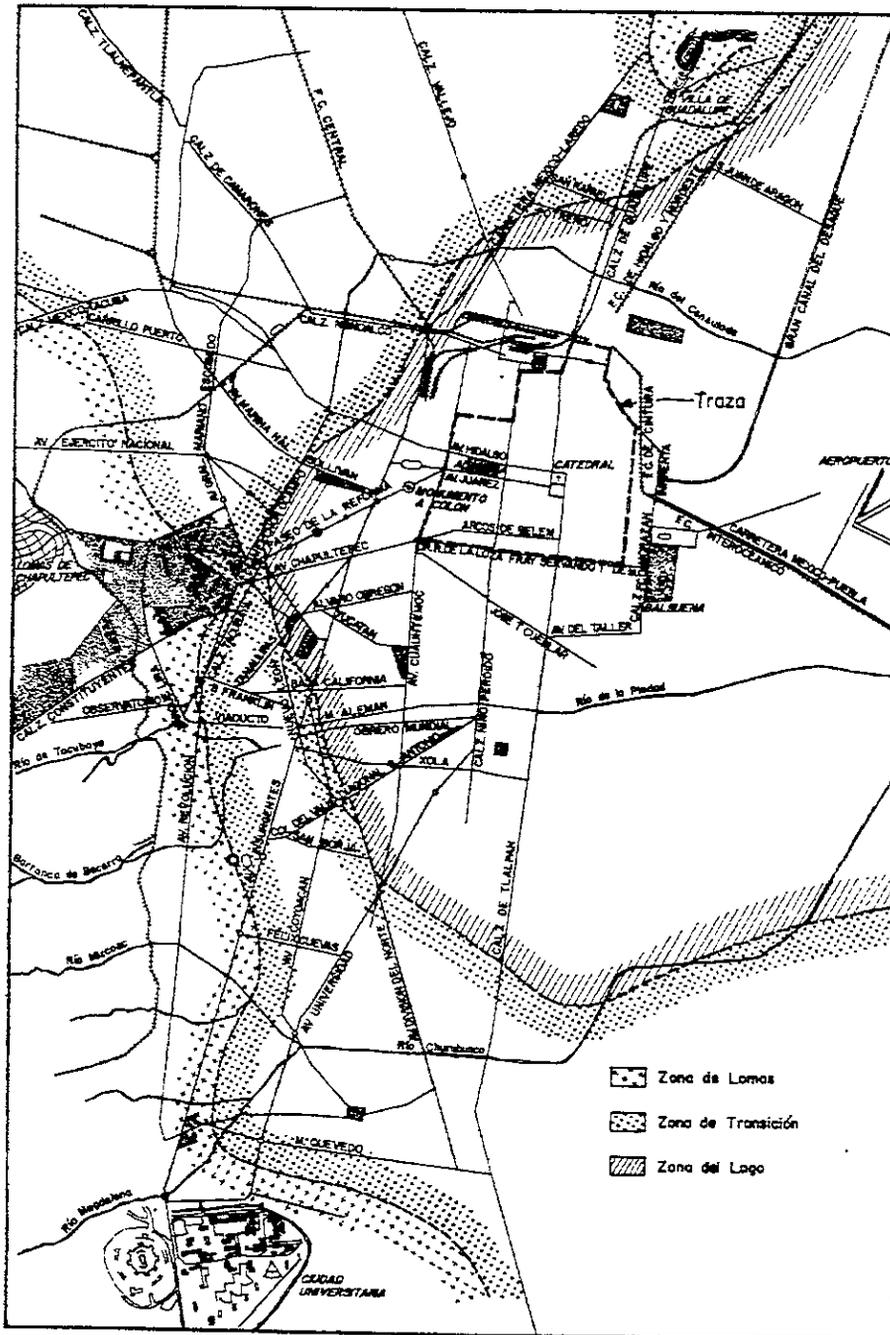


Fig. 3 Zonificación geotécnica 1959 (ref.2)

En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 9 de febrero de 1966, se edita una zonificación geotécnica diferente de las antes mencionadas, la cual solo se divide en zonas de baja y alta compresibilidad, llamada en dicho reglamento "Plano de Zonas de Compresibilidad de la Ciudad de México, D.F." (fig. 4) y "Plano de Zonas de Compresibilidad del Distrito Federal" (fig. 5). A continuación se presenta el fragmento del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal mencionado;

Capítulo XXV.- Cimentaciones

Artículo 190.- Zonas

Para la aplicación de este capítulo y desde el punto de vista de la composición del subsuelo, se considera el territorio del Distrito Federal dividido en zonas de alta compresibilidad y de baja compresibilidad, de acuerdo con los "Plano de Zonas de Compresibilidad de la Ciudad de México, D.F." y "Plano de Zonas de Compresibilidad del Distrito Federal", que se insertan a continuación:

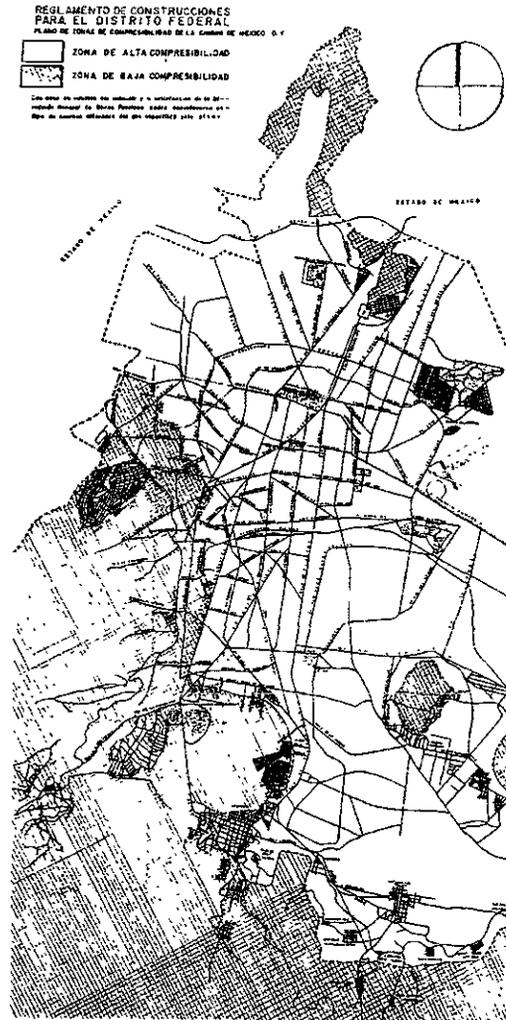


Fig. 4 Zonificación geotécnica 1966 (ref. 3)

En 1978, Raúl J. Marsal (ref. 4) presenta una zonificación geotécnica, la cual fue tomada del original número CH-G1003 de la Comisión de Aguas del Valle de México de noviembre de 1968, elaborada por J.J. Schmitter (fig. 6) basada en la geología según F. Mooser (1956), diversos sondeos realizados en la época y la disposición de las grandes masas observadas superficialmente.

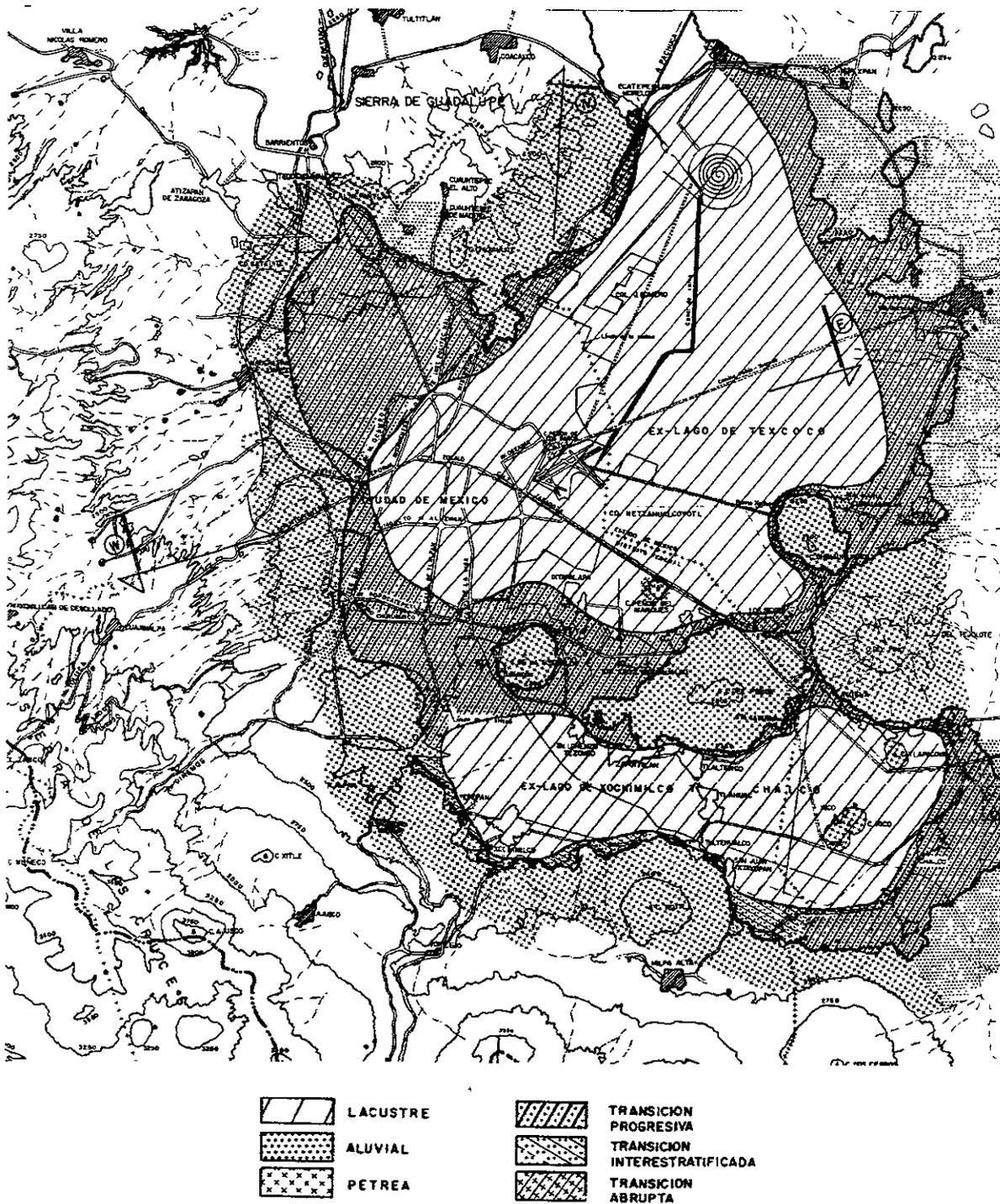


Fig. 6 Zonificación geotécnica 1968 (ref. 4)

En esta zonificación geotécnica se distinguen tres zonas importantes con los nombres de: lacustre, aluvial y pétreo, además se indican las zonas de transición que pueden ocurrir en las fronteras de las formaciones pétreo, aluvial y lacustre, haciendo división en Transición progresiva, Transición interestratificada y Transición abrupta. Se da en dicha publicación comentarios para cada zona:

Zona lacustre: Debido a la magnitud e importancia de las construcciones que se encuentran en ella, se tiene información estratigráfica y de propiedades mecánicas confiables. Con motivo de los estudios efectuados por el Proyecto Texcoco ampliados por la Comisión del Lago Texcoco, datos del mismo tipo se han extendido a la parte central de la cuenca, abarcando el área de El Caracol al Norte, el Gran canal de Desagüe al Oeste, la zona de Teotihuacán-Texcoco-Chiconautla al Este y el bordo Xochiaca al Sur. Con información escasa y dispersa en las zonas lacustres de Xochimilco y Chalco, al Sur y Sureste respectivamente.

Zona aluvial: En esta zona se tiene abundantes datos de estratigrafía, particularmente hacia el Norte y Noroeste de la ciudad, concluyendo que todo esfuerzo de establecer correlaciones de propiedades y secuencia de formaciones está condenado al fracaso por la heterogeneidad de materiales e historia de su deposición.

Zona pétreo: Cambiante por los diferentes tipos de rocas que pueden identificarse en las partes altas (tobas, lavas, escoria volcánica, etc.)

Transición progresiva: En que la formación rocosa aparece cubierta por depósitos de origen aluvial, a su vez subyacentes a las capas más recientes de arcilla lacustre.

Transición interestratificada: Característica de regiones en que las fases aluvial y lacustre se suceden en forma alternada, dando lugar a la intercalación de mantos blandos arcillosos con otros de matriz granular contaminados por finos, generalmente más duros y más resistentes, también el caso de derrames de lava sobre arcillas o suelos aluviales, cubiertos por otras capas más recientes de la formación lacustre o acarreo fluviales.

Transición abrupta: Se distingue porque los depósitos lacustres están en contacto con la formación rocosa, tapizada por derrubios o suelo residual.

Por último, señala Raúl J. Marsal, que la delimitación de las zonas lacustre, aluvial, pétreo y sus respectivas transiciones es aproximada, dado que la información recabada sobre estratigrafía y propiedades es reducida y dispersa; casi sin excepción, los sondeos realizados corresponden a estudios de predios en que se proyectaron obras de importancia.

En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 14 de diciembre de 1976, se edita la siguiente zonificación geotécnica (fig. 7).

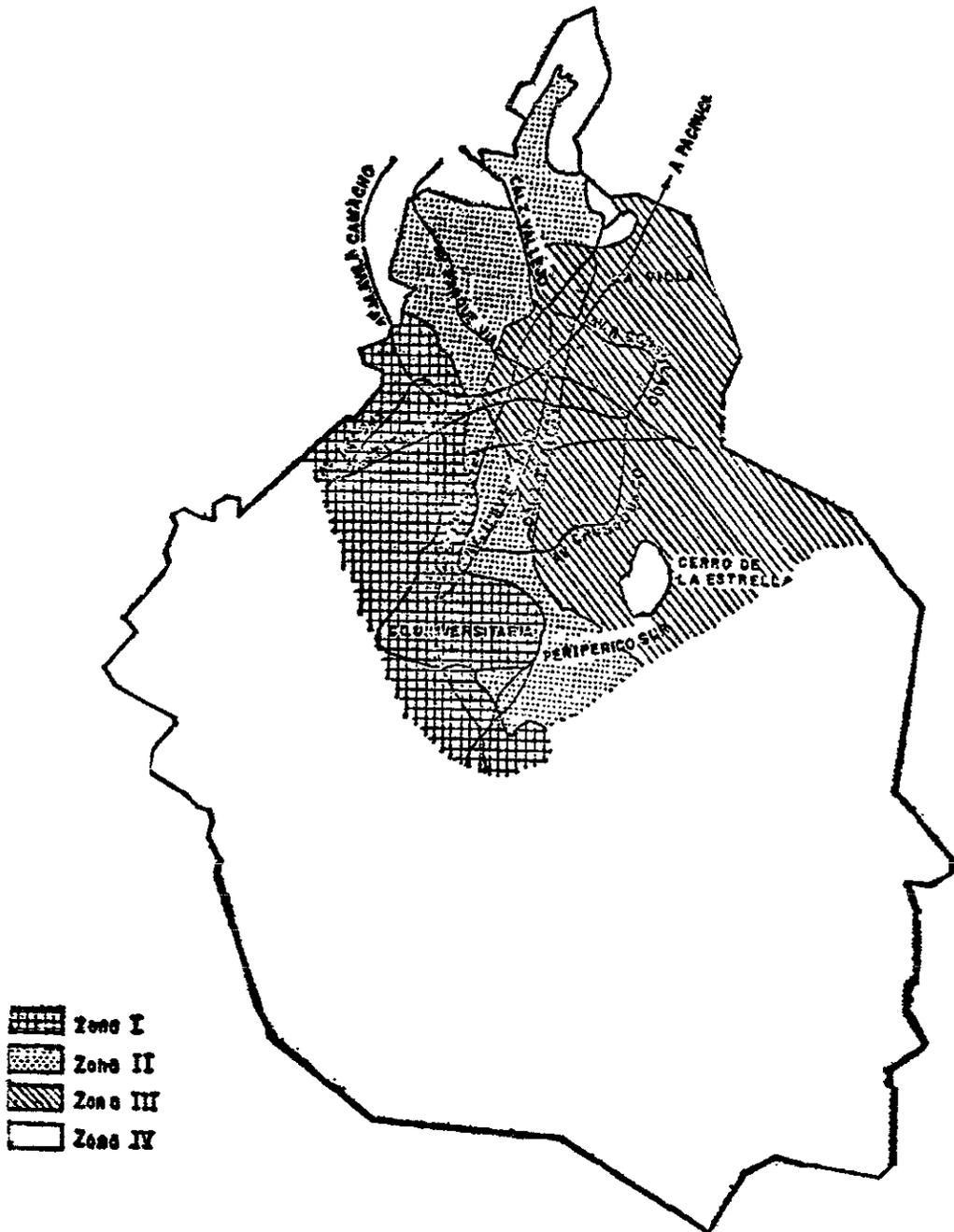


Fig. 7 Zonificación geotécnica 1976 (ref.5)

De acuerdo con el artículo 262 de la ref. 5, el Distrito Federal se encuentra dividido en cuatro zonas cuyas definiciones son las siguientes;

Zona I, con suelos compresibles de espesor $H < 3m$;

Zona II, con suelos compresibles de espesor $3 m \leq H < 20m$;

Zona III, con suelos compresibles de espesor $H \geq 20m$; y

Zona IV, poco conocida desde el punto de vista de la mecánica de suelos.

Rodolfo del Castillo (1978) presentó una zonificación geotécnica basada en 217 sondeos realizados de 1970 a 1978, consideró la información presentada por el D.D.F. en la publicación "Concentración de datos Básicos de los estudios de mecánica de suelos realizados para dependencias del D.D.F.", en la información de la " V reunión nacional de mecánica de suelos" y en la zonificación propuesta en la ref. 2, así como en la información que se encuentra en dicho libro; comparó la zonificación de la ref. 2 con el plano presentado en el Simposio sobre Zonas Minadas (Rodríguez, J., 1976) y con la Memoria de las Obras del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, D.D.F., 1976, capítulo correspondiente a geología, además analizó el desarrollo geológico e hidrográfico de la Cuenca de México. Su trabajo consistió en ampliar la zonificación presentada por Marsal y Mazari en 1959.

En la figura 8 se presenta la zonificación resultante en zonas lacustre, de transición y pétreas.

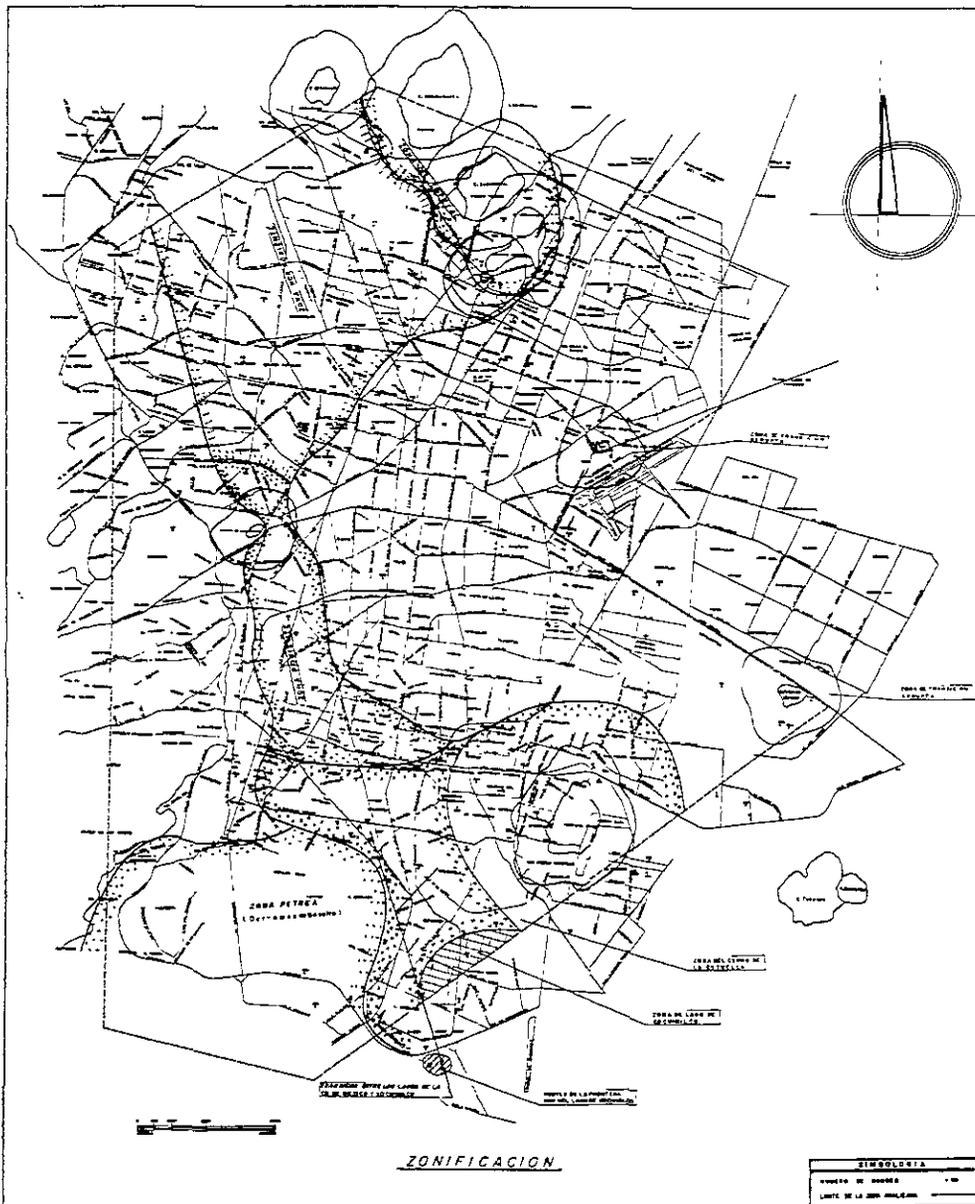


Fig. 8 Zonificación geotécnica 1978 (ref. 6)

COVITUR (1986) presenta una zonificación geotécnica (fig. 9) del área urbana que sigue los lineamientos presentados por Marsal y Mazari (1959), basada en las propiedades de compresibilidad y resistencia de los depósitos característicos de la cuenca: lacustres, aluviales y volcánicos, y en información estratigráfica que fue fundamentada en todas las publicaciones disponibles sobre ese tema y en la derivada de los estudios geotécnicos realizados para las distintas líneas del Metro.

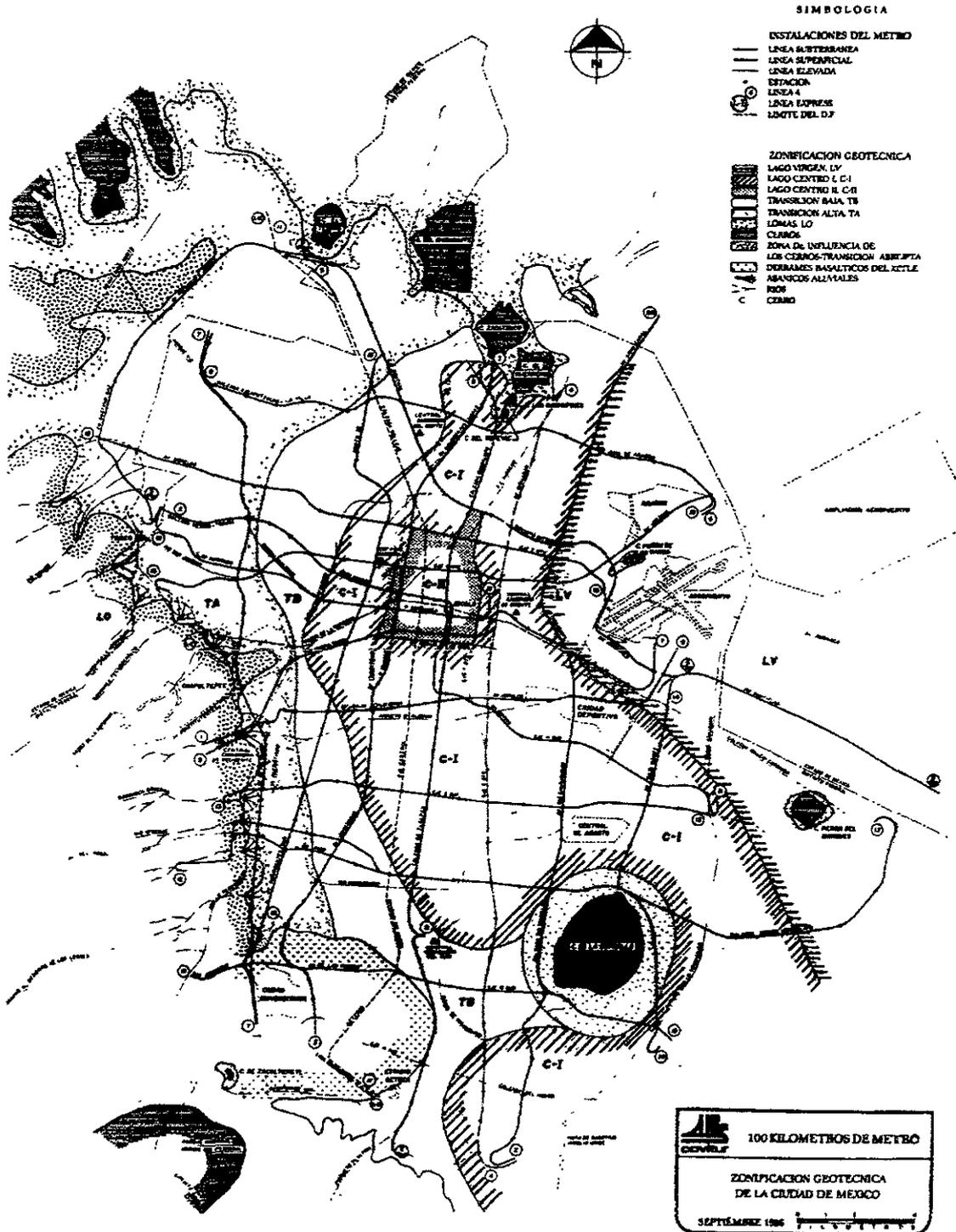


Fig. 9 Zonificación geotécnica 1986 (ref. 7)

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, publicadas el 12 de noviembre de 1987, presentan la siguiente zonificación geotécnica (fig. 10).

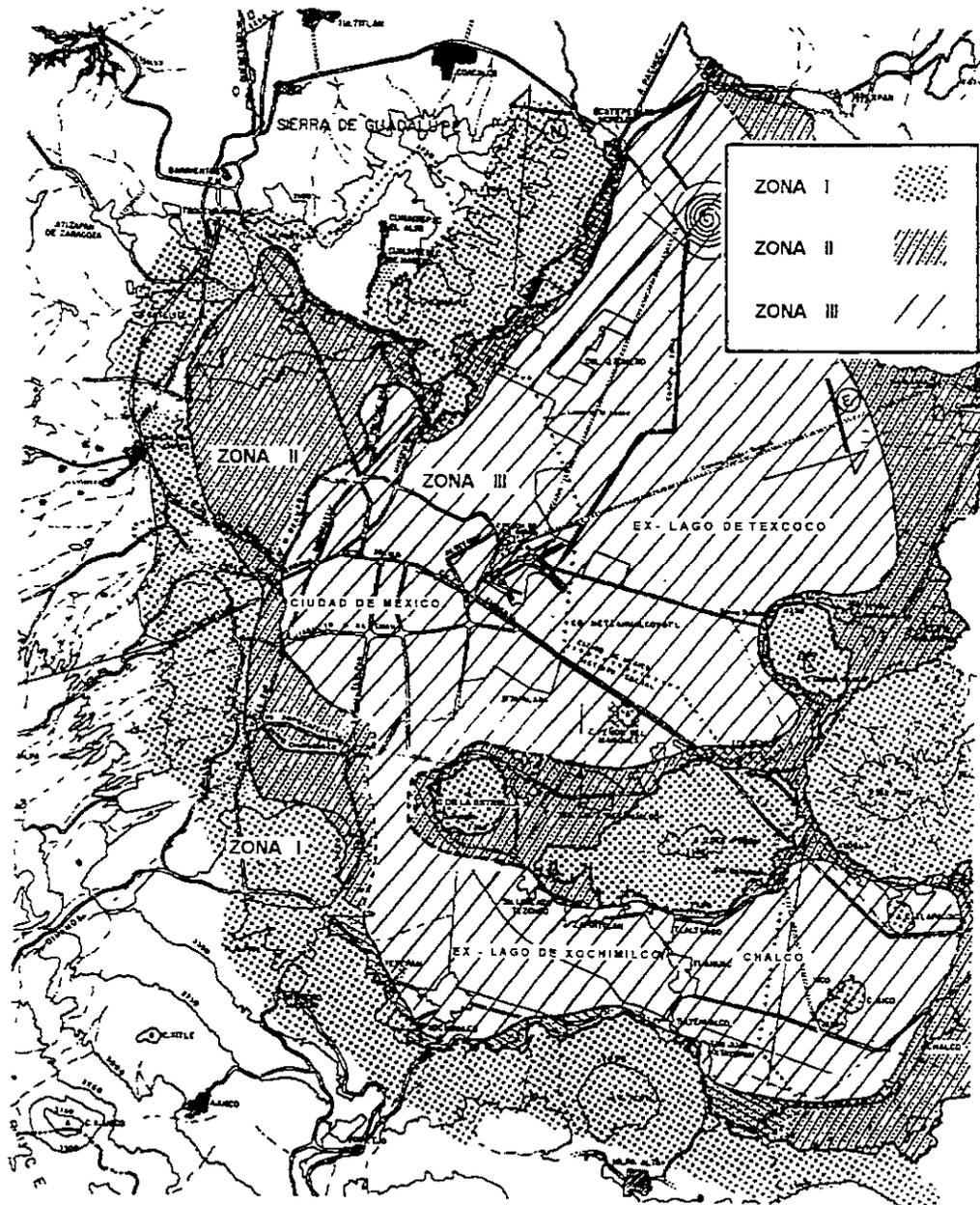


Fig. 10 Zonificación geotécnica 1987 (ref. 8)

De acuerdo con el artículo 219 de la ref. 9, el Distrito Federal se encuentra dividido en tres zonas cuyas definiciones son las siguientes;

Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena;

Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, y

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50m.

La zonificación geotécnica vigente (fig. 11) fue publicada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, el día 27 de febrero de 1995. Las zonas en que se encuentra dividida se definen de la misma manera que para la zonificación geotécnica de 1987, sin embargo se introducen ciertas modificaciones en la cercanía del Cerro de la Estrella.

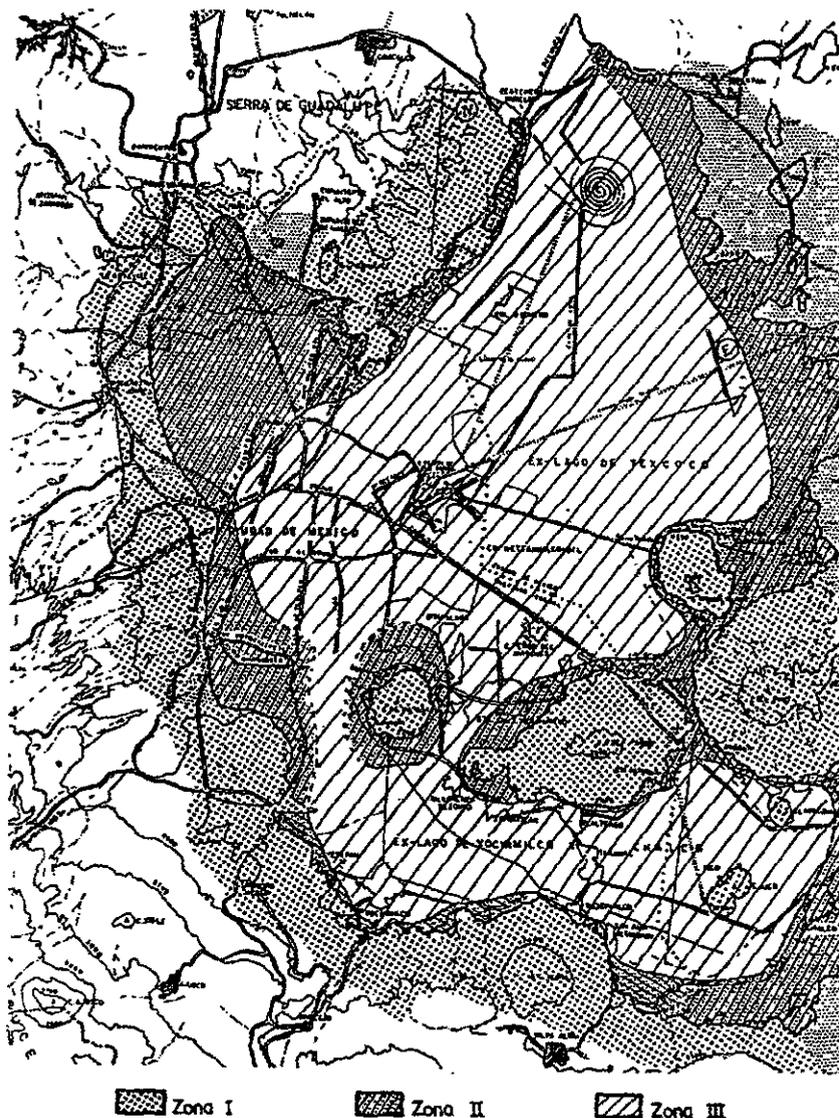


Fig. 11 Zonificación geotécnica 1995 (ref. 10)

Esta última zonificación geotécnica fue el resultado de algunas modificaciones de la zonificación de 1987, hechas por Manuel Mendoza (investigador del I.I.), dicha zonificación ya había sido publicada por el Instituto de Ingeniería en julio de 1993 en la ref. 11, sin embargo solamente fue oficial a partir de su publicación en las NTC de 1995.

Después de la reseña histórica sobre la evolución de la zonificación geotécnica nos podemos dar cuenta que conforme se tenga mayor información sobre el subsuelo es necesaria la actualización y ampliación de dicha zonificación, ya que sobre la base de esta información se puede intuir, entre otras cosas de importancia, el método de exploración más conveniente para un predio dado.

Debo aclarar **que esta tesis no cubre toda el área** estudiada por los trabajos antecedentes, debido al gran tiempo y esfuerzo que ello requeriría. Sin embargo el área restante sí está en proceso de estudio, trabajo realizado por otros tesisistas del Instituto de Ingeniería.

En el siguiente capítulo se definirá el área de estudio de esta tesis.

I Descripción del área de estudio

I.1 Localización

La Cuenca de México está situada entre los paralelos $19^{\circ} 00'$ y $20^{\circ} 15'$ Latitud Norte y entre los meridianos $98^{\circ} 10'$ y $99^{\circ} 35'$ Latitud Oeste. En la región Suroeste de la cuenca se localiza el Distrito Federal que ocupa aproximadamente una superficie de 1500km^2 (fig. I.1.1).

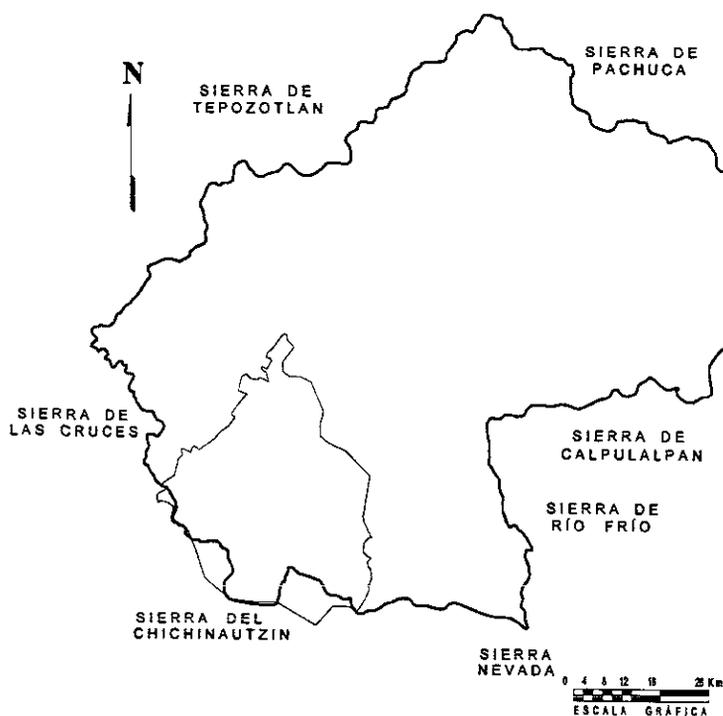


Fig. I.1.1 Cuenca de México y Distrito Federal

El área de estudio se localiza en la región Sur del Distrito Federal. De acuerdo con el programa de estudio emprendido en el Instituto de Ingeniería, se consideró específicamente el área limitada por las coordenadas $(470860.00, 2139440.00)\text{m}$ y $(488305.00, 2128370.00)\text{m}$ en el sistema UTM, dando un total de 193.11615km^2 , que representa aproximadamente el 12.87% de la superficie del Distrito Federal (fig. I.1.2), el área de estudio abarca partes de las siguientes delegaciones: Tlalpan, Coyoacán, La Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Xochimilco, Cuajimalpa de Morelos e Iztapalapa. Las delegaciones están ordenadas en forma descendente tomando como base la importancia de su contribución en cuanto a superficie.

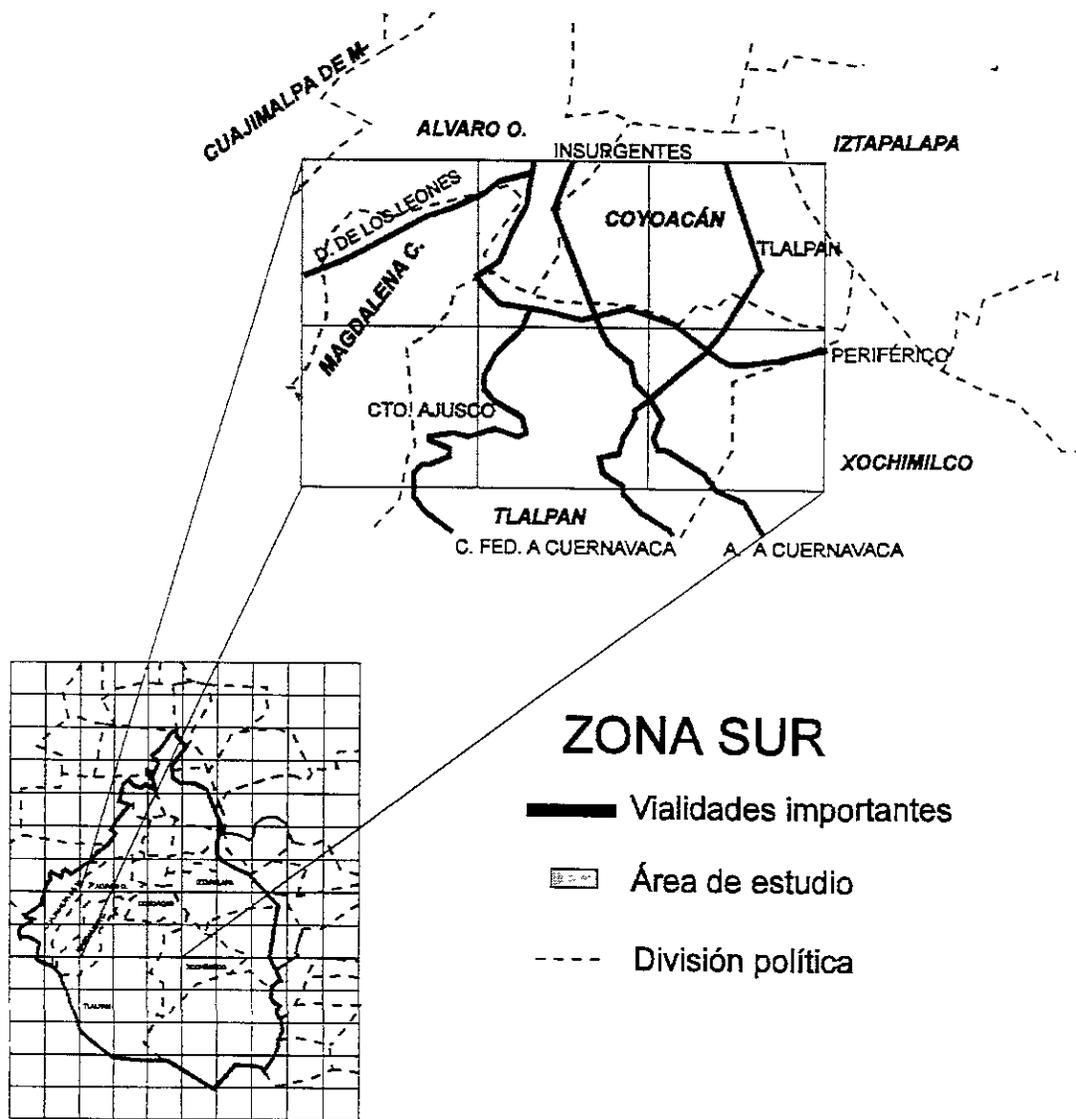


Fig. I.1.2 Área de estudio

En el anexo B se encuentra el plano de localización detallado a escala 1:50,000.

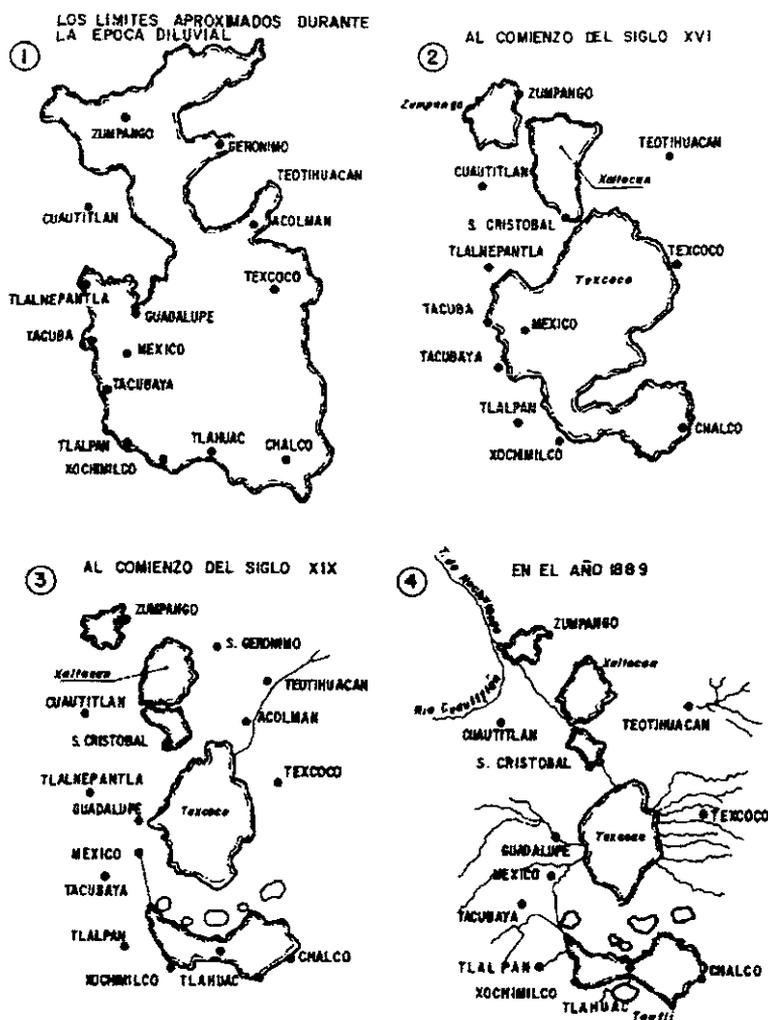
1.2 Hidrografía

La hidrografía juega un papel importante en la formación del suelo, debido a que generan abanicos aluviales, en la desembocadura de una corriente montañosa, en una superficie plana o de poca inclinación. Los abanicos aluviales son depósitos de material clástico, con aspecto de medio cono recostado, inclinado, con el ápice hacia arriba. El tamaño y espesor del material varía: en la porción superior predominan los gruesos y hacia la base los finos; los mayores espesores se encuentran en la porción central superior.

El Este del área de estudio se encuentra en la transición entre el extinto lago de la Ciudad de México y el lago de Xochimilco. El lago de la Ciudad de México, en ciertas épocas del año, era de agua dulce debido al suministro de los manantiales de Chapultepec y Tlalpan, así como de las redes de arroyos provenientes de las lomas. En épocas de estiaje, al Este del lago se incrementaba la salinidad por evaporación. El lago de Xochimilco es clasificado por Mooser como lago de piamonte de la Sierra del Chichinautzin alimentado de manantiales de agua dulce (ref. 12).

El descenso del nivel, en el lago de Xochimilco y la extinción del lago de la Ciudad de México, fueron causados por los asentamientos humanos, así como por sus actividades, además de la necesidad de protegerse contra las inundaciones construyendo grandes obras para desagüe.

En la figura I.2.1 se presenta la evolución de los lagos de Xochimilco y de la Ciudad de México, así como la evolución de los demás lagos que llegaron en un tiempo a formar un solo espejo de agua.



POR: ELIZABETH SCHLING KIEL (1938)

Fig. I.2.1 Secuencia de evolución de los lagos en los últimos siglos

Hoy los cauces naturales solamente se conservan en las zonas montañosas que rodean a el área urbanizada. Los ríos que cruzan la zona urbana han sido en su mayoría entubados para evitar el contacto de la población con las aguas negras. Al Sur, los derrames de lava originados por el Xitle abarcan gran parte del área de estudio por lo que debido a la porosidad, fracturamiento y resistencia a la erosión del basalto, no se presenta escurrimiento superficial, salvo en ciertas zonas donde la pendiente es pronunciada. Se localizan en esta zona de derrames el río San Buenaventura y el Eslava; el primero es un río intermitente y el segundo es perenne.

El río San Buenaventura, ocasionalmente conduce crecientes importantes debido a que recibe las descargas de la planta de bombeo Coapa (ref. 13) y a las precipitaciones intensas combinadas con deshielos del Volcán del Ajusco.

El río Eslava es un afluente del río Magdalena, pero desafortunadamente es contaminado, por asentamientos ilegales aledaños a San Nicolás Totolapan.

Es importante señalar que la Sierra del Chichinautzin es la zona de recarga natural del acuífero del área metropolitana debido a la alta permeabilidad de su roca de basalto. Los grandes manantiales de Xochimilco son un punto de descarga del flujo subterráneo; aquí se localizan algunos de los pozos de extracción de agua más productivos del área (ref.14). Debido a que toda la cuenca se encuentra rodeada por montañas, probablemente existan otras zonas de recarga del acuífero.

Al Oeste del área de estudio se encuentra la Sierra de las Cruces que, favorecida por las abundantes precipitaciones que se producen en las partes altas y por su constitución, que es fácilmente erosionable por el paso del agua, se produce un gran número de cauces originando subcuencas fluviales, correspondientes (en el área de estudio) a los ríos la Magdalena, San Ángel Inn, Puerta Grande y Puente Colorado. El río Magdalena es una corriente perenne mientras que las restantes son intermitentes.

El río Magdalena, antiguamente uno de los ríos más caudalosos y largos; en otras épocas abasteció de agua a los actuales viveros de Coyoacán y alimento las corrientes del río Churubusco (ref.15). Algunos tramos fueron convertidos en calles y avenidas (río Magdalena y Paseo Chimalistac), por lo que apenas le quedan 21.6 kilómetros de cauce. Conducen todavía agua cristalina; corresponden al tramo llamado Los Cuatro Dinamos, en la delegación La Magdalena Contreras, empleados hasta los años treinta como generadores de energía para la industria textil. De su caudal, a la altura del primer dinamo, se desvía un volumen ínfimo de (entre 170 y 200 litros por segundo), que es potabilizado en la planta denominada Magdalena, construida a la orilla del río. El volumen potabilizado y distribuido en la parte Sur de la ciudad representa en época de lluvias 5% del caudal y alrededor de 25% en época de estiaje. Su cauce deriva en la presa Anzaldo, ubicada en el Pedregal de San Ángel, de ahí, a través del Interceptor Poniente, va por el Tajo de Nochistongo hasta el Golfo de México. Con la expansión de la ciudad al Oeste, las áreas aledañas a su cauce fueron urbanizadas y su subcuenca ocupada como drenaje de descargas residuales. Así de simple es como exterminamos los demás ríos de la ciudad, con nuestras descargas residuales. Se han construido drenajes

marginales a fin de eliminar dichas descargas, pero conforme pasa el tiempo, estas obras se vuelven insuficientes ya que aumentan los asentamientos humanos.

El río San Ángel Inn, limita al Noroeste con la cuenca del río Mixcoac, sigue su rumbo hacia el Noreste, capta algunos manantiales como los de San Bartolo Ameyalco y los escurrimientos de Lomas de Axomiatla, Lomas de Guadalupe y Las Águilas. Sobre el río se construyó la presa Tequilazco.

El río Puente Colorado y el Puerta Grande, se juntan en la Presa de Tarango, que fue diseñada para regular las avenidas de su cuenca, de tal forma que se protege a la zona urbana aguas abajo. Los escurrimientos ya regulados salen por el colector Barranca del Muerto que se une al colector del río Churubusco.

Los ríos (o corrientes) antes mencionados, son los más importantes del área de estudio, en el anexo B se encuentra el plano de hidrografía escala 1:50,000 donde, además de los ríos comentados, se señalan otros de menor importancia.

I.3 Desarrollo urbano

La zona Sur fue siempre la más favorecida por la naturaleza en ese espacio geográfico: Lagos de agua dulce, tierras feraces y húmedas, la proximidad de la Sierra del Chichinutzin totalmente recubierta de bosques que le aseguraba la regularidad del régimen de lluvias, una caza abundante y abastecimiento inagotable de madera.

Aprovechando todas estas favorables condiciones ambientales, hacia el año Cero de la era cristiana ya eran varios los asentamientos humanos en las nuevas tierras: Cuicuilco, Tetelpan, Copilco, Contreras, Anzaldo y Lomas de Becerra. En esa época, desafortunadamente, sobrevinieron las erupciones del Xitle, que originaron el manto de lava de El Pedregal bajo el cual desaparecieron algunos de estos centros de población.

Como consecuencia de la catástrofe eruptiva, la vida humana se eliminó de la zona, los habitantes huyeron a zonas más altas de la Sierra de las Cruces. Habrían de transcurrir cerca de mil años para que nuevamente reapareciera la vida humana en la persona de los toltecas, que emigraron hacia aquí después de la caída de Tula (año 1100 aprox.), se establecieron en Culhuacán de donde, salieron algunos para fundar Coyoacán al que dieron este nombre.

Unos doscientos años después, hicieron irrupción en el valle de México, diversos grupos tribales que decían provenir de un lugar común, situado muy al norte. Conforme llegaban iban ocupando las tierras de mejor calidad en derredor de los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Entre los primeros que arribaron, todos ellos del tronco náhuatl, se contaban los tepanecas que se asentaron en

Azcapotzalco y Coyoacán mezclándose pacíficamente con sus poco numerosos moradores originales.

Hacia el año 1200, la llegada a la Cuenca de México de la última de las tribus nahoas o nahuatlacas, llamada de los Aztecas, y después también de los Tenochcas o Mexicas. Luego de peregrinar como indeseables en toda la cuenca, al cabo de unos ciento veinticinco años se asentaron finalmente en unos inhóspitos islotes del lago de Texcoco. Los tepanecas, sin embargo, habían impuesto tributo a los mexicas; tributo que muchas veces era injusto y humillante. Su frugalidad y grandes dotes guerreros y administrativas, y su pasmosa habilidad para asimilar las culturas de los vecinos, hicieron de los mexicas un pueblo emprendedor y temible al punto que, a menos de cien años de haber fundado su capital, Tenochtitlán, ya constituían una seria amenaza para la supervivencia de todos los pueblos ribereños, pero en particular para la de los tres centros tepanecas y sus suburbios, cuyos señores provocaban constantes guerras y enfrentamientos preventivos contra los aztecas con el fin de impedir su expansión, logrando resultados muy desiguales.

El rey de Coyoacán Maxtla (hijo de Tezozómoc) se hizo célebre por su odio a los mexicas. A la muerte de su padre, en 1426, provocó en tal forma a sus rivales que éstos, bajo el mando de Itzcóatl (¿?-1440), y auxiliados por Nezahualcóyotl, señor de Texcoco, acabaron para siempre con el poder tepaneca, y, desde entonces, sus tres metrópolis y pueblos anexos pasaron a ser definitivamente tributarios de los aztecas. Itzcóatl establece la triple Alianza con los señoríos principales de la cuenca, Texcoco y Tlacopan; organiza y hace crecer la ciudad y la convierte en potencia militar que acaba por ser invencible en el mundo indígena. Moctezuma Ilhuicamina (1440-1469) es el creador del imperio que extiende hasta el centro de Veracruz y hasta la región mixteca, en Oaxaca, imperio que sus sucesores ampliarán más hasta llegar a lo que hoy es Nicaragua, en Centroamérica (ref. 16).

El inicio del siglo XVI y el ascenso al trono mexicano de Moctezuma el Xoxoyotzin parece coincidir con el de un sucesor del infortunado Tzutzuma, Cuauhpopoca como señor de Coyoacán. Ambos personajes estaban destinados a ser testigos de los más grandes acontecimientos de la historia de Mesoamérica, la aparición de hombres blancos, barbados y vestidos de hierro, venidos del mar por el Oriente, dueños de grandes bestias desconocidas y amos del rayo destructor y estruendoso que ellos llamaban, respectivamente, caballos y artillería.

Los conquistadores españoles, al asentarse en México, copiaron, por supuesto, las formas de gobierno que funcionaban en España para manejar a las colonias. En el caso de la Nueva España se adoptó el sistema municipal castellano. Entre las principales figuras de gobierno estuvieron la Alcaldía, la Real Audiencia, el Ayuntamiento y la Regencia. Después de la Independencia cambiaron las leyes y también las formas de gobierno.

En el decenio de los cuarenta se inicia el incontenible fenómeno del aumento de población. Durante el siguiente se instala la Máxima Casa de Estudios en la Ciudad Universitaria (Coyoacán) y se incrementa la fiebre de construcciones y de la depredación de muchos de sus valores naturales.

La población total en el D.F. al 5 de noviembre de 1995 según el INEGI (ref. 17) es de 8,489,007 personas, la distribución de la población en las delegaciones de interés es la siguiente:

Delegación	Porcentaje poblacional del D.F.	Porcentaje territorial del D.F.
Tlalpan	6.5	20.7
Coyoacán	7.7	3.6
La Magdalena Contreras	2.5	4.2
Alvaro Obregón	8.0	6.5
Xochimilco	3.9	8.4
Cuajimalpa de Morelos	1.6	5.1
Iztapalapa	20.0	7.9

En la tabla anterior podemos observar que la distribución poblacional no es congruente con la territorial pero se debe tomar en cuenta, que las delegaciones con aparente capacidad de urbanización no pueden ni deben ser urbanizadas sin control ya funcionan como zonas de recarga del acuífero de la Ciudad de México, anualmente se ocupan entre 200 y 300 hectáreas adicionales de las áreas de captación, a pesar de que fueron delimitadas como zonas de conservación ecológica. Con cada metro cuadrado que se ocupa, en promedio se pierden para siempre 170 litros de agua de recarga anual. Dicho de otra manera: por cada hectárea ($10,000\text{m}^2$) que se ocupa, perdemos el agua que consumen 1,500 familias. Además, al destruir bosques, perdemos nuestra fuente de oxigenación local, se incrementa la erosión del suelo de las montañas y se termina destruyendo el equilibrio biótico de la cuenca (ref. 18).

El abastecimiento de agua y de drenaje para la creciente población de la Ciudad de México representa un gran reto. Al igual que el problema de la contaminación del aire, la situación del abastecimiento de agua en la ciudad se aproxima a una crisis. El continuo crecimiento urbano, junto con el escaso financiamiento, han limitado la capacidad del gobierno para extender la red de abastecimiento de agua a las áreas que carecen del servicio, para reparar fugas y para tratar las aguas residuales. Casi el setenta y dos por ciento del abastecimiento de agua de la ciudad proviene del acuífero localizado bajo el área metropolitana, el cual ha venido padeciendo una considerable sobreexplotación. Los niveles de agua del subsuelo se han venido abatiendo en el transcurso de los últimos 100 años, lo que ha provocado un hundimiento del suelo de la región provocando daños a la infraestructura, especialmente a las redes de agua potable y drenaje. Estas dificultades, combinadas con el manejo inadecuado de desechos peligrosos, provocan que el acuífero y el sistema de distribución sean vulnerables a la contaminación, con los consecuentes riesgos para la salud pública (ref. 14).

Las consecuencias negativas de la sobre explotación del acuífero local, han obligado a buscar fuentes adicionales cada vez mas alejadas: primero Lerma, luego Cutzamala, como el agua viene cada vez de mas lejos, progresivamente se ha tenido que construir una gigantesca y sofisticada infraestructura de distribución de agua, cuya inversión y costo de operación es cada día mas alto.

I.4 Topografía

Las características topográficas del área de estudio son de terreno plano hacia el Noreste y Este, donde se localiza la curva de nivel 2240msnm; en los restantes puntos cardinales, la superficie presenta fuertes pendientes debido a la presencia de la Sierra del Chichinautzin, la Sierra de las Cruces y la Sierra de Xochitepec. Por lo tanto, las dos terceras partes del área de estudio corresponden a fuertes pendientes y el tercio restante a suaves pendientes.

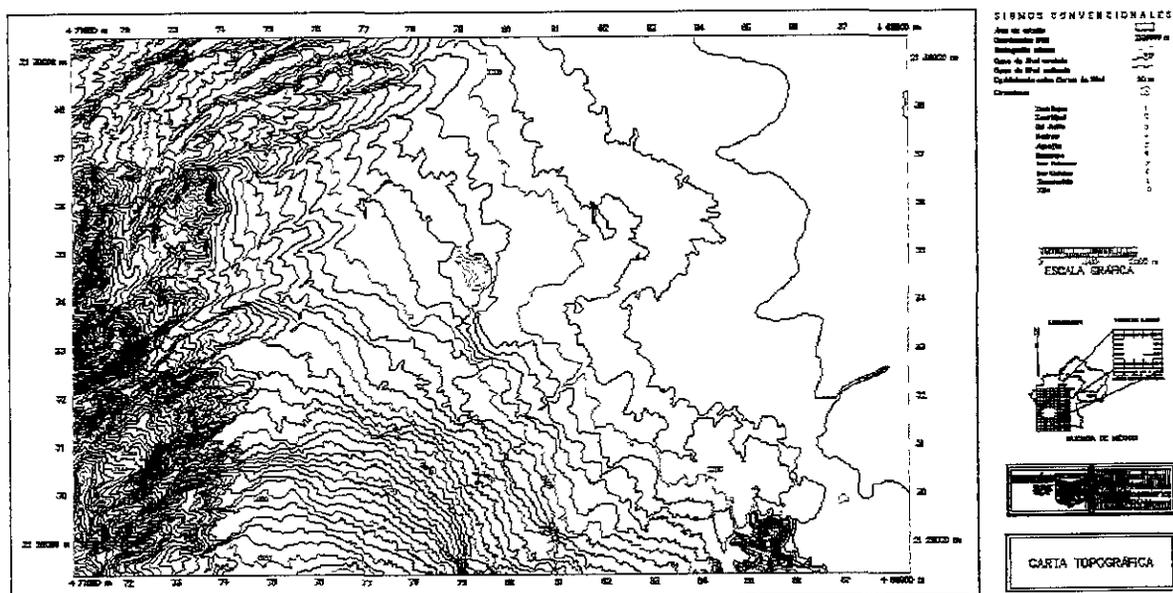
Las principales elevaciones dentro del área son:

Elevaciones principales (Nombre)	Altitud (msnm)
Zacatépetl	2420
Del Judío	2770
Sasacapa	3240
Xochitepec	2500

Las principales elevaciones en la frontera del área de estudio son:

Elevaciones principales (Nombre)	Altitud (msnm)
Xitle	3120
Zacazontela	3270
Tarumba	3460
Ocotlal	3520

La figura I.4.1 muestra la topografía del área, en el anexo B se encuentra el plano de topografía escala 1:50,000 en donde además de las elevaciones comentadas se encuentran otras de menor importancia.



Fuente: Sistema de Información Geográfica, S.A. 1986

Elaboró: Flores Tapia Luis Isaac N.

Fig. I.4.1 Topografía

I.5 Geología general

Como los procesos geológicos ocurren tan lentamente, y consecuentemente tienen tan larga duración, los geólogos han ido desarrollando desde el siglo pasado una escala de tiempo, basada en eventos geológicos globales.

La Escala del Tiempo Geológico está subdividida en cinco Eras. Las Eras son a su vez subdivididas en Periodos y estos últimos en Épocas como se muestra en la siguiente tabla:

EDAD (Ma)	ERA	PERIODO	ÉPOCA
0.01-0	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno
1.8-0.01			Pleistoceno
5.3-1.8		Terciario	Plioceno
23.7-5.3			Mioceno
36.6-23.7			Oligoceno
57.8-36.6			Eoceno
66.4-57.8			Paleoceno
144-64.4			Mesozoico
208-144	Jurásico		
245-208	Triásico		
286-245	Pérmico		
360-286	Paleozoico	Carbonífero (Mississípico y Pensilvánico)	
408-360		Devónico	
438-408		Silúrico	
505-438		Ordovícico	
570-505		Cámbrico	
2500-570		Proterozoico	
>2500	Arqueozoico		

Escala del Tiempo Geológico

Considerando que la Tierra se formó hace más o menos 4,600 millones de años, el Arqueozoico y el Proterozoico, los cuales juntos comúnmente denominamos Precámbrico, constituyen alrededor del 85% de la edad de la Tierra. Para ilustrar la enormidad del tiempo geológico se puede representar toda la historia geológica reducida a un año calendario, con inicio el 1º de enero y fin el 31 de diciembre. En este esquema, las rocas más antiguas que conocemos en la Tierra se hubieran formado a fines de febrero, la vida más antigua hubiera aparecido en mayo, las rocas más antiguas de México a mediados de agosto, y seres vivientes ocuparían los continentes hacia fines de noviembre. Dinosaurios caminarían en las costas de Michoacán el 16 de diciembre, la Sierra Madre Oriental se levantaría el 26 y los primeros homínidos aparecerían como a las 4:30 horas del 31. La geología moderna, que se desarrolló a partir del concepto del Tiempo Geológico de James Hutton en 1785, habría iniciado faltando dos segundos para la media noche del último día del año (ref. 19).

La Cuenca de México se encuentra rodeada por las Sierras de Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán hacia el Norte, formadas durante el Oligoceno-Plioceno. Durante el Mioceno-Pleistoceno se desarrolla la Sierra de las Cruces al Oeste, y en el Plioceno-Holoceno la Sierra Nevada al Este. Al Sur a fines del Mioceno se producen fracturas orientadas en dirección W-E, en la zona de Puebla y al Sur de Toluca, por las que tuvieron acceso grandes efusiones de basalto que constituyeron la Sierra del Chichinautzin en el Pleistoceno superior (ref. 20).

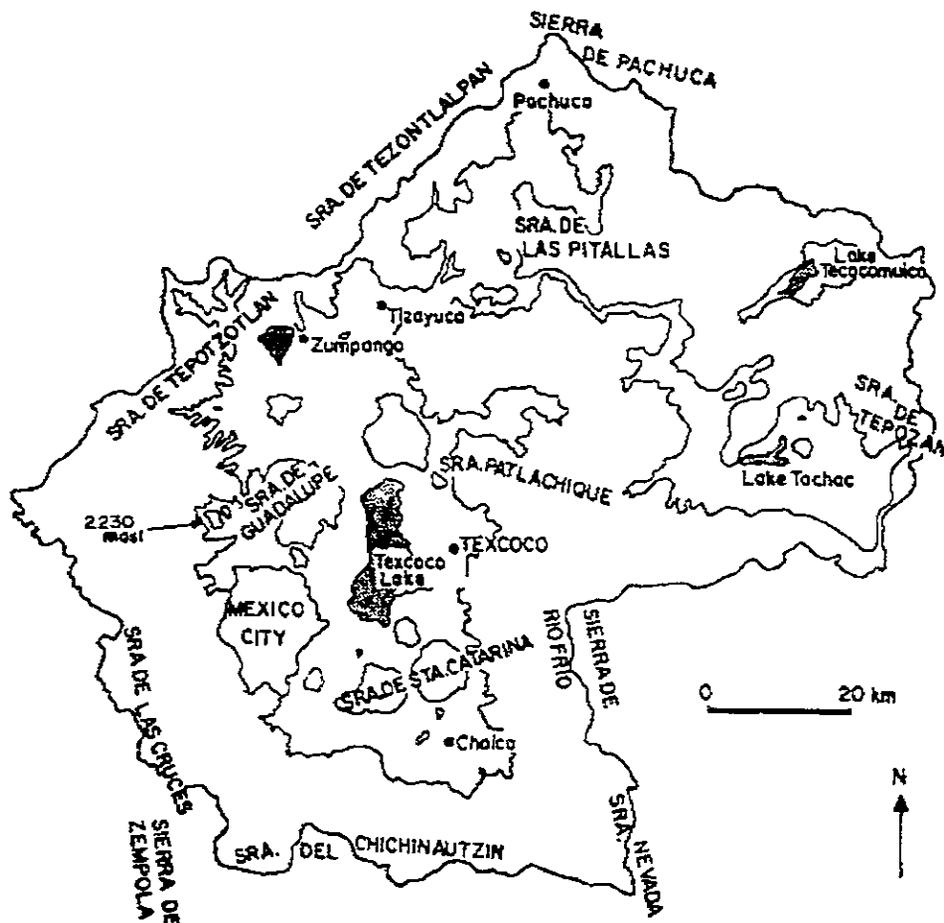


Fig. I.5.1 Desarrollo volcánico de la Cuenca de México (ref. 21)

La cuenca resultante asemeja una enorme presa azolvada: la cortina, situada en el Sur está representada por los basaltos de la Sierra del Chichinautzin, que se extiende desde la Sierra de las Cruces al Oeste, hasta la base del Popocatepetl al Este (fig. I.5.1). Pero antes del cierre de la cuenca, es decir, en el Plioceno según F. Mooser (1978) la Cuenca de México drenaba al Sur, hacia el río Amacuzac (Edo. de Morelos) por dos profundas cañadas (fig. I.5.2), la más grande corría paralelo a la Sierra de las Cruces y pasaba por lo que ahora es Xochimilco hasta llegar a Cuernavaca, mientras que la menor corría paralelo a las faldas de la Sierra Nevada hasta llegar a Cuautla.

Una vez cerrada la cuenca se almacenó agua en varios lagos y los ríos que descendían de las sierras circundantes, depositaron en potentes abanicos aluviales, materiales muy diversos al llegar a dichos lagos. El relleno cuaternario está constituido en su parte superior por arcillas lacustres y en su parte inferior por clásticos derivados de la acción de ríos, arroyos y glaciares (fig. 1.5.4).

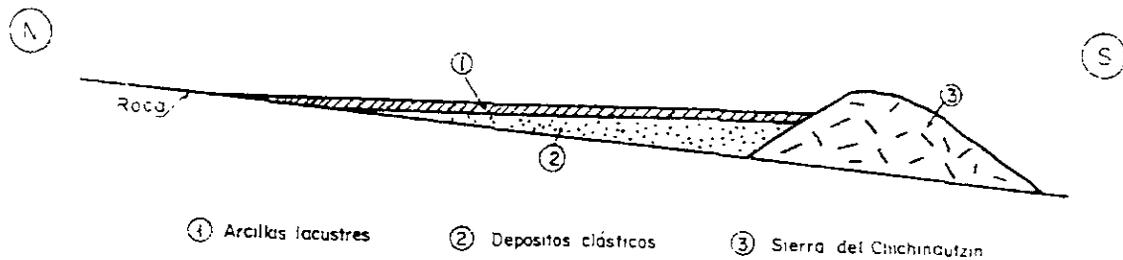


Fig. 1.5.4 Esquema geológico general (ref. 24)

El conjunto de rellenos contiene capas intercaladas de productos piroclásticos en forma de cenizas y estratos de escoria volcánica, producto de las erupciones volcánicas menores y mayores durante el último medio millón de años, o sea, en el Pleistoceno, que es aproximadamente el lapso transcurrido a partir del inicio del cierre de la cuenca. Se reconocen numerosas capas, producto de la intemperización, erosión y sedimentación de los depósitos volcánicos, aluviales y glaciares; estas capas, hoy transformadas en paleosuelos, llevan el sello del clima en el que fueron formados, siendo a veces amarillos, producto de ambientes fríos, y otras veces cafés y hasta rojizos, producto de ambientes moderados a subtropicales.

La Cuenca de México desde su cierre en el Sur por los basaltos de la Sierra del Chichinutzin, ha pasado por dos periodos de glaciación, el Illinois y el Wisconsin y dos interglaciales, el Yarmouth y el Sangamon (ver tabla).

años antes de hoy		
10^4		Holoceno - Reciente
$80-10 \times 10^3$	4a	Glaciación : Wisconsin 3 Avances
$100-80 \times 10^3$	3er	Interglacial Sangamon
$300-100 \times 10^3$	3a	Glaciación : Illinois 2 Avances
$400-600 \times 10^3$	2o	Gran Interglacial: Yarmouth
?	2a	Glaciación: Kansas
?	1er	Interglacial:
$\sim 900 \times 10^3$	1a	Glaciación: Nebraska

Periodos glaciales e interglaciales (ref. 24)

La profunda barranca de la Magdalena, caracterizada por su sección en U, se ha podido identificar como producto de erosión glacial. Representa esta barranca avances del Illinois Tardío, pues sus depósitos morrénicos, los pulimentos y estrías en sus paredes aparecen cubiertos localmente por suelos rojizos arcillosos atribuidos al Tercer Interglacial, o sea, el Sangamon.

Uno de los productos típicos asociados a la existencia de glaciares son los suelos eólicos. Las llamadas brisas del valle y montaña, que se desarrollan hoy en día en la cuenca, deben haberse acentuado extraordinariamente durante los climas glaciales, transformándose en vendavales. Es casi seguro, que estos fuertes vientos acarreaban importantes volúmenes de partículas finas de polvo volcánico a la planicie de la cuenca. Al precipitarse este polvo en el lago se hidrataba fácilmente contribuyendo a la formación de las conocidas arcillas lacustres de la Ciudad de México. Durante las épocas glaciales, antes mencionadas, se manifestó una gran actividad pluvial la cual hizo posible la formación de un solo lago dentro de la cuenca (fig. 1.5.5).

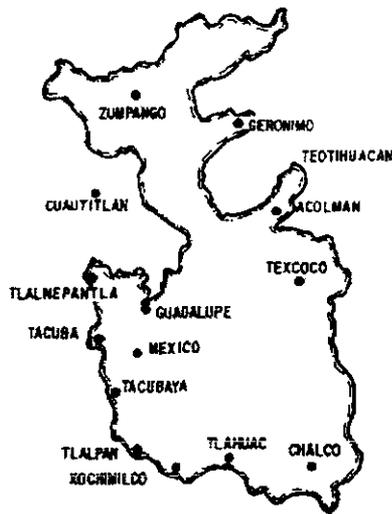


Fig. 1.5.5 Límites aproximados durante la época diluvial (ref. 6)

Relacionados con los períodos glaciales, especialmente a finales de ellos, están los deshielos, por los cuales crecieron arroyos y ríos caudalosos. Los deshielos generaron potentes depósitos aluviales que se reconocen hoy en algunos puntos de transición entre zonas elevadas y de planicie en forma de abanicos aluviales (fig. 1.5.6).



Fig. 1.5.6 Abanicos aluviales (ref. 22)

Se puede afirmar que todo el material contenido en la cuenca es directa o indirectamente de origen volcánico. De origen volcánico directo son, por ejemplo, las lavas del Pedregal de San Ángel originadas en el Xitle, las lavas y productos piroclásticos del escudo-volcán San Miguel cuyo cráter de explosión se localiza a unos cuantos kilómetros del área de estudio. De origen volcánico indirecto son las acumulaciones de polvo eólico.

Algunos conos volcánicos de la Sierras de Santa Catarina y del Chichinautzin (fig. I.5.7) tuvieron actividad hasta épocas muy recientes dejando evidencia en el Sur de la cuenca. Estos conos arrojaron ceniza volcánica y arena en sus explosiones. La arena se encuentra en mayor proporción en las regiones cercanas a estos pequeños volcanes, mientras que la ceniza fue transportada a regiones más lejanas.

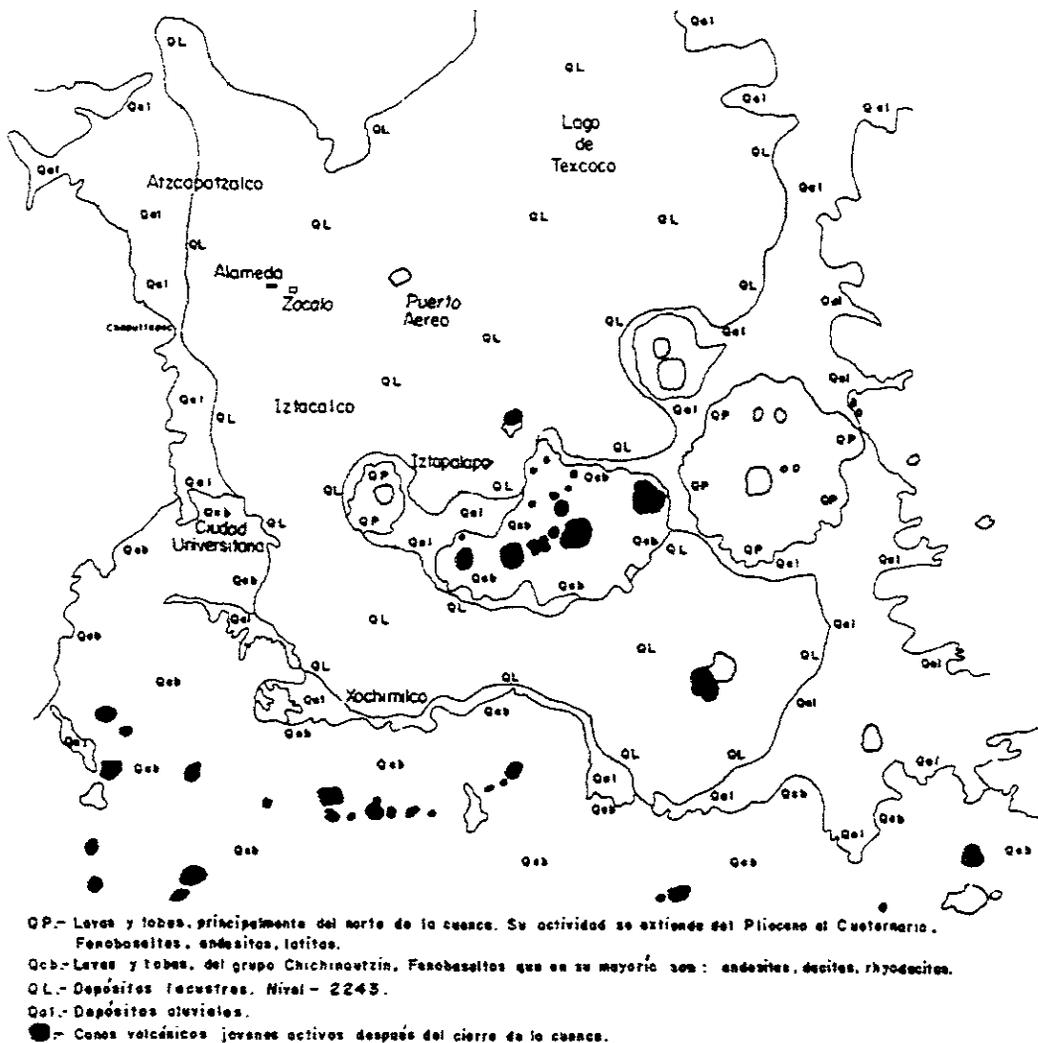


Fig. I.5.7 Croquis de la geología al Sur de la Cuenca (ref. 6)

A continuación se dará una breve descripción de los volcanes y sus productos, que se localizan dentro del área de estudio o que la afectan de manera importante.

La Sierra de Xochitepec, formada en el Plioceno, es parte de lo que se nombra como Sierras Menores, su altura sobre el nivel del mar es de 2500m y está, en gran parte, sepultada por las lavas cuaternarias del Chichinautzin (ref. 25). Aflora al Sureste del área de estudio presentando origen riolítico.

El volcán de San Miguel forma parte de la Sierra de las Cruces, se eleva al Suroeste del área de estudio, estuvo activo desde finales del Plioceno hasta el Pleistoceno, habiendo producido en un lapso de dos a tres millones de años varios kilómetros cúbicos de lavas (principalmente derrames andesíticos), extensos lahares calientes, extensos lahares fríos y gran cantidad de productos piroclásticos de numerosos tipos (ref. 24), que han contribuido a los extensos abanicos volcánicos que se conocen como Zona de Lomas. De sus erupciones más espectaculares, ocurridas en el Pleistoceno Superior, destacan las conocidas arenas azules. Los lahares calientes se generaron con el vapor producido al emplazarse los flujos piroclásticos sobre las superficies glaciales en la cumbre del volcán que descendieron con velocidades extraordinarias, avanzando hasta distancias de 20km del cráter. Los lahares fríos arrastraron extraordinarios bloques de roca en una matriz areno-limosa.

Los abanicos volcánicos (formados en el Pleistoceno) del San Miguel, fueron definidos como Formación Tarango por Bryan 1948, pero este nombre ha sido adoptado por otros investigadores para denominar a otras secuencias piroclásticas del Norte, las cuales no se relacionan genéticamente con los depósitos de la primera Formación Tarango (ref. 26), ocasionando algunas confusiones.

El volcán del Ajusco se formó en el Plioceno superior, esta unidad forma parte del complejo San Miguel-Contreras, que a su vez forma parte de la Sierra de las Cruces, su elevación sobre el nivel del mar es de 3929m. Esta constituido principalmente por andesitas. Del volcán solo resta en nuestros días un promontorio erosionado, su cráter fue enorme y tuvo explosiones que arrojaron a sus faldas grandes cantidades de cenizas y lavas (ref. 27).

El Xitle (fig. I.5.8) o Xitli (palabra náhuatl que significa "ombligo") tiene un diámetro de 250m con forma de embudo, y su cráter de 50m de profundidad está ocupado por grandes cantos desprendidos de sus paredes, su elevación máxima sobre el nivel del mar es 3120m. Todo el volcán está cubierto de vegetación. Se calcula que hizo erupción hace unos 2422 años (ref. 27).



Fig. I.5.8 Cono cinerítico Xitle (ref. 27)

Del cono descendió una serie de coladas de lava basáltica; sus numerosos flujos cubrieron las lomas del volcán Ajusco y avanzaron hasta la planicie lacustre de Tlalpan y San Ángel (fig. I.5.9). A la zona cubierta por lava se le identifica como los pedregales de San Ángel, Santa Ursula y Padierna por citar solo algunos. Sus fluidas lavas cubren 40% del área de estudio.

Muy anteriormente a la erupción del Xitle, en el Illinois avanzaron grandes cuerpos de hielo; estos glaciares fluyeron de la barranca de la Magdalena Contreras hasta las partes bajas de la antigua planicie lacustre, acercándose a lo que hoy es San Ángel. Indicios de morrenas con multitud de bloques grandes se han encontrado en San Ángel así como en Fuentes Brotantes; por consiguiente, debajo de las lavas del Pedregal de San Ángel deben existir importantes acumulaciones de morrenas y secuencias fluvio-glaciales derivadas de su erosión. Por otra parte, también puede asegurarse que antes de que las lavas del Xitle cubrieran el sitio, ya había sido en parte inundado por otras coladas lávicas.

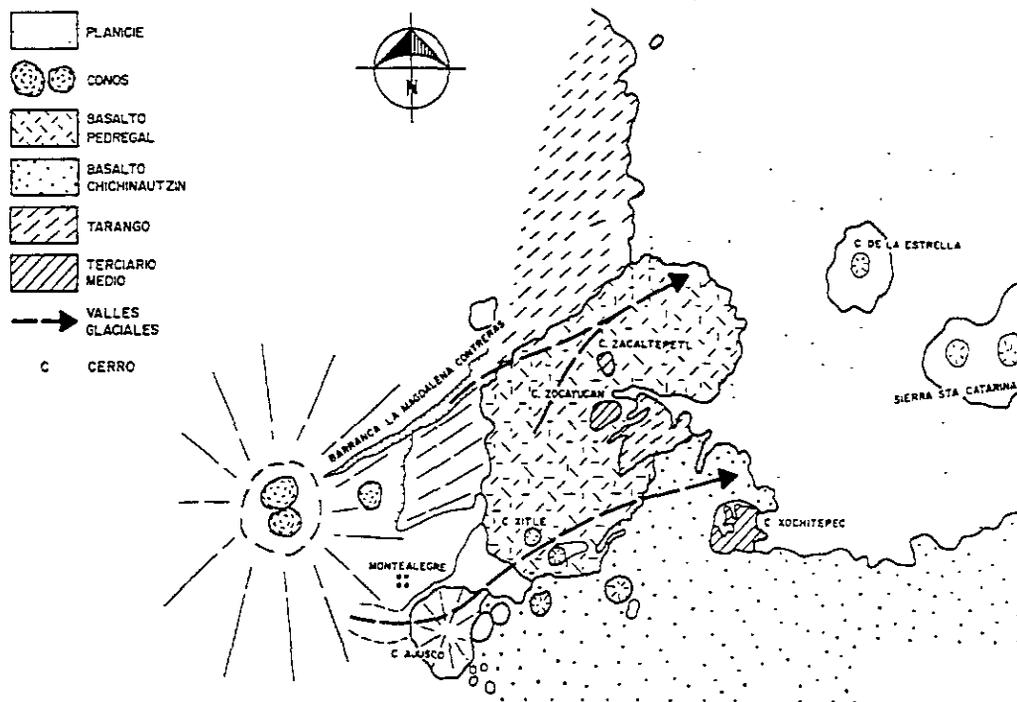


Fig. I.5.9 Geología del Pedregal del Xitle (ref. 28)

Los comentarios sobre geología se salieron de los límites del área de estudio, ya que era difícil dejar de comentar la formación de la cuenca, su cierre y su relleno, para después aislar a los eventos geológicos que formaron el área de estudio. Por esta razón se decidió que dentro de este capítulo se hablara de manera general, de la geología de la cuenca, enfatizando de cierto modo a los eventos del Sur. Mas adelante en el capítulo Evaluación de la información geotécnica disponible, se retoma este tema en donde se delimita con mayor precisión la geología del área de estudio.

1.6 Antecedentes geotécnicos

El área de estudio encierra parte de las tres zonas en que se divide el Distrito Federal (fig. 1.6.1), según el artículo 219 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de agosto de 1993 y sus respectivas Normas Técnicas Complementarias de 1995. Dichas zonas son: Zona I (Lomas), Zona II (Transición) y Zona III (Lago).

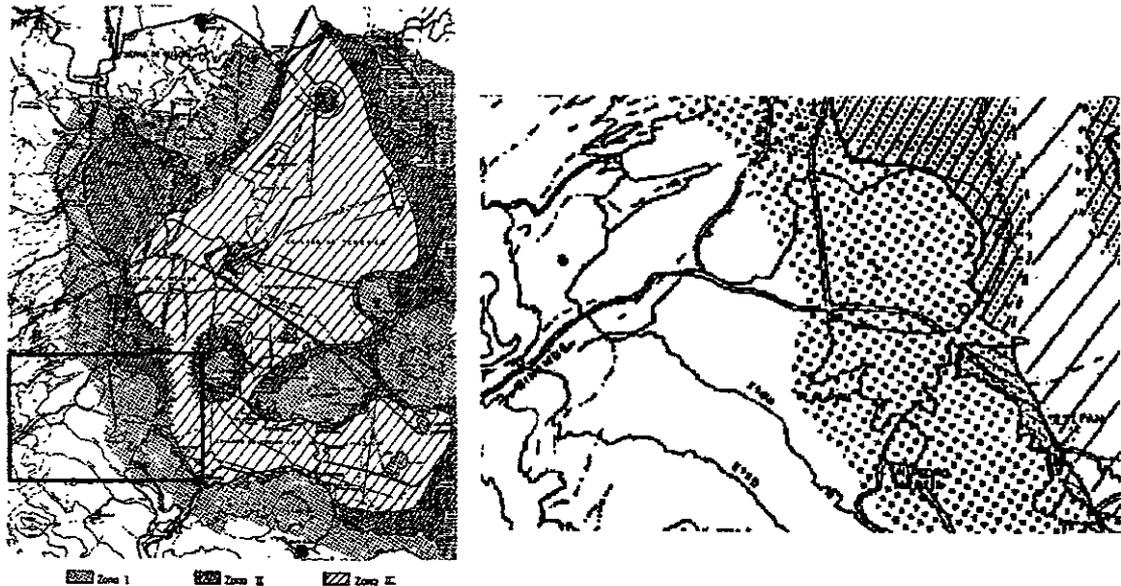


Fig. 1.6.1 Zonificación Geotécnica del área de estudio (NTC, 1995)

Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena;

Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, y

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50m.

La Zona I está representada en el área de estudio, principalmente por el derrame basáltico del Xitle, tobas, arenas, morrenas, abanicos aluviales y volcánicos de la formación Tarango. Esta zona presenta generalmente condiciones favorables para cimentar estructuras, la capacidad de carga del terreno es elevada. Sin embargo pueden existir terrenos afectados por la explotación de minas de arena y grava, lo que trae como consecuencia serios problemas a la ingeniería de cimentaciones.

La Zona I se puede dividir en dos porciones, la cubierta por derrames basálticos y la no cubierta por derrames. Los siguientes cortes y perfiles estratigráficos ejemplifican este hecho.

La figura 1.6.2 muestra un perfil en la Zona I no cubierta por derrames basálticos ubicado en Av. Revolución # 1653.

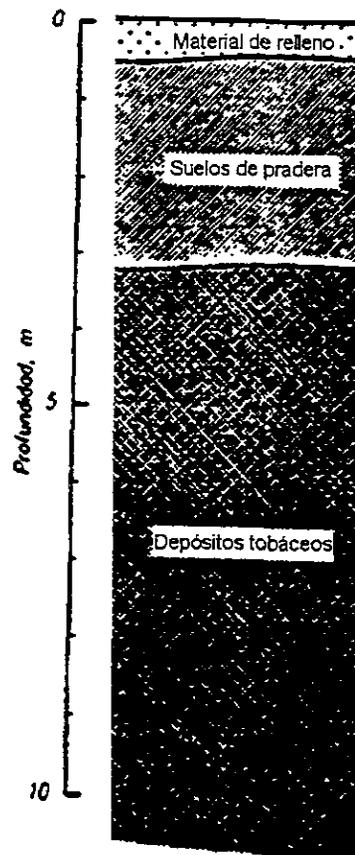


Fig. 1.6.2 Perfil estratigráfico (ACI)

La secuencia estratigráfica de este perfil se define de la siguiente forma:

Material de relleno (de 0.0 a 0.5m). Se trata de un suelo vegetal constituido por arcilla café oscura con poca arena fina, cascajo y abundantes raicillas en estado suelto.

Suelos de pradera (de 0.5 a 3.1m). Producto de la meteorización de los productos de los depósitos clásticos de las lomas, los cuales son transportados y redepositados por las corrientes provenientes del poniente; están compuestos por intercalaciones de arcillas limo-arenosas y estratos delgados de arenas finas arcillosas.

Depósitos tobáceos (de 3.1 hasta la máxima profundidad explorada de 11.6m). Compuestos por arenas finas y medias arcillo-limosas, arcillas limo-arenosas, y lentes de arenas con gravillas pumíticas, todos de origen clástico.

La figura I.6.3 muestra un corte en la Zona I cubierta por derrames basálticos ubicado en la esquina que forman Av. Universidad y Av. Insurgentes.

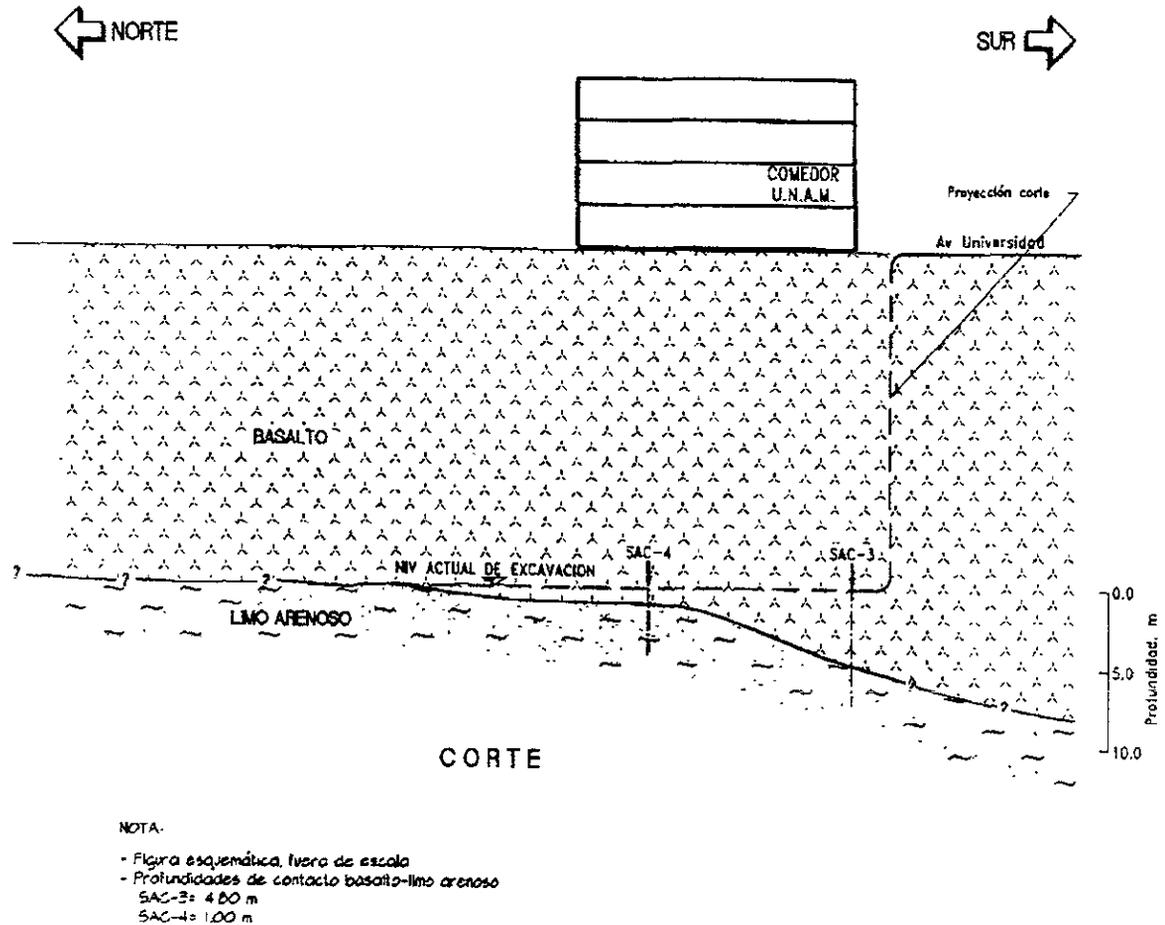


Fig. I.6.3 Corte estratigráfico (ACI)

Este corte da una idea sobre el espesor máximo del basalto en las zonas cubiertas por él, la potencia máxima es aproximadamente 20m, medidos a partir del nivel de banqueta.

En este ejemplo, se encontró limo arenoso debajo del basalto, pero también se suele encontrar arcilla subyaciendo al basalto en ciertas áreas de la ciudad (dentro del área de estudio), como por ejemplo, sobre Periférico entre las calles de Oaxaca y Camino a Santa Teresa (fig. I.6.4).

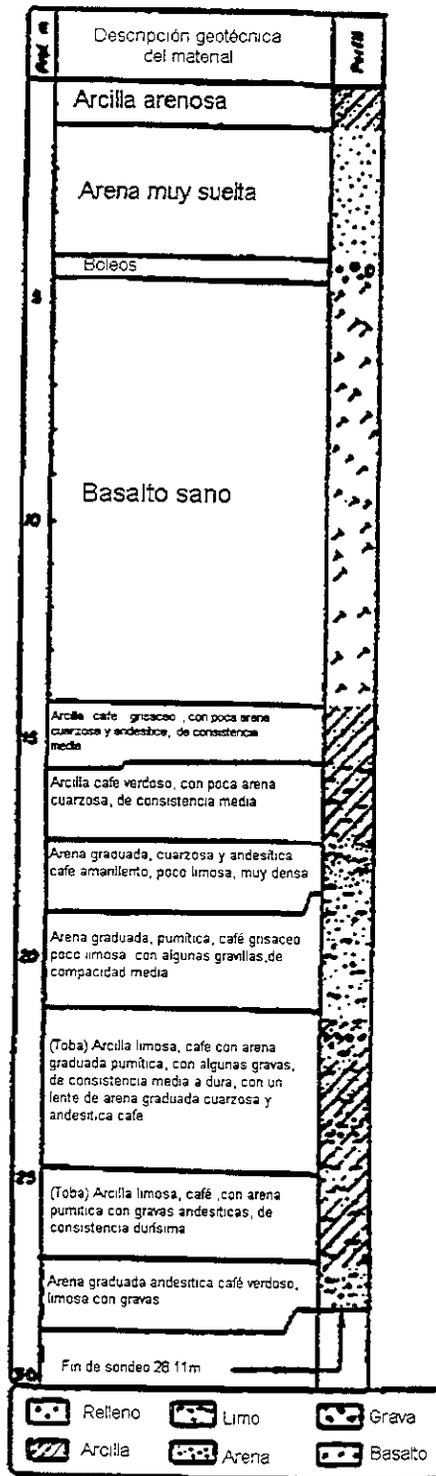


Fig. 1.6.4 Perfil estratigráfico (TGC)

Es fácil identificar por varios motivos que esta arcilla no es de origen lacustre por ejemplo: su bajo contenido de agua ($w = 30\%$), por su ubicación respecto al nivel del lago y por pertenecer a estratos con características de la formación Tarango, es decir, de abanicos volcánicos. Cerca del Cerro de la Estrella, en la esquina superior derecha del área de estudio, se localiza arcilla lacustre sobre basalto pero esta zona según el mapa de zonificación vigente pertenece a la Zona II, ya que los estratos de arcilla llegan a medir menos de 20m.

En otras zonas del área de estudio (Insurgentes Sur 3697) se encuentran potentes estratos de toba sobre basalto (fig. I.6.5).

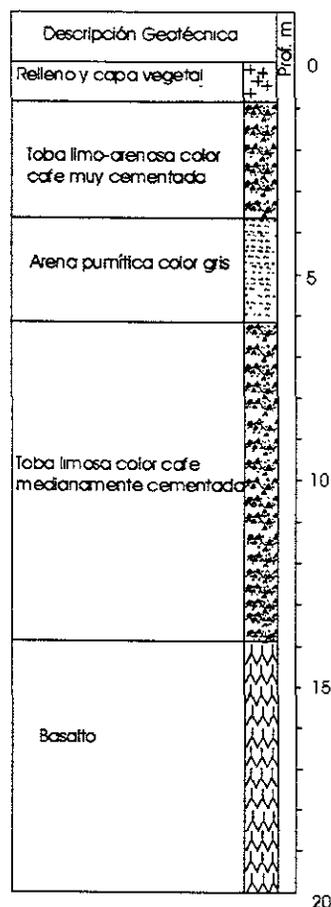


Fig. I.6.5 Perfil estratigráfico (ACI)

Los cortes y perfiles estratigráficos anteriores, muestran que la llamada Zona I está formada por una gran variedad de materiales volcánicos. Materiales como arena, grava y pumita han sido explotados para obtener materiales de construcción. El manejo irracional de este recurso constituye un peligro, ya que las minas producto de la explotación, no son identificables desde la superficie. Por mas de sesenta años estuvo vigente el Reglamento para los Trabajos de Exploración y Explotación de Yacimientos de Arena, Cantera de Tepetate y Piedra, en el Distrito Federal (ref. 29), el cual permitía la explotación subterránea y no limitaba el volumen de material a explotar, lo que produjo grandes laberintos en el subsuelo que, como ya se menciona antes, no son identificables superficialmente. Las NTC vigentes establecen que el reconocimiento del subsuelo para la porción de la Zona I, no cubierta por derrames basálticos, iniciará con un reconocimiento detallado del lugar donde se localice el predio, así como de las barrancas, cañadas o cortes cercanos al mismo, para investigar la existencia de bocas de antiguas minas o de capas de arena, grava y materiales pumíticos que hubieran podido ser objeto de explotación subterránea en el pasado. El reconocimiento deberá complementarse con los datos que proporcionen habitantes del lugar y la observación del comportamiento del terreno y de las construcciones existentes, así como el análisis de fotografías aéreas antiguas. Las fotografías aéreas antiguas son una buena herramienta para la detección de

minas ya que se pueden identificar los accesos a las minas, y los caminos que fueron construidos por la misma gente que se dedicaba a la explotación, las fotografías son económicas, pero el problema es tener acceso a un estereoscopio, con el cual se puede visualizar a las fotografías en tercera dimensión y de esa forma localizar lo deseado, cabe señalar que las personas con bastante experiencia en interpretar fotografías aéreas pueden llegar a omitir el uso del estereoscopio para dar una interpretación preliminar. Las mismas NTC indican que la detección de rellenos sueltos, galerías de minas, grietas y otras oquedades, debe ser por métodos directos y eventualmente indirectos.

La Zona II está representada en el área de estudio por depósitos aluviales, depósitos lacustres y basalto. Los depósitos de transición forman una franja que divide los suelos lacustres de los suelos de las lomas, mencionados anteriormente para la Zona I, y de los aparatos volcánicos que sobresalen en la zona del lago (fig. I.6.6) que para el área de estudio sería el Cerro de la Estrella.

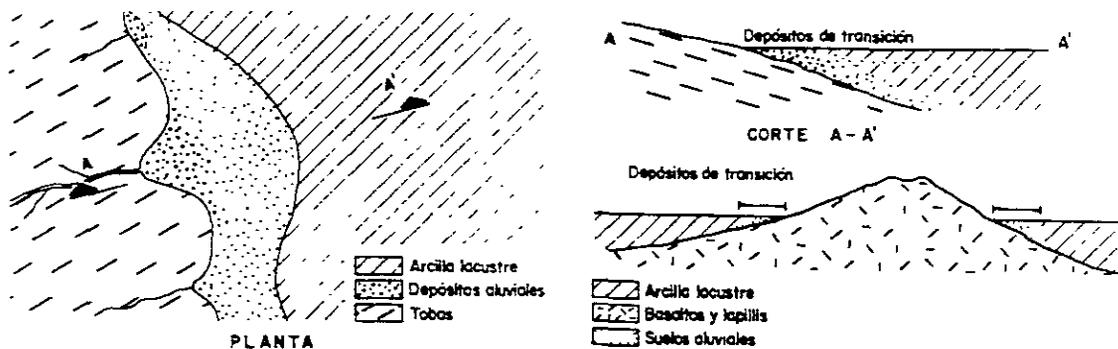
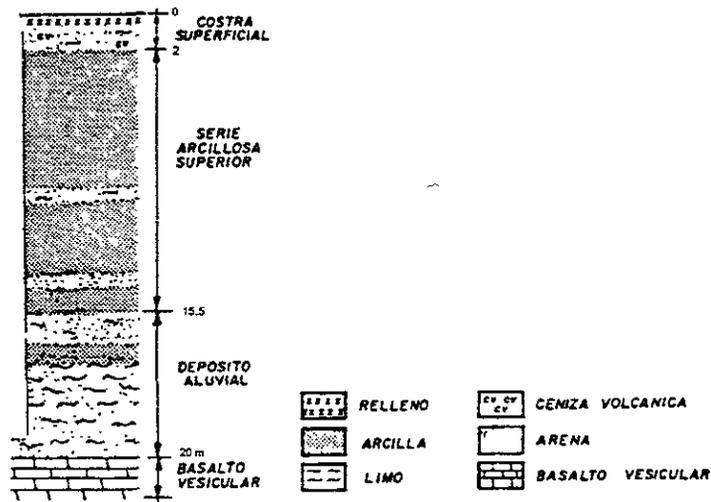


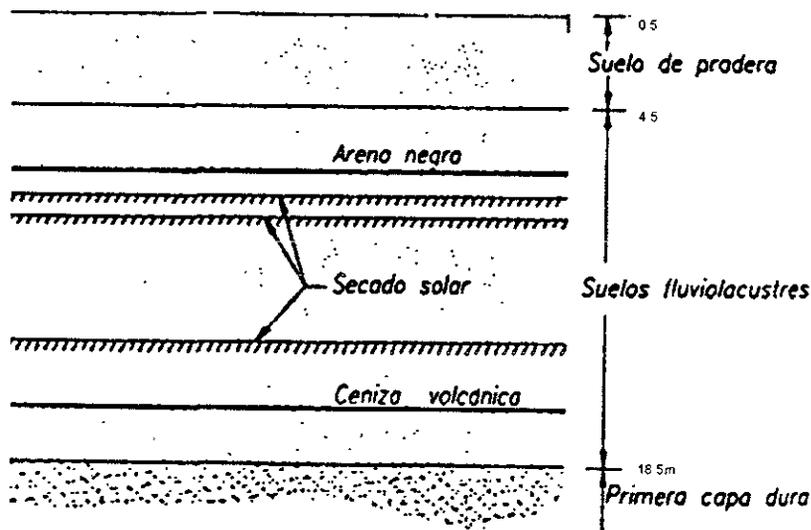
Fig. I.6.6 Depósitos de transición (ref. 24)

En el área de estudio se tiene transición interestratificada que presenta regiones en que las fases aluvial y lacustre, se suceden en forma alternada, dando lugar a la intercalación de mantos blandos arcillosos con otros de matriz granular contaminados por finos, generalmente más duros y más resistentes. Su formación se debe a las condiciones climáticas que propiciaban las transgresiones y regresiones del lago formado en la cuenca, el lago subsistía durante las épocas de sequía en las partes centrales de la cuenca, continuando la formación de arcillas mientras que en las partes marginales ocurría lo contrario, donde entre las arcillas lacustres se intercalaban los suelos aluviales.

También se presenta el caso de arcilla lacustre sobre basalto (fig. I.6.7) en la zona de transición correspondiente al Cerro de la Estrella.



A continuación se muestra un perfil estratigráfico (fig. I.6.8) para ejemplificar la transición interestratificada ubicado en Miguel Ángel de Quevedo casi esquina con División del Norte.



La secuencia estratigráfica de este perfil se define de la siguiente forma:

Suelos de pradera: Arenas finas limosas intercaladas con arcillas arenosas orgánicas.

Suelos fluviolacustres: Capas de arena fina con gravillas aisladas, alteradas con suelos arcillo-limosos.

Primera capa dura: Depósitos limo arenosos.

La Zona II puede ser dividida en subzonas, en función de la cercanía a las lomas y sobre todo del espesor de suelos relativamente blandos; se identifican así las transiciones alta y baja (ref. 24).

La transición alta es la zona más próxima a las lomas, presenta irregularidades producto de los depósitos aluviales cruzados, bajo estos materiales se encuentran estratos arcillosos que sobreyacen a los depósitos propios de las lomas (fig. I.6.9).

La transición baja corresponde a la zona vecina del lago; aquí se encuentra la serie arcillosa superior con intercalaciones de estratos limoarenosos de origen aluvial, que se depositaron durante las regresiones del antiguo lago. La figura I.6.8 sirve como ejemplo de transición baja.

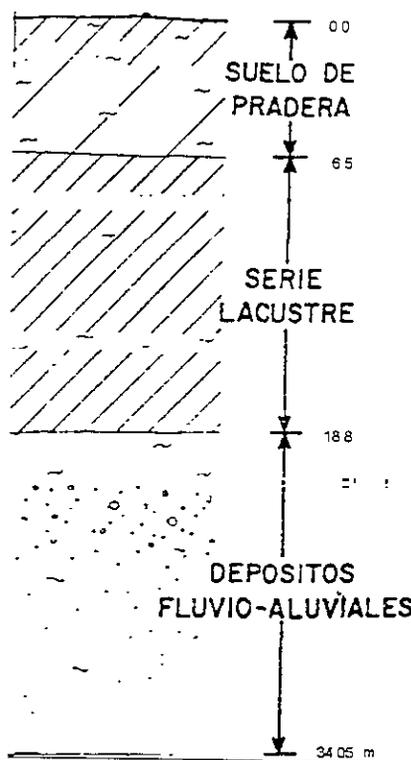


Fig. I.6.9 Perfil estratigráfico (TGC)
(Av. División del Norte # 3267)

La secuencia estratigráfica de este perfil se define de la siguiente forma:

Suelos de pradera.- Arenas finas y limos de origen aluvial.

Serie lacustre.- Arcillas blandas, el estrato se encuentra interrumpido por arenas aluviales.

Depósitos fluvio-aluviales.- Suelos granulares de tamaño variable desde limos hasta gravillas.

Los ejemplos anteriores muestran que en la Zona II, las condiciones estratigráficas del subsuelo varían en forma extraordinaria de un punto a otro, por lo que se dificulta la elección anticipada del tipo de exploración requerida.

Las NTC recomiendan utilizar sondeos de recuperación continua de muestras alteradas mediante la herramienta de penetración estándar para evaluar la consistencia o compacidad de los materiales de los estratos resistentes de esta zona, así como para elaborar un perfil continuo de contenido de agua de las arcillas blandas que se encuentren. Establece que las propiedades mecánicas serán determinadas a partir de muestras inalteradas que pueden ser obtenidas por sondeo mixto con recuperación alternada de muestras inalteradas y alteradas. Para el caso de obtención de muestras en las capas duras recomienda utilizar sondeos con equipo rotatorio y muestreadores de barril.

La Zona III está representada en el área de estudio por arcillas, limos, arenas y ceniza volcánica. Al hablar de la Zona III, que es la zona lacustre, se piensa de inmediato en los cinco estratos principales que define a un sondeo típico de la zona, nombrados por Raúl J. Marsal y Marcos Mazari como: manto superficial, manto arcilloso superior, capa dura, formación arcillosa inferior y depósitos profundos. Pero se debe tener en cuenta que esta división del subsuelo fue elaborada con información de la zona Centro y Oriente de la ciudad, es decir para los depósitos lacustres que se formaron en los lagos de la Ciudad de México y parte del de Texcoco. Los depósitos lacustres del área de estudio son productos del lago de Xochimilco y de la frontera entre este y el de la Ciudad de México, y su estratigrafía se ve afectada por la reciente actividad de pequeños conos volcánicos del Sur.

Esta frontera se ubica de manera aproximada entre la avenida río Churubusco a continuación con la Calzada Ermita Ixtapalapa al Norte y la Calzada de las Bombas junto con la Calzada México – Tulyehualco (Av. Tláhuac) al Sur (ref. 6). Es importante señalar que esta zona de transición entre lagos considerada como Zona III, era zonificada como Zona II en el plano de zonificación elaborado por J.J. Schmitter en 1968, de hecho en las presentes normas las líneas que dividen a la Zona III de la Zona II son punteadas indicando cierta incertidumbre.

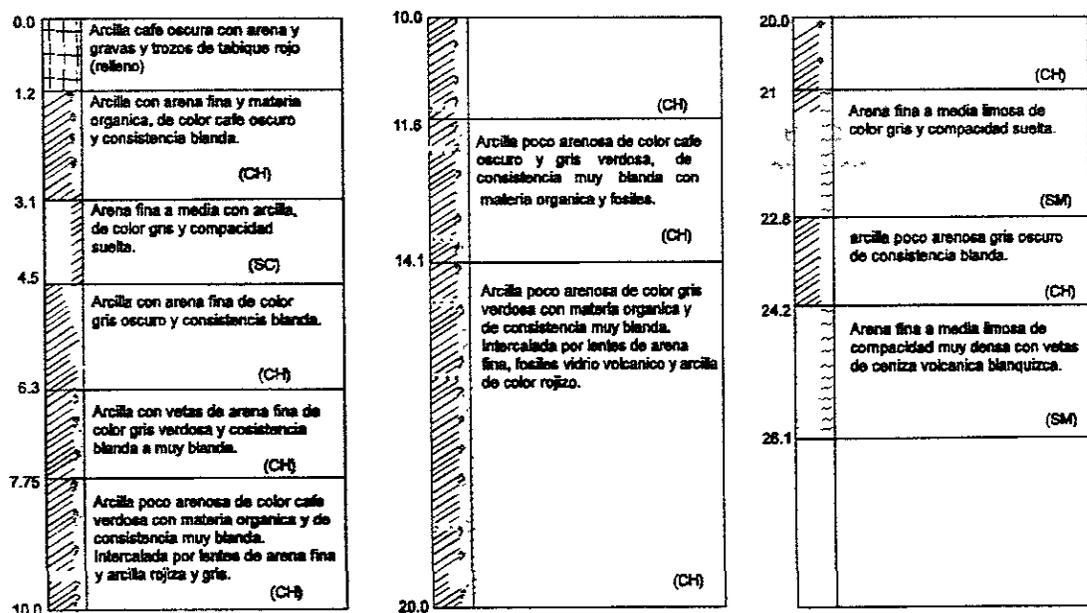


Fig. I.6.10 Perfil estratigráfico (Ingenieros Especialistas en Cimentaciones)

El perfil estratigráfico de la figura I.6.10 se ubica en la esquina de Paseo de los Cipreses y Paseo de los Encinos, colonia Paseos de Taxqueña, el perfil se encuentra dentro de la transición de los lagos, presenta arcilla con un contenido medio de agua de 300% en general, que es un valor común en la arcilla de la zona centro, pero presenta la característica de estar contaminada por arena, en la zona centro se presenta arena, pero por lo general, en forma de lentes. El origen de esta arena puede ser la actividad de los conos volcánicos de la Sierra de Santa Catarina.

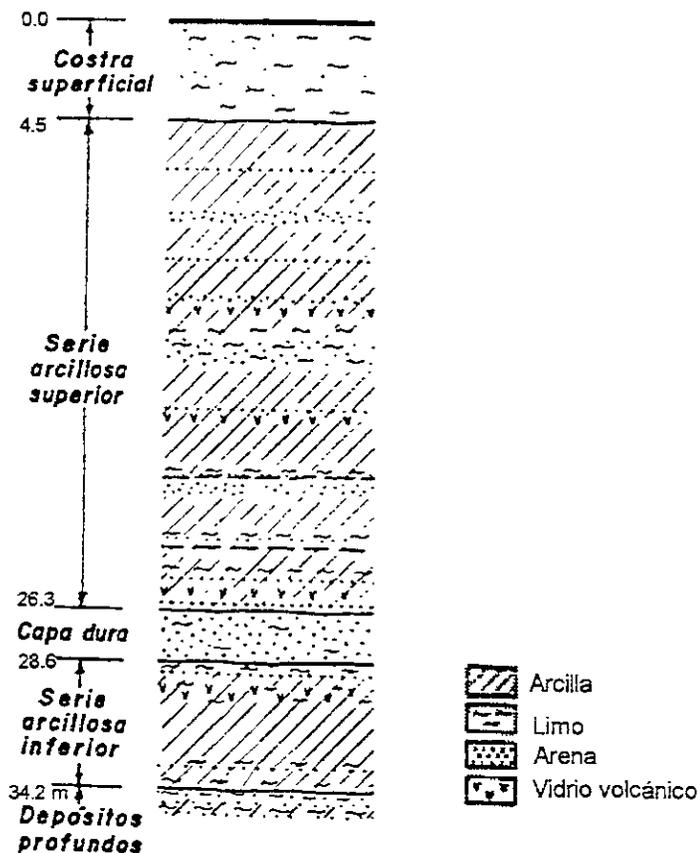


Fig. I.6.11 Perfil estratigráfico (TGC)

El perfil estratigráfico de la figura I.6.11 se ubica en la Calz. Acoxpa entre Av. Canal de Miramontes y Periférico, el perfil se encuentra en la zona del ex-lago de Xochimilco. Se puede notar que en la serie arcillosa superior existe gran cantidad de estratos y lentes de arena, limo y vidrio volcánico, lo cual es característico para el subsuelo del ex-lago de Xochimilco.

La secuencia estratigráfica de este perfil se define de la siguiente forma:

Costra superficial.- Compuesta por rellenos, limo arcillosos y arenosos intercalados con estratos de arena, además de inclusiones de materia orgánica.

Serie arcillosa superior.- Son arcillas de alta compresibilidad con intercalaciones de vidrio volcánico, lentes de limo y arena limosa. Se encuentran estratos limoarenosos a 8.5 y 14m de profundidad, de espesor entre 0.5 y 1.0m, entre 20.3 y 23.6m destaca la fuerte intercalación de estratos de limo, arena y arcilla.

Capa dura.- Son depósitos limoarenosos fluviolacustres y producto del secado solar.

Serie arcillosa inferior.- Constituidos por arcillas limosas preconsolidadas por bombeo profundo, con inclusiones de vetas de arena e intercaladas con lentes de vidrio volcánico, entre 32.2 y 33.5m, se encuentra un estrato de limos arcillosos con intercalaciones de arena de alta compacidad.

Depósitos profundos.- Constituidos por series de limos arcillosos y lentes de arena limpia y cementada.

Los dos perfiles anteriores ejemplifican la estratigrafía que puede ser encontrada en la zona lacustre del área de estudio. Esta zona lacustre es característica de la subzona Lago Centro I que definió COVITUR (ref. 24) como el sector no colonial de la ciudad, que se desarrolló a partir de principios de este siglo y ha estado sujeto a las sobrecargas generadas por construcciones pequeñas y medianas. Es importante señalar que la división de la zona lacustre en subzonas ya era contemplada desde el primer trabajo de zonificación presentado en 1952, como se puede leer en los antecedentes de esta tesis.

Debido a la diferente formación del extinto lago de la Ciudad de México y el de Xochimilco, la arcilla formada en cada uno de ellos presenta propiedades distintas. Tal vez la más significativa de ellas sea el contenido de agua que, por lo general, en las arcillas del lago de Xochimilco es menor que en las arcillas de la Ciudad de México. Las correlaciones existentes para la estimación de valores medios de la resistencia al corte y compresibilidad en base al contenido de agua no son aplicables para las arcillas de este lago, ya que dichas correlaciones fueron hechas con información experimental de las arcillas del lago de México.

Las NTC recomiendan utilizar sondeos de recuperación continua de muestras alteradas mediante la herramienta de penetración estándar para evaluar la consistencia o compacidad de los materiales de los estratos resistentes de esta zona, así como para elaborar un perfil continuo de contenido de agua de las arcillas blandas que se encuentren. Establecen que las propiedades mecánicas serán determinadas a partir de muestras inalteradas, que pueden ser obtenidas por sondeo mixto con recuperación alternada de muestras inalteradas y alteradas. Para el caso de obtención de muestras en las capas duras, recomienda utilizar sondeos con equipo rotatorio y muestreadores de barril.

II Problemas geotécnicos

Los primeros tres puntos de este capítulo se enfocan a la zona cubierta por las lavas del Xitle, que abarcan gran parte del área de estudio.

II.1 Discontinuidades

Las discontinuidades que se presentan en la zona, son producto de las características de suelo antes de la colada, del tipo de lava y de la topografía del terreno previa a la erupción. El Xitle forma parte del vulcanismo monogenético de la cuenca, las erupciones volcánicas, como éstas pueden durar del orden de días, semanas e inclusive años, y una vez que cesan no vuelven a tener actividad, la actividad del Xitle fue esencialmente efusiva y su lava fluida formó una gran meseta basáltica.

Las discontinuidades que más frecuentemente se presentan en la zona son:

Contactos brechoides. El contacto entre dos coladas de lava no es continuo, ya que al estar frío el sustrato por donde fluye la lava, ésta se enfría bruscamente, generándose una brecha en el contacto. El enfriamiento provoca la formación de cavidades, debido a los gases que no pueden emerger a la superficie, también se genera apariencia escoriácea, debido a los gases que si logran escapar a la superficie de contacto.

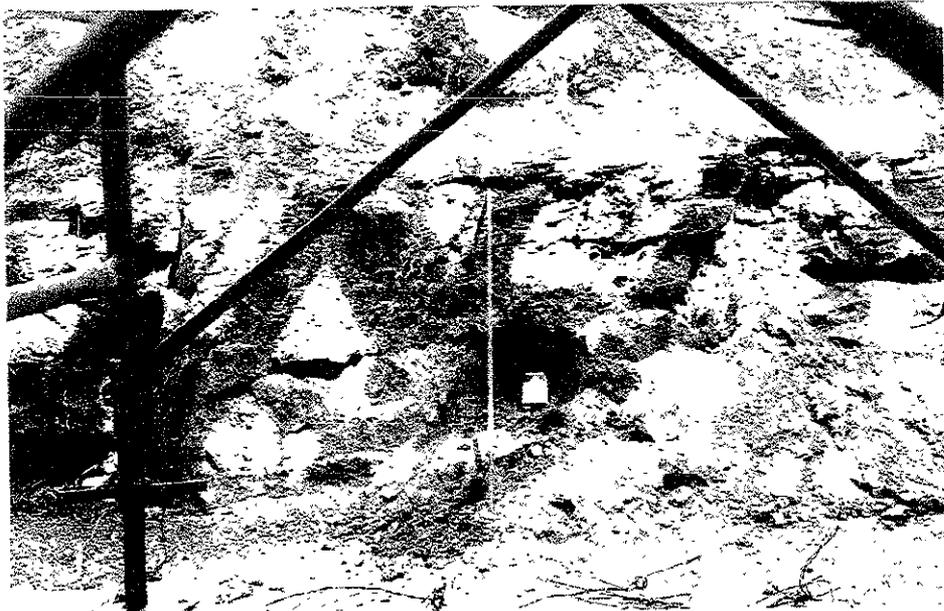


Fig. II.1.1 Discontinuidad entre dos coladas de lava

En la figura II.1.1, se presenta una discontinuidad en el contacto de dos coladas de lava, no se aprecia la apariencia escoriácea, comentada antes, pero es muy claro el plano inclinado de discontinuidad que cruza de extremo a extremo la figura.

En la figura II.1.2, se observa un contacto brechoide con el cual se puede identificar las distintas coladas de lava. Presenta apariencia escoriácea, en el contacto y se distinguen burbujas debidas al gas que no logro escapar.



Fig. II.1.2 Contacto brechoide

En la figura II.1.3, se pueden apreciar los contactos entre diferentes coladas de lava, lo que prueba lo irregular del movimiento de estos flujos de lava.



Fig. II.1.3 Contactos entre distintas coladas

Vesículas. La formación de las vesículas se debe a que gases, constituidos por vapor de agua y CO_2 , se desprenden al enfriarse la lava, quedando atrapados en la masa de roca.

La forma y número de las cavidades quedan definidos por las diferencias de presiones entre la lava y el interior de la burbuja en el momento de la solidificación, así como por la velocidad del mismo proceso (fig. II.1.4).

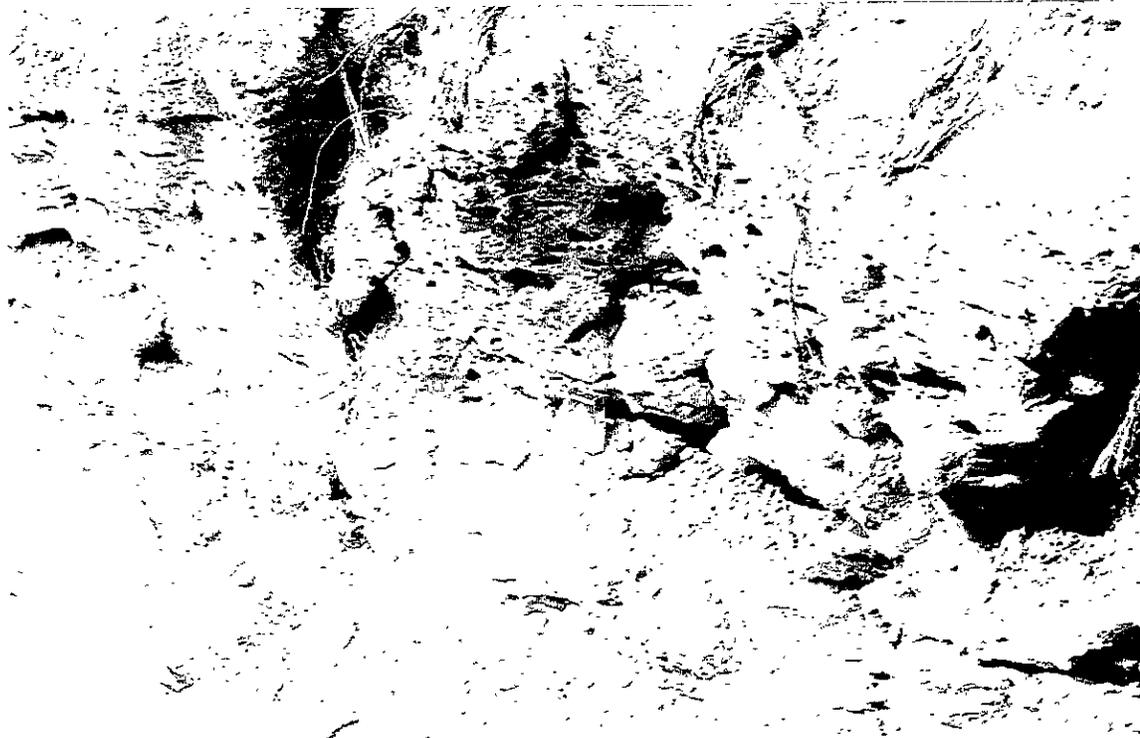


Fig. II.1.4 Basalto vesicular (Posgrado Ingeniería C.U.)

En algunos derrames del Xitle se puede diferenciar tres zonas de vesículas denominadas Zona Inferior, Zona Intermedia y Zona Superior (ref. 30).

Zona Inferior. Caracterizada por vesículas alargadas de 0.5 a 2.0cm que se presentan inclinadas hacia la dirección de flujo de la lava y otras escasas de mayor longitud. Esta zona vesicular inferior, se formó debido a que al fluir la lava sobre una superficie húmeda o ligeramente húmeda, formó gases que trataron de salir verticalmente a la superficie, pero como la lava llevaba escasa velocidad, hizo que estas burbujas tomaran cierta inclinación en el sentido del flujo.

Zona intermedia.- Caracterizada por tener mayor espesor que las otras dos zonas y escasas vesículas distribuidas irregularmente, la mayoría muy pequeñas y de forma esférica. La escasez relativa de vesículas en esta zona se debe a que este flujo tardó más en solidificar; razón por la cual casi todos sus gases emigraron hacia la parte superior del derrame. La esfericidad de las escasas vesículas nos indica que la lava se movía muy lentamente o se hallaba inmóvil en el momento de la solidificación.

Zona Superior.- Se caracteriza por tener vesículas más abundantes, notándose que en la base las vesículas presentan una distribución más regular y un alargamiento, inclinándose en la dirección del flujo; el tamaño y la abundancia aumenta hacia arriba. En esta última zona hay mayor concentración de vesículas, porque los gases formados en la parte inferior de este flujo, debido a su baja densidad y temperatura, trataron de salir y emigraron acumulándose en la parte superior.

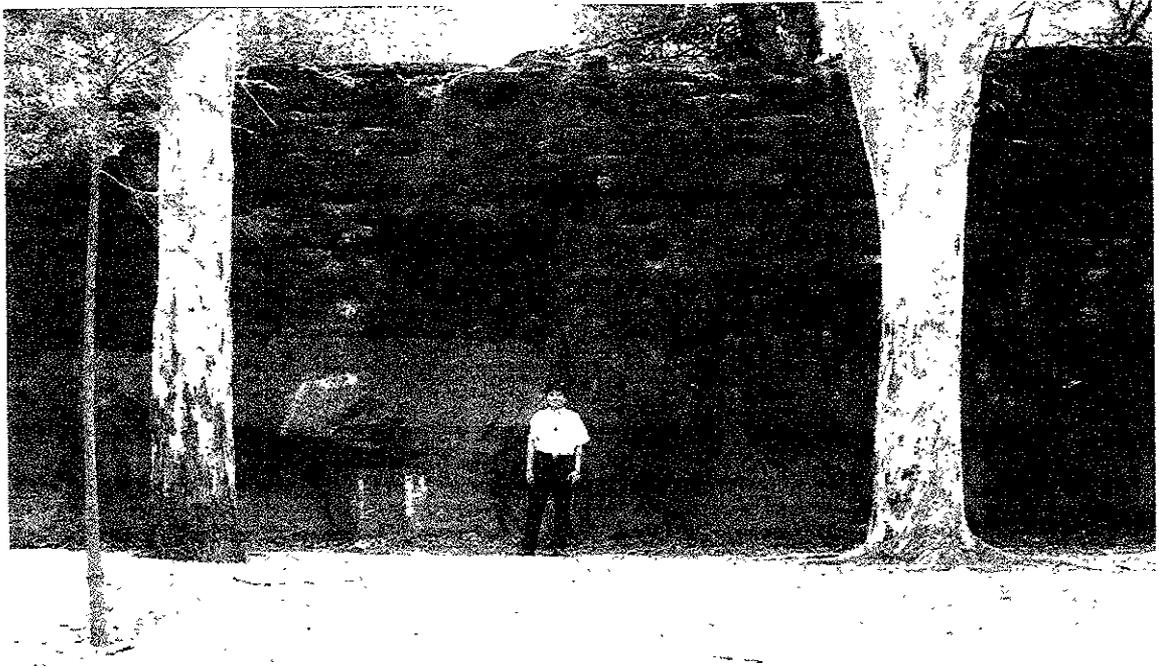


Fig. II.1.5 Zonas de vesículas (Ciudad Universitaria)

En la figura II.1.5 se puede observar las zonas intermedia y superior, explicadas antes. La figura II.1.4 sirve también como ejemplo para la zona superior.

Es muy importante señalar que las tres zonas definidas anteriormente, no son una característica que se pueda generalizar para todas las lavas del Xitle, y de ninguna forma para otro volcán. Esta característica fue encontrada en las Canteras de Copilco, Cerro de la Escondida, Puente de Piedra y Ampliación Isidro Fabela. De hecho en la fotografía de la figura II.1.5, tal vez no se encuentre la zona inferior subyaciendo a las otras dos zonas que se pueden visualizar, del mismo modo para la fotografía de la figura II.1.4 tal vez no existan las zonas intermedia e inferior.

Se pudiera dar la situación de encontrar basalto con pocas vesículas en la superficie y encontrar a unos cuantos metros de profundidad basalto con alto contenido de vesículas, todo depende de la cantidad de gases disueltos que contengan las coladas de lava, con esto se enfatiza la gran importancia de los trabajos de exploración y muestreo.

Cavernas. En las coladas basálticas, se puede formar en su superficie y en sus márgenes una costra sólida debido a la rapidez del enfriamiento de la lava. Cuando la costra forma un arco, se genera un túnel por el cual la lava continúa fluyendo hacia niveles inferiores. Al terminar la erupción, muchos de estos túneles quedarán vacíos de lava transformándose en largas cavernas.

También puede ocurrir que se formen bolsas de gases de dimensiones nada despreciables debajo de la costra superficial.

En muchos casos, el techo de estas bolsas y túneles se colapsa, dejando una depresión en el terreno (ref. 31).

Fracturas. Varios son los mecanismos que originan a las fracturas, por ejemplo:

El fracturamiento por esfuerzos de tensión (fig. II.1.6), que se generan cuando la lava cambia de volumen al solidificarse; generalmente estas fracturas no tienen un patrón regular, o sea el espaciamiento, apertura, intensidad y densidad no tienen valores constantes, aunque en ocasiones pueden tomar formas regulares como basaltos columnares que en superficie son hexagonales.



Fig. II.1.6 Fracturas por enfriamiento

El fracturamiento de túneles al aumentar la presión de la lava en su interior.

II.2 Cavernas

Las cavernas son las discontinuidades más peligrosas que se pueden encontrar en los basaltos, ya que representan un riesgo para la cimentación de estructuras (fig. II.2.1), el arco que define a las cavernas puede fallar con un pequeño incremento en la carga que soporta ya que su capacidad de carga por lo general es muy baja (ref. 31).

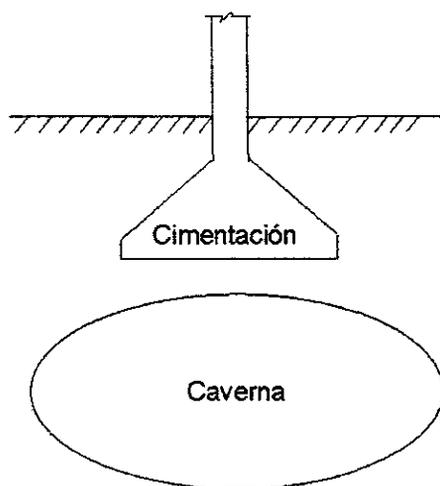


Fig. II.2.1 Caverna bajo cimentación

El riesgo que implica la falla de cavernas para las construcciones que sobre ellas se proyecta construir, hace necesaria la exploración meticulosa del área de cimentación para determinar si las hay o no. No se debe confiar en las características de una colada superficial, ya que puede ocurrir que en coladas subyacentes existan cavernas cuyos arcos estén próximos a su capacidad última.

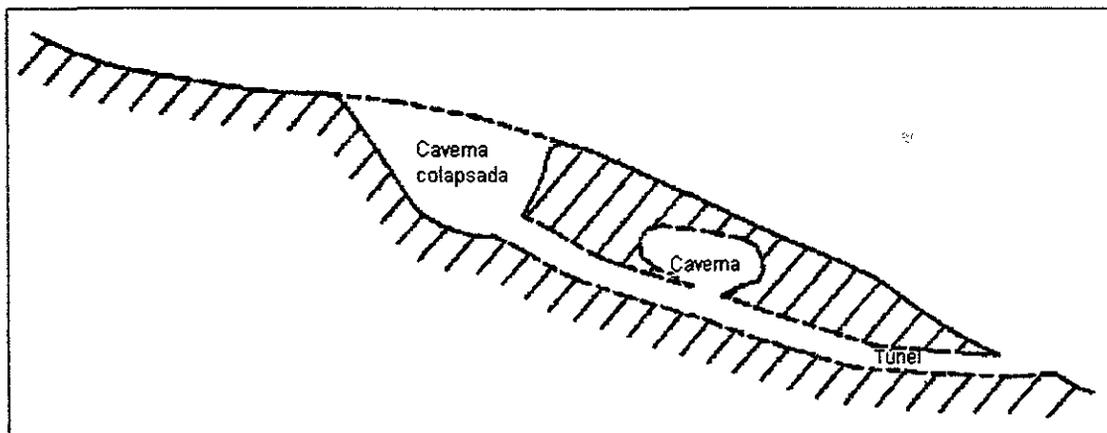


Fig. II.2.2 Túneles y cavernas en roca

Se puede inferir la localización de cavernas al encontrar las salidas de los túneles o cavernas colapsadas (fig. II.2.2), y con bastante experiencia con la ayuda de la topografía del terreno y sus alrededores. También se puede localizar una caverna al inspeccionar la colada superficial, sin la necesidad de tener gran experiencia en ello, se trata de encontrar lava pahoehoe sobre la superficie (fig. II.2.3), esta lava

tuvo la característica en su momento de ser bastante fluida y al enfriarse su parte superior forma una costra superficial, pero en su interior puede formarse un río de lava ardiente, quedando vacío al final del evento volcánico, está no es una regla general pero es un buen indicador de la existencia de cavernas o túneles desde la superficie.



Fig. II.2.3 Lava pahoehoe (Ciudad Universitaria)

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus NTC descuidan un poco el tema, referente a cimentaciones sobre roca, ya que los asentamientos no suelen ser una limitación para el diseño, dada la baja deformabilidad de las rocas. La resistencia al esfuerzo cortante de la roca sana tampoco es condición crítica, pero los problemas que se tienen que resolver en el diseño de una cimentación en roca, provienen de las discontinuidades que existan en el terreno, ya que estas determinaran la capacidad de carga admisible y por ende, el tipo de cimentación a construir.

Las NTC especifican que, en las zonas de derrames basálticos se debe buscar evidencias de oquedades subterráneas de grandes dimensiones dentro de la lava y que los procedimientos para localizar oquedades deberán ser directos, acepta el uso de sondeos de percusión o con equipo tricónico para descubrir las oquedades. Establece que los métodos indirectos solamente se emplearán como apoyo de las investigaciones directas.

De acuerdo con las NTC, en caso de que se compruebe la existencia de galerías, grietas, cavernas u otras oquedades, éstas se considerarán en el cálculo de capacidad de carga. En su caso, deberán mejorarse las condiciones de estabilidad adaptándose una o varias de las siguientes medidas:

Tratamiento por medio de rellenos compactados, inyecciones, etc.

Demolición o refuerzo de bóvedas.

Desplante bajo el piso de las cavidades.

De hecho, el uso de un factor de resistencia bajo (0.35) para esta zona (Zona I) en las ecuaciones de capacidad de carga de las NTC, se debe a la presencia de las anomalías locales comentadas con anterioridad (ref. 11).

De los métodos directos permitidos por las NTC para determinar oquedades, el más eficiente para trabajar en basalto es el uso de martillo neumático (fig. II.2.4), valuando mediante una supervisión cuidadosa, la velocidad de avance de la broca, la intensidad del ruido que produce, la coloración del material que está cortando y los caídos que ocurren de la tubería de perforación (ref. 24). La acción del martillo se hace con aire, por lo general a una presión de 5kg/cm^2 y velocidades de rotación de 45r.p.m.

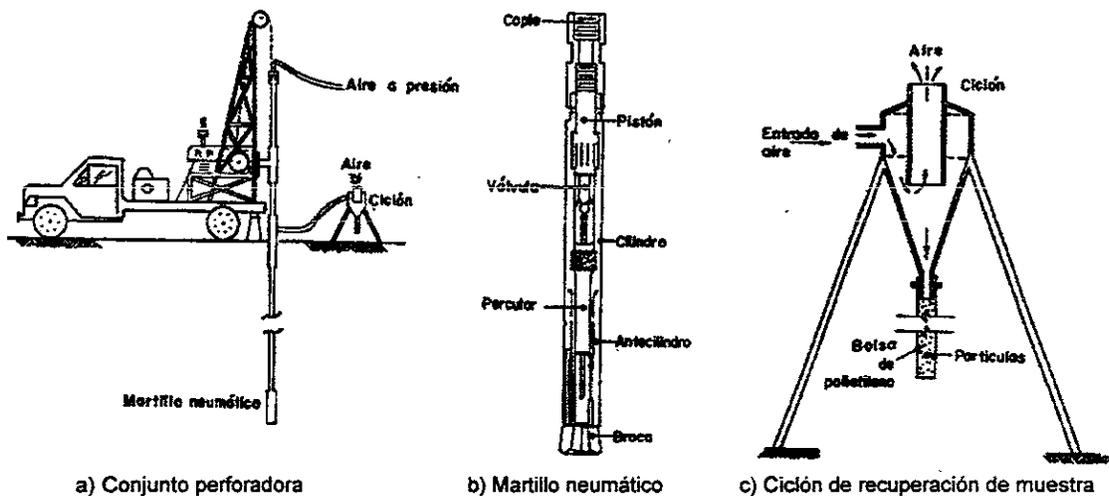


Fig. II.2.4 Muestreo a percusión

El procedimiento para identificar una caverna, consiste en observar el cambio de intensidad del ruido durante la perforación y la ausencia de retorno de aire, la mayor dificultad que se tiene con esta técnica es la falta de habilidad de los operadores, lo que hace necesario una supervisión cuidadosa.

Los métodos indirectos más empleados para la detección de cavernas, son los métodos geofísicos sísmicos (refracción) y los eléctricos (medición de resistividades). Sus resultados no son lo suficientemente confiables en la mayoría de los casos, debido a la heterogeneidad del medio.

En Ciudad Universitaria, se han encontrado oquedades durante los trabajos de exploración para la construcción de sus instalaciones, estas oquedades se inyectaron para establecer la continuidad de la masa rocosa. Como ejemplo se puede mencionar la obra de zoología (fig. II.2.5), en la cual se encontró una gran cantidad de discontinuidades las cuales fueron inyectadas.



Fig. II.2.5 Zoología, C.U.

Los sondeos eléctricos verticales realizados para la Línea 3 del Metro, estación Universidad, obtuvieron como resultado en los primeros 14 metros la detección de roca basáltica altamente fracturada, lo cual se infirió por las altas resistividades que presentan, características de la presencia de aire en fisuras u oquedades (ref. 32).

También se puede citar lo comentado por Marsal y Mazari (1959), que en la cimentación del Multifamiliar de Maestros de la UNAM, se inyectaron alrededor de 800m^3 de mortero de cemento para establecer la continuidad entre las capas de roca; las oquedades en este caso tenían alturas variables entre el centímetro y un metro (ref.2).

II.3 Bloques inestables

Las discontinuidades de los basaltos, en forma de contactos brechoides, cavernas, vesículas y planos de fracturamiento se presentan en distintas direcciones, que entre sí, forman bloques de roca bien delimitados. Algunos de estos bloques se encuentran en equilibrio inestable, es decir, que ante cualquier cambio en el estado de esfuerzos tendrían desplazamientos inclusive se podrían deslizar de su posición original. Los bloques inestables se presentan generalmente en dos casos (ref. 31):

En los taludes de las excavaciones. En la figura II.3.1 a) se puede apreciar una serie de pequeños bloques de basalto bien delimitados que pueden caer hacia el fondo de la excavación. La caída de estos bloques se deberá a un cambio en el estado de esfuerzos o al intemperismo que va ir sufriendo la roca en el corte.

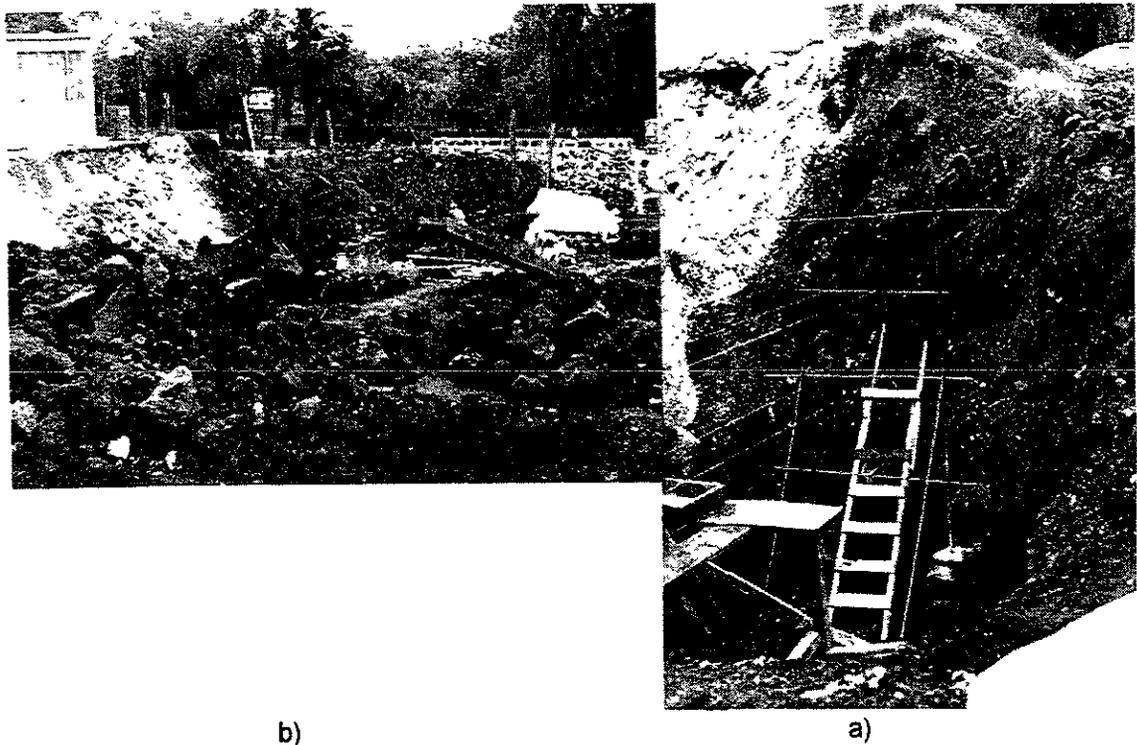


Fig. II.3.1 Bloques inestables

En los pisos producto de colapsos de techos de cavernas. En la figura II.3.2 se ven bloques inestables, producto del colapso del techo de una caverna, localizada cerca de la entrada principal de Ciudad Universitaria.

La existencia de estos bloques inestables ocasiona riesgos durante y después de la construcción de las estructuras ya que se pueden producir desplazamientos de roca o asentamientos diferenciales.

Resolver los problemas de estabilidad de bloques depende de las características particulares de cada situación:

Por ejemplo en los taludes de las excavaciones, los bloques deben ser removidos para evitar caídos al interior de la excavación. Si los bloques son de tamaño considerable, cabe la posibilidad de utilizar anclas para estabilizarlos.

El concreto lanzado ofrece una buena alternativa para la estabilización de bloques, y para garantizar mejores resultados se debe utilizar mallas de acero como refuerzo del concreto. En la figura II.3.1 b) se puede apreciar que se utilizó este método de estabilización.

En los pisos producto de colapsos de techos de cavernas, si el nivel de desplante y las dimensiones de los bloques lo permiten, estos pueden ser extraídos. Otra solución consiste en estabilizar los bloques mediante inyecciones de cementantes en las grietas que los delimitan (ref. 31).



Fig. II.3.2 Caverna colapsada, presenta en sus márgenes bloques inestables

II.4 Minas

En el capítulo I (Descripción del área de estudio), punto 1.6 Antecedentes geotécnicos se hizo referencia a la problemática debida a la explotación irracional de material para construcción, que generó laberintos de minas sin un patrón común. En este punto (II.4) se recopila la información sobre la posible localización de dichas minas en el área de estudio.

Resulta complejo localizar minas oportunamente, ya que cuando se inició la explotación de material para construcción, la zona se encontraba prácticamente despoblada, la presencia de minas pasó inadvertida en el pasado y sobre ellas se construyeron obras de urbanización, ahora es una zona densamente poblada en la que, los accesos a estas minas se encuentran ocultos y que en ocasiones fueron rellenos con basura.

La localización de minas subterráneas es importante, ya que la estabilidad de las estructuras y las soluciones de construcción de cimentaciones están regidas por su existencia y ubicación.

La falla de terrenos minados puede causar severos daños materiales y la pérdida de vidas humanas. Esta situación tiende a ser crítica debido al incremento de los asentamientos humanos, y a que el intemperismo actúa sobre las paredes de las minas provocando posteriormente el hundimiento súbito al ceder el techo.

Es importante señalar que, a pesar de que los métodos geofísicos son poco confiables, son muy usados como sondeos indirectos. Al igual que para detectar cavernas naturales en roca los métodos más empleados en la detección de minas, son el de refracción sísmica y resistividad eléctrica (fig. II.4.1), dando mejores resultados el segundo método. Sin embargo en condiciones de extrema heterogeneidad los resultados pueden ser decepcionantes.

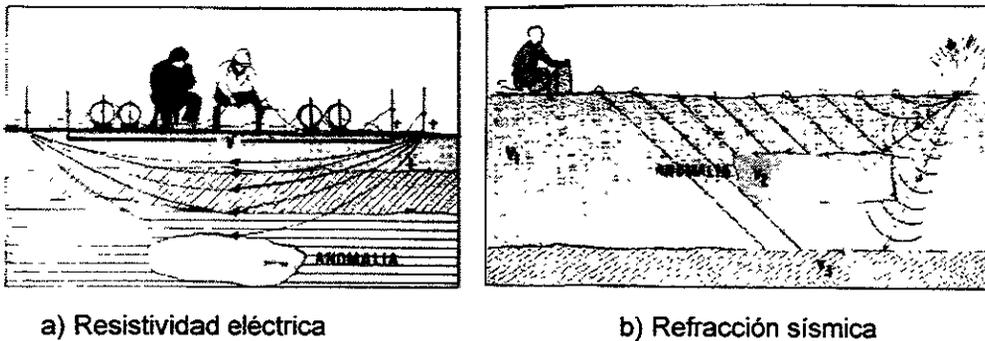


Fig. II.4.1 Métodos geofísicos (ref.32)

En la figura II.4.2 se muestra la zona donde existen cavidades subterráneas, el área de estudio solo abarca una fracción de esta zona minada.

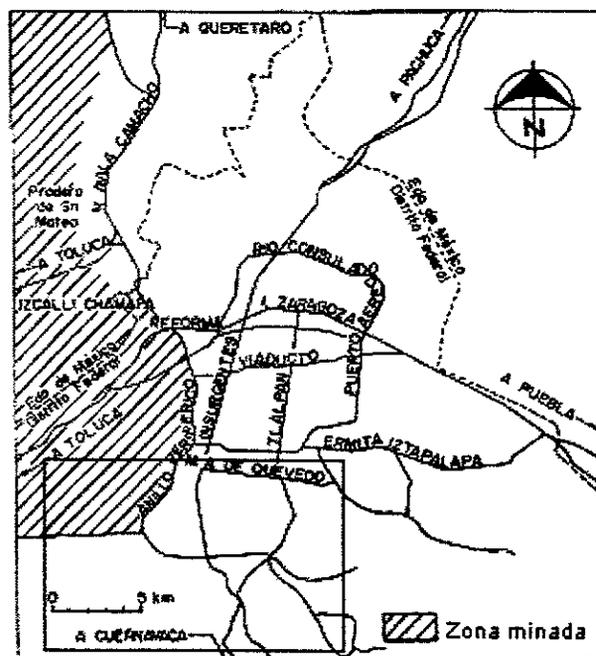


Fig. II.4.2 Localización de la zona minada (ref. 24)

En la siguiente tabla se presenta un resumen de estudios realizados en varias colonias ubicadas en la zona minada del área de estudio, asignándose cuatro categorías en lo que respecta a su grado de riesgo de falla: alto, medio, bajo y nulo (ref. 24).

Colonia o predio	Grado de peligro *			
	A	M	B	N
Colonia Las Palmas	X			
Colonia Ampliación las Águilas		X		
Fracc. Axomiatla	Xr**			
Colonia Angostura				X
Colonia Puente Colorado	X			
Colonia San Clemente	X			
Predio Planta de Asfalto			X	
Fracc. Lomas de Guadalupe				X
Fracc. Villa Verdún	Xr**			
Colonia Tlacuitlapa ***			X	

*A, alto; M, medio; B, bajo; N, nulo

**r, relleno

*** ref. 33

Grado de peligro de colonias y predios ubicados en la zona minada

Con las modificaciones del año de 1987 al Reglamento para los Trabajos de Exploración y Explotación de Yacimientos de Arena, Cantera de Tepetate y Piedra, en el Distrito Federal publicado en 1932, los trabajos de explotación ya no deberán representar un peligro a las futuras generaciones, ya que se prohíbe la explotación subterránea de los yacimientos.

II.5 Hundimiento regional

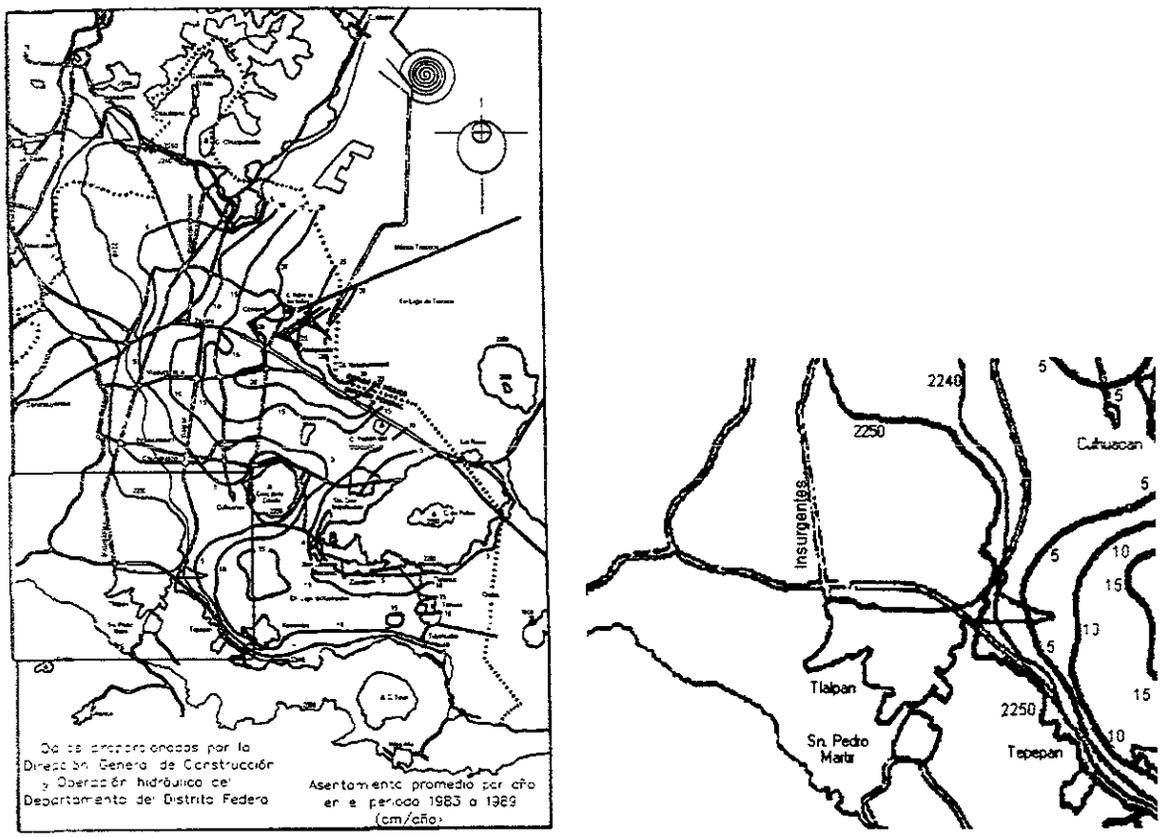
Es a partir de 1846 que se inició con mayor intensidad la perforación de pozos para la obtención de agua potable de los mantos subterráneos del valle. En estos años, la extracción de agua de pozo, combinada con los métodos artificiales de drenado, provocó que muchos manantiales naturales se secaran, que el nivel de los lagos decayera y que el agua del subsuelo perdiera presión, con la subsecuente consolidación de las arcillas lacustres sobre las que se asienta la ciudad (ref. 14).

Cerca de 1895, el hundimiento había alcanzado un promedio de cinco centímetros por año. Con el creciente bombeo efectuado, en el periodo que va de 1948 a 1953, el hundimiento había llegado a los 46 centímetros por año en algunas áreas (ref.14). El hundimiento del terreno ha constituido un serio problema para la ciudad desde principios del siglo XX. En 1953 ya se había demostrado que dicho hundimiento estaba asociado a la extracción de agua subterránea, por lo que muchos pozos del área urbana fueron clausurados.

En 1953, debido al severo hundimiento del centro de la ciudad, se clausuraron muchos pozos, al tiempo que se inició la construcción de otros nuevos en la región de Chalco, Tláhuac y Xochimilco. El gasto normal de bombeo, $12.2\text{m}^3/\text{s}$, ha provocado en esta región hundimientos y descenso de los niveles del agua (ref.14).

De acuerdo con la Gerencia de Aguas del Valle de México, el hundimiento neto en los últimos cien años ha hecho descender el nivel del terreno en la parte mas afectada de la ciudad un promedio de 7.5m. El resultado ha sido un daño extensivo a la infraestructura de la ciudad, que abarca los cimientos de los edificios y el sistema de alcantarillado.

En la figura II.5.1 se muestra la velocidad de hundimiento regional en el periodo 1983 a 1989, de la ciudad y del área de estudio.



Asentamiento promedio por año en el periodo 1983 a 1989 (cm/año), según la DGCCH
 Fig. II.5.1 Hundimiento regional

Como se puede ver en la figura anterior, la velocidad máxima del hundimiento en el área de estudio, para ese periodo es de 15cm/año. Suponiendo que ésta velocidad siga siendo válida hoy en día, el hundimiento acumulado sería del orden de 2.55m.

Si se compara la figura a) de zonificación geotécnica, con la b) de hundimiento regional de la figura II.5.2. Se observa que el área en donde se está generando este hundimiento pertenece a la Zona II y III del área de estudio.

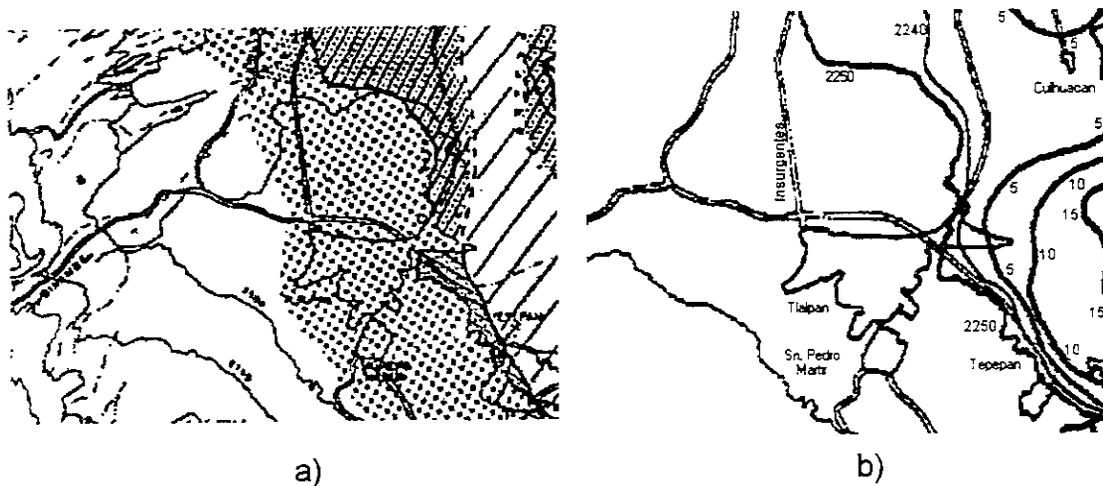


Fig. II.5.2 Hundimiento regional y zonificación geotécnica

La zona de transición merece especial atención, debido a que en ella se combinan la permeabilidad natural, la rapidez del crecimiento urbano y el incremento del número de pozos de abastecimiento. Lo que, además de inducir la consolidación de los estratos de arcilla, provoca la aparición de grietas.

II.6 Grietas

Existen varias teorías sobre la formación de grietas en arcillas lacustres (ref. 34).

En el área de estudio, se genera agrietamiento en las zonas de transición donde entran en contacto los suelos arcillosos lacustres con las formaciones volcánicas que los confinan, en estas zonas se desarrolla un gradual y continuo proceso de hundimiento diferencial y de fisuración del subsuelo; este fenómeno está íntimamente relacionado con el proceso de consolidación de los suelos blandos, a su vez incrementado por la explotación de los mantos acuíferos. Por otra parte, en la zona lacustre, el fracturamiento se ve favorecido por la existencia de capas rígidas de material volcánico (tobas) que descansan sobre las arcillas compresibles sometidas al efecto del bombeo. La incompatibilidad de deformaciones entre estos dos tipos de materiales puede conducir a la formación de grietas con escalones hasta de varias decenas de centímetros.

En el área de estudio, el fenómeno de agrietamiento en zonas de transición gana importancia a partir de los 70, observándose asentamientos y desarrollo de grietas en las cercanías del Cerro de la Estrella y más recientemente en los alrededores de La Noria y Tepepan (fig. II.6.1).

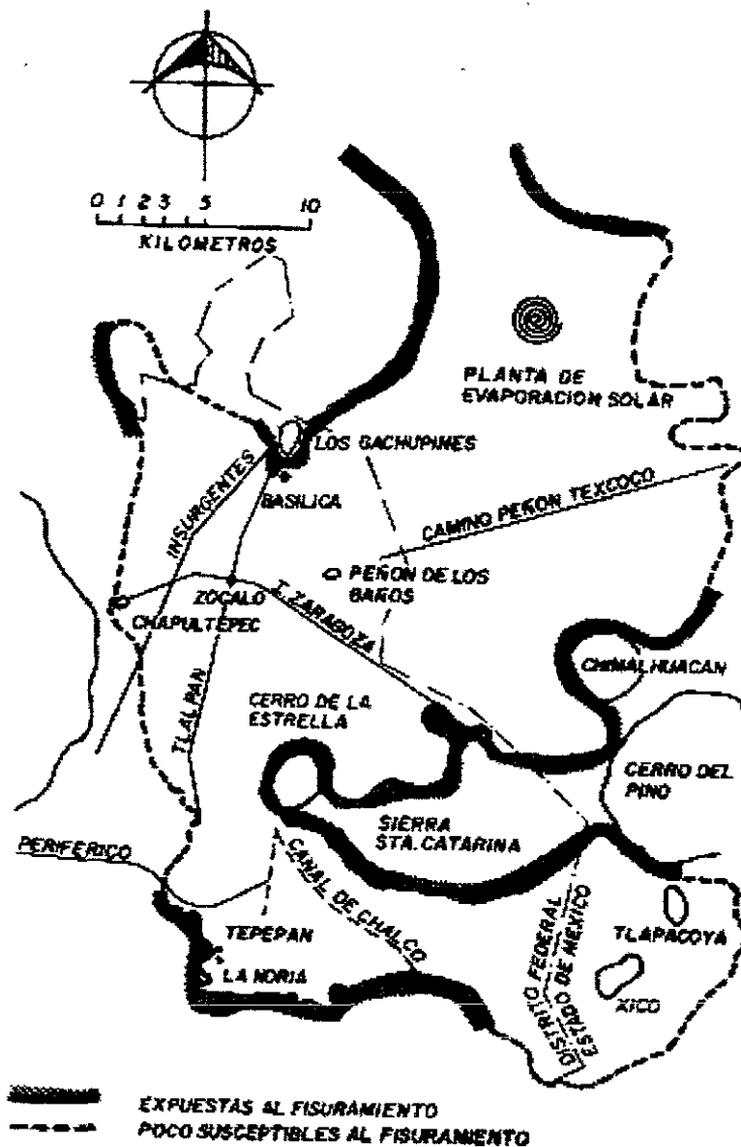


Fig. II.6.1 Localización de las zonas de fracturamiento (ref. 35)

Marín (1978) propone un mecanismo de falla para el agrietamiento presentado entre Naucalpan y Ciudad Satélite, este mecanismo con pequeñas modificaciones puede ser aplicable en el área de estudio para explicar el fenómeno de agrietamiento que se presenta en dicha área.

Marín observa que la zona afectada por las grietas se encuentra localizada en un antiguo valle de la "Formación Tarango", que posteriormente fue rellenado con los depósitos aluviales del río de los Remedios; estos depósitos, debido a su formación y edad, seguramente más compresibles que los correspondientes a la "Formación Tarango".

Las condiciones iniciales son las mostradas en la figura II.6.2, o sea los depósitos aluviales, con espesor máximo en el eje del valle, descansando sobre la "Formación Tarango" más antigua.

Posteriormente se instalan pozos profundos para extraer agua de los depósitos aluviales y se empieza a producir un abatimiento piezométrico cuya consecuencia inmediata son los esfuerzos efectivos verticales. La magnitud de estos hundimientos es función de la compresibilidad y el espesor de los depósitos afectados por el incremento de esfuerzos. Si como se muestra en la figura II.6.2, se tienen diferencias de espesor en el manto compresible (H_1 , H_2 y H_3), en el tiempo t_1 , se presentaran hundimientos diferenciales con una configuración semejante mostrada en la parte inferior de la misma figura (δ_1 , δ_2 y δ_3). Para un tiempo t_1 , el nivel piezométrico se abate una profundidad z_1 . Al continuar el bombeo, el nivel piezométrico continuará descendiendo y es de esperarse que a partir del tiempo t_1 la contribución a los asentamientos de la zona localizada entre la superficie y z_1 , será prácticamente nula. Entonces se tendrá una zona que ya no se comprime y otra subyacente (H'_1 y H'_2) en la cual continuará la consolidación (δ'_1 y δ'_2) y que inducirá flexión en los materiales superyacentes. Esta flexión se traducirá en tensiones perpendiculares (T) al eje del valle y, eventualmente en grietas paralelas al mismo. Al continuar el descenso del nivel piezométrico y no existiendo continuidad de los materiales superficiales entre las zonas adyacentes a la grieta se producirá un escalón.

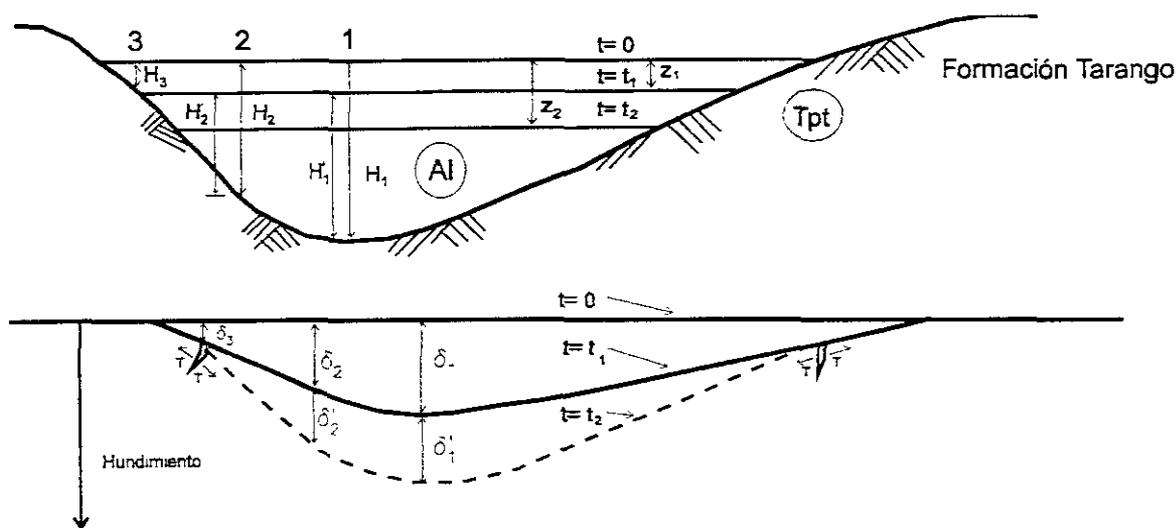


Fig. II.6.2 Mecanismo de agrietamiento (ref. 36)

La adaptación de esta teoría es muy simple, solo consiste en modificar la estratigrafía, es decir: Marín considero a la "Formación Tarango" como el estrato de apoyo de depósitos aluviales compresibles, y en cambio en la zona de interés del área de estudio se presenta en algunas partes roca en lugar de la "Formación Tarango" y arcillas lacustres principalmente, en lugar de los depósitos aluviales compresibles. Por lo tanto, este mecanismo de falla puede ser aplicable en la zona (fig. II.6.3). Este mismo fenómeno ha podido ser modelado recurriendo al método del elemento finito (ref.39).

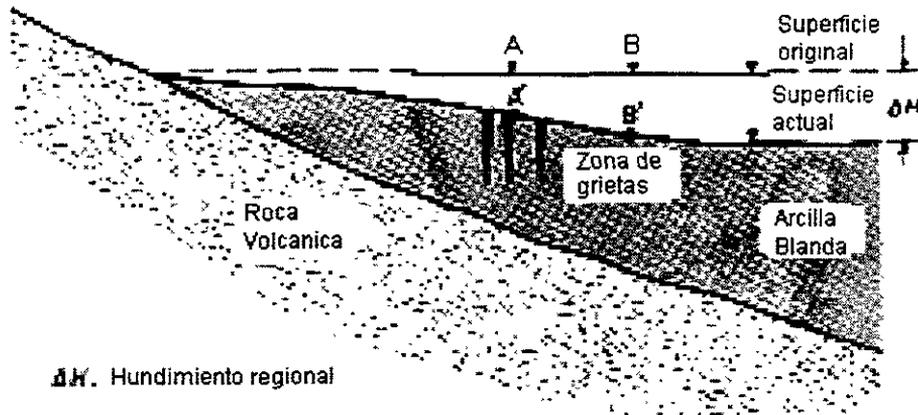


Fig. II.6.3 Mecanismo de agrietamiento en el área de estudio (ref. 35)

Moreno Pecero (1978) presenta su teoría acerca de los agrietamientos y hundimientos del subsuelo para esa zona (Naucalpan), dicha teoría se basa en el abatimiento piezométrico de la zona, plantea que la disminución de presión se traduce en la generación de un proceso de consolidación en el que seguramente existe una alta posibilidad de que se produzcan hundimientos diferenciales, debido a que la disminución de presión en el agua no es la misma a iguales profundidades; y por la naturaleza frágil del suelo en el sitio, es posible que se formen grietas precisamente en la zona en donde haya mayor disminución de presión (ref. 37). Esta teoría también puede ser aplicable para el agrietamiento del área de estudio ya que se encuentra sometida a un intenso bombeo para la extracción de agua (fig. II.6.4).

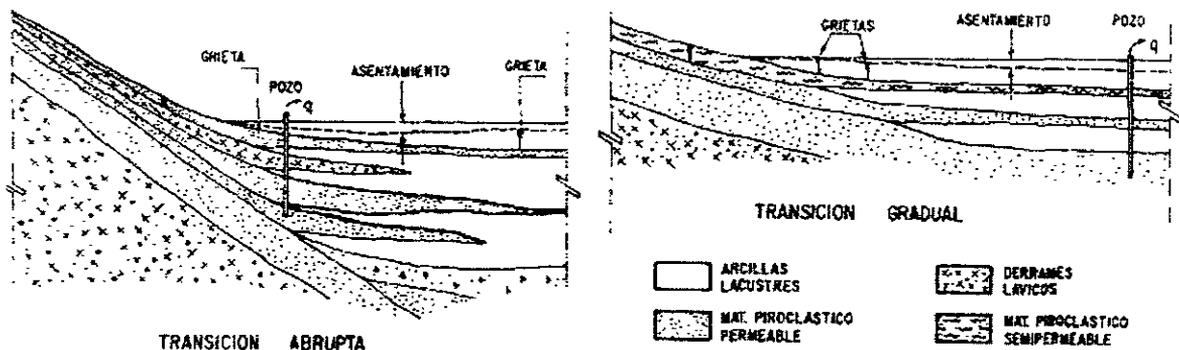


Fig. II.6.4 Mecanismo de agrietamiento en el área de estudio (ref. 38)

En el área de estudio, también se puede dar el caso de agrietamiento a consecuencia del estado de tensiones que ocasiona el proceso de hundimiento diferencial de las arcillas que cubren totalmente formaciones rocosas (fig. II.6.5).

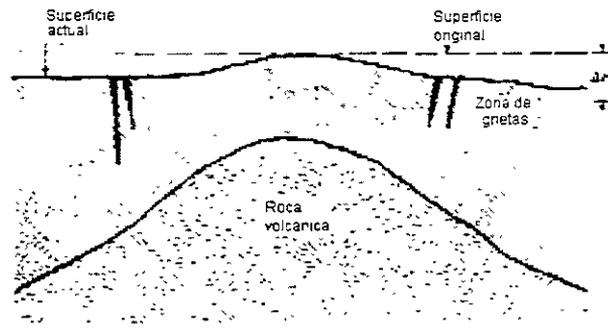


Fig. II.6.5 Mecanismo de agrietamiento en el área de estudio (ref. 35)

Respecto a la propagación de grietas, Auvinet y Arias (1990) plantearon que las presiones hidráulicas que se desarrollan por acumulación brusca de agua de lluvia dentro de grietas preexistentes, favorecen la propagación de las mismas (ref.39). En su trabajo muestran que al rellenar las grietas e incrementar en ellas la presión interna, se generan condiciones propicias a la propagación. Mencionan que algunos autores recomiendan rellenar las grietas con material de la zona o con una mezcla de cemento y bentonita, pero advierten que el relleno brusco debe evitarse por que favorece la propagación.

En la zona de transición de Xochimilco con la Sierra del Chichinautzin (fig. II.6.6) se han localizado extensos agrietamientos los cuales pueden ser el producto de los mecanismos de falla antes comentados, pudiendo generar desplomo en las estructuras y destrucción de instalaciones urbanas.

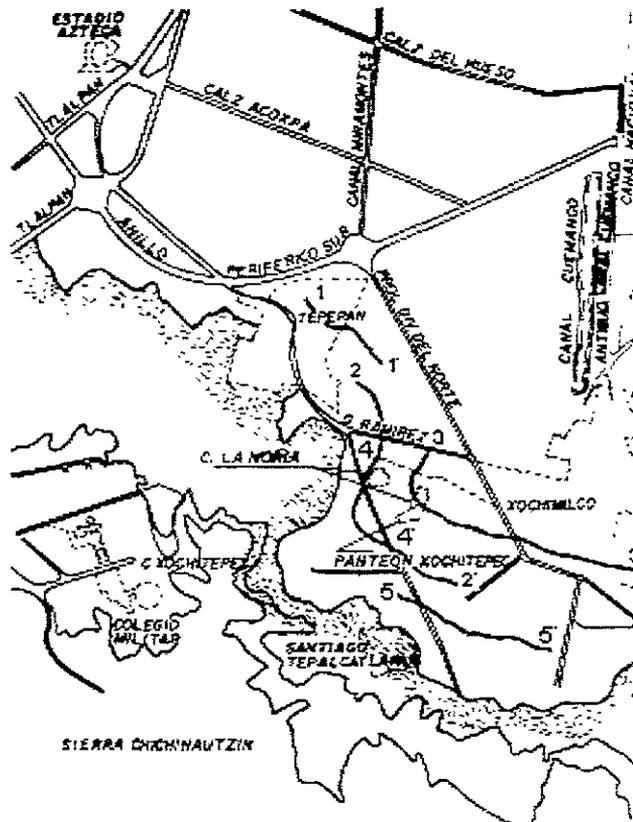


Fig. II.6.6 Grietas en la zona de transición de Xochimilco con la Sierra del Chichinautzin (ref. 35)

La figura II.6.7 es ejemplo de una Unidad Habitacional afectada por el agrietamiento ubicada en la delegación Xochimilco en vecindad de los cerros de La Noria, entre Mártires del Río Blanco y Dinteles, construida hace unos veinte años, sobre suelos lacustres blandos junto a un domo de roca volcánica; su peculiar localización origina que la consolidación de las arcillas del subsuelo, inducida por la extracción de agua para el abastecimiento urbano, provoque asentamientos diferenciales, los cuales fueron advertidos desde el estudio geotécnico inicial; sin embargo, su magnitud ha resultado mayor que la prevista porque el acuífero ha sido sobreexplotado a tal grado, que ha generado además agrietamiento en el subsuelo (ref. 35).

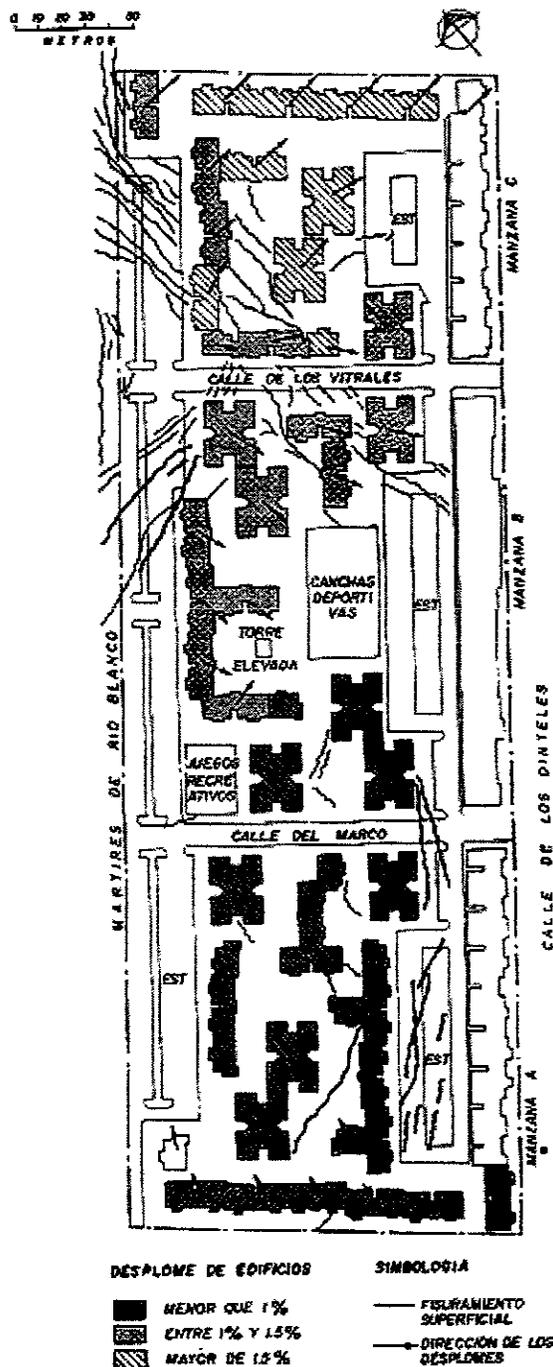


Fig. II.6.7 Agrietamiento en la Unidad Rinconada del Sur en Xochimilco

III Evaluación de la información geotécnica disponible

Los trabajos de recopilación y análisis de la información geotécnica que se han efectuado en el pasado han tenido como propósito conocer y actualizar el estado del conocimiento sobre el subsuelo en la Ciudad de México. Lo anterior constituye una de las tareas de gran tradición y costumbre que realiza el hombre desde que este empezó a construir en esta difícil zona.

En el presente capítulo se contribuye a esta misma tarea de actualizar el conocimiento sobre el subsuelo y mejorar su zonificación geotécnica, pero ahora empleando técnicas nuevas basadas en el uso de la informática.

III.1 Metodología

El propósito de este punto es presentar una descripción detallada de la metodología adoptada para la elaboración de la propuesta de zonificación geotécnica, objeto de estudio en esta tesis.

Para cumplir con el objetivo de esta tesis, se empezó por formar una base de datos de sondeos geotécnicos, con la información obtenida gracias a la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos a través de sus distintas publicaciones, con la información del Instituto de Ingeniería y con la proporcionada por empresas privadas y públicas como: ACI, TGC y, finalmente, COVITUR. La información más valiosa fue recabada en las empresas privadas, pero, por razones prácticas, generalmente sólo se extrajo de los estudios de mecánica de suelos, el perfil estratigráfico o, en su caso, resultados obtenidos por métodos indirectos como por ejemplo: las gráficas resultantes de la prueba de cono eléctrico,

En ciertas áreas donde la información es escasa se realizaron recorridos de campo y se tomaron fotografías del lugar.

La información antes señalada se ubicó en la traza urbana digital del área de estudio, que se construyó a partir de la información del INEGI actualizada hasta 1994. Esta información originalmente está dividida por delegaciones y contiene muchos elementos irrelevantes, lo que implicó recortar y depurar la información de cada delegación del área de interés. Un atributo importante de esta información es que está georeferenciada, es decir, que las coordenadas de sus elementos los ubican sobre la superficie de la Tierra. Gracias a este atributo de la traza urbana la metodología empleada fue similar a la de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) que son, en pocas palabras, herramientas que permiten ubicar geográficamente la información contenida en cualquier base de datos en mapas digitales.

Se capturó digitalmente y georeferenció por medio de Arc/Info, auxiliado con AutoCad, mapas de geología, topografía e hidrografía. Además, se aplicó este mismo proceso al mapa actual de zonificación que aparece en las NTC. Estos mapas incluyendo la traza urbana y los sondeos se encuentran divididos por

coberturas temáticas en formato digital presentadas en AutoCad. Los sondeos se representaron por puntos numerados en su respectiva cobertura. Cabe señalar que Arc/Info es el software más completo que existe comercialmente para la creación de GIS.

La ventaja de almacenar la información en distintas coberturas, es la posibilidad de empalmarlas todas al mismo tiempo o bajo selección, con el fin de analizarlas en conjunto o por separado (fig. III.1.1); por ejemplo: se puede analizar las coberturas de geología, sondeos y zonificación al mismo tiempo, y todas ubicadas bajo el mismo marco de referencia, geográficamente correcto.

El capturar la información por medio de coberturas ofrece una gran ventaja de eficiencia para administrar y manejar simultáneamente grandes volúmenes de información gráfica y alfanumérica para procesarla, interpretarla y presentarla en forma clara y difundirla.

Esta técnica permite basar la propuesta de zonificación geotécnica del área de estudio simultáneamente en la hidrografía, topografía, geología y, principalmente, en perfiles estratigráficos.

De hecho, esta tesis es parte de dos proyectos que se llevan a cabo en el Instituto de Ingeniería:

- a) Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG, que tiene como objetivo almacenar sistemática y permanentemente la información puntual disponible sobre los rasgos generales del subsuelo, a través de los datos contenidos en sondeos geotécnicos de diferentes tipos.
- b) Actualización de la zonificación geotécnica del Distrito Federal y del Valle de México, cuyo objetivo se encuentra explícito en el mismo nombre.

Son proyectos que van de la mano, ya que sin el proyecto a) no sería posible trabajar en el b).

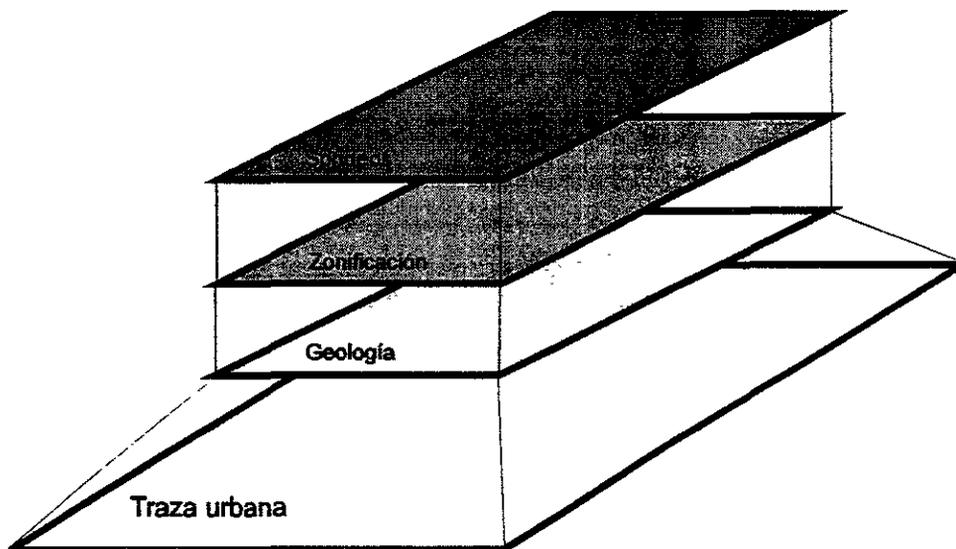


Fig. III.1.1 Coberturas temáticas

III.2 Información recopilada

En el punto anterior se menciona que la información recopilada para la elaboración de la propuesta de zonificación geotécnica, consiste en la información de sondeos geotécnicos (su perfil estratigráfico), fotografías y una serie de mapas digitales. A continuación se presenta y se discute dicha información:

III.2.1 Sondeos geotécnicos

Se cuenta con 215 sondeos geotécnicos de diferente tipo los cuales se encuentran distribuidos aleatoriamente en el área de estudio, con mayor concentración en el área lacustre. Ya se han mencionado algunas de las distintas fuentes que proporcionaron esta información, si los sondeos se dividen por fuente se llega a la siguiente tabla:

Fuente de información	# de sondeos	%
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos	75	34.88
TGC Geotecnia S.A. de C.V.	41	19.07
Departamento del Distrito Federal	34	15.81
ISTME	23	10.70
ACI Asesores en Cimentaciones S.A. de C.V.	18	8.37
I. de I.(UNAM)-ICA	9	4.19
Ingenieros Especialistas en Cimentaciones	8	3.72
Otros	7	3.26
Total	215	100

A estos sondeos se les ha asignado una clave de identificación con objeto de diferenciarlos por tipo dentro de la base de datos.

Clave	Tipo de sondeo
00	Fuente bibliográfica o desconocido
01	PCA e inalterado
02	Sondeo de penetración estándar
03	Cono dinámico
04	Cono eléctrico
05	Mixto
06	SAC (sondeo de avance controlado)

Si los sondeos se dividen por tipo, se llega a la siguiente tabla:

Clave	# de sondeos	%
00	85	39.53
01	25	11.63
02	26	12.09
03	1	0.47
04	8	3.72
05	63	29.30
06	7	3.26
total	215	100

La base de datos de sondeos geotécnicos que se ha comentado con anterioridad contiene los siguientes campos:

Clave	Clave aux.	Mes	Año	Tipo	Ejecutor	Calle y número	Entre calle	Colonia	Del.
-------	------------	-----	-----	------	----------	----------------	-------------	---------	------

Ciudad	Entidad	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Prof.	Observaciones	Prof. NAF	Zona
--------	---------	----------	----------	----------	-------	---------------	-----------	------

La base de datos se puede consultar en el anexo A), y forma parte de una base de mas de 2000 sondeos que se encuentran en el SIG-SG. Los 215 perfiles estratigráficos no se incluyen en la tesis debido al gran volumen que ello implica, solo se incluirán los perfiles contenidos en los cortes estratigráficos del punto III.3 de esta tesis. Sin embargo todos los perfiles pueden ser consultados individualmente en el SIG-SG.

El proceso de ubicación de sondeos constó de dos etapas:

- Se ubicaron en cartas urbanas impresas a escala 1:10,000 con el fin de obtener sus coordenadas UTM.
- Una vez obtenidas las coordenadas se ubicaron los sondeos de manera digital en el área de estudio.

La cartografía que se utilizó para ubicar los sondeos tanto en papel como en computadora fue la antes mencionada, es decir la que se obtuvo a partir de la información del INEGI.

A continuación se presenta la distribución de los sondeos geotécnicos recopilados en el área de estudio (fig. III.2.1.1), esta figura solo tiene el propósito de dar una idea cualitativa de la distribución y densidad, ya que en el anexo B) se encuentra un plano a escala del área de estudio con la ubicación de los sondeos y la correspondiente traza urbana.

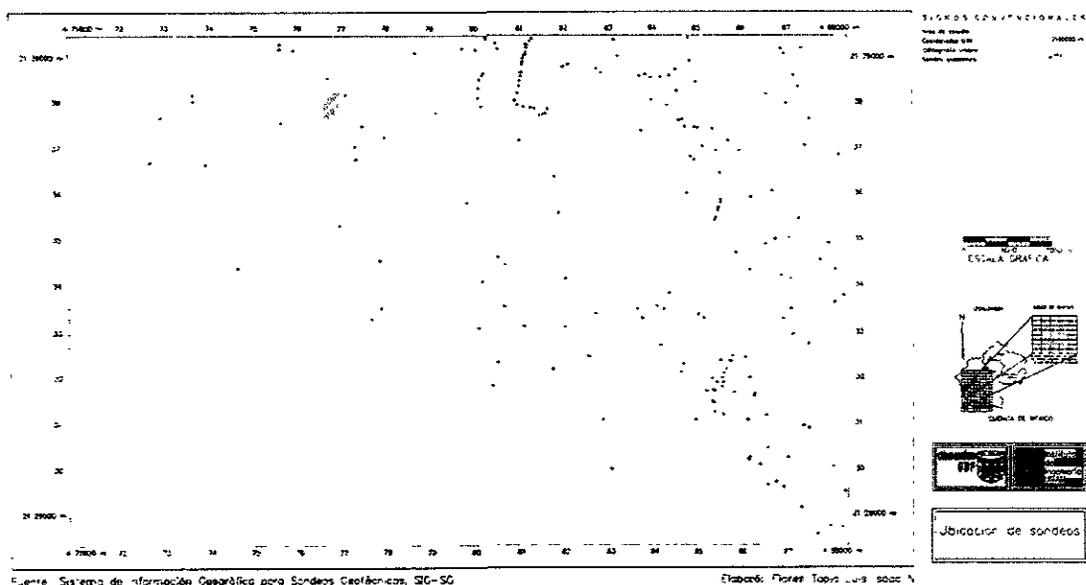


Fig. III.2.1.1 Sondeos geotécnicos recopilados en el área de estudio

III.2.2 Fotografías

En zonas donde se carece de información geotécnica, se realizaron recorridos de campo para tomar fotografías. Los recorridos se enfocaron a la zona cubierta por derrames basálticos, ya que debido a la alta resistencia que presenta esta roca se ha obstaculizado la realización de sondeos.

En algunos casos las fotografías fueron tomadas con ciertas dificultades debido al difícil acceso a esta zona y a que, en otros casos, los predios se encuentran enrejados o bardeados.

Las fotografías solo servirán como información complementaria de la geología, ya que el mayor número de ellas fueron tomadas a nivel superficial; por ejemplo se muestra un predio localizado en la calle Fuente de la Felicidad (fig. III.2.2.1) entre Circuito Fuentes del Pedregal y Fuente de los Deseos, colonia Fuentes del Pedregal.



Fig. III.2.2.1 Fuentes del Pedregal

Se tomaron fotografías en las siguientes colonias;

Colonia
Fuentes del Pedregal
Santa Teresa
Los Framboyanes
Manuel Romero de Terreros
Unidad Habitacional Monte de Piedad
Pedregal de San Francisco
Pedregal de Santa Ursula
Pueblo Santa Ursula Coapa
Pedregal de Coyoacán
Jardines del Pedregal
Ampliación La Candelaria
San Lorenzo Huipulco
Adolfo Ruiz Cortines
Ciudad Universitaria

Al igual que los perfiles estratigráficos, las fotografías no se anexan a la tesis, debido al gran espacio físico que ello requeriría. Sin embargo pueden ser consultadas en el disco compacto que acompaña a la tesis y en el SIG-SG.

En el anexo B) se encuentra el mapa de localización a escala 1:50,000.

III.2.3 Mapas digitales

Se cuenta con información capturada digitalmente de mapas de hidrografía, topografía, geología, zonificación geotécnica y traza urbana.

Traza urbana

Ya se ha mencionado que la traza urbana fue obtenida de la información del INEGI actualizada hasta 1994. Este mapa digital del área de estudio es la base para la ubicación de sondeos y fotografías, además facilita el análisis de la información de las otras coberturas. Esta traza urbana al nivel de calles y manzanas será presentada junto con la cobertura final de la propuesta de zonificación geotécnica, siendo la primera vez que se presenta esta información a tal detalle.

Zonificación geotécnica

El mapa digital de zonificación se capturó basándose en el mapa que aparece en las NTC para Diseño y Construcción de Cimentaciones, 1995 (fig. III.2.3.1). El tener este mapa georeferenciado es de suma importancia ya que a partir de él se harán las correspondientes modificaciones si es el caso.

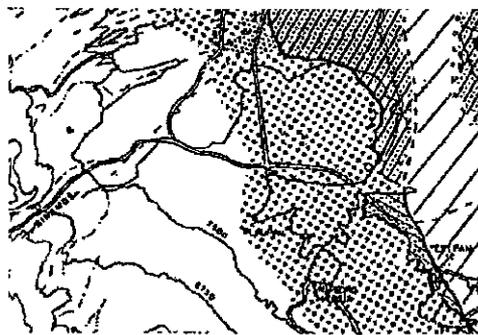


Fig. III.2.3.1 Zonificación geotécnica del área de estudio

Se tomó el plano que se encuentra en las NTC, debido a que es el plano reglamentario y a que se pretende continuar con la sencilla zonificación que presenta. Cabe señalar que se podría proponer una zonificación más detallada tipo COVITUR (fig. 9), si se contara con mayor información y hasta cierto límite con la información disponible, pero ello podría ser motivo de la omisión de la investigación del subsuelo por parte de los ingenieros o arquitectos dedicados a la construcción, por lo que la sencillez de la zonificación del reglamento no se deberá perder.

A continuación se presenta el mapa georeferenciado, que incluye a la traza urbana (fig. III.2.3.2); como ya se había mencionado este también será el formato con el que se presentará la cobertura de la propuesta de zonificación geotécnica del área de estudio.



Fig. III.2.3.2 Zonificación geotécnica del área de estudio

En el anexo B) se encuentra este mapa de zonificación geotécnica mas la ubicación de sondeos y fotografías a escala 1:50,000.

Hidrografía y topografía

Los mapas digitales de hidrografía y topografía se georeferenciaron para poder entender con mayor facilidad la distribución de los materiales del subsuelo. Esta información se capturó digitalmente basándose en las cartas urbanas escala 1:20,000 de la empresa Sistemas de Información Geográfica, S.A., se optó por capturar esta información y no la del INEGI debido a la dificultad de apreciación que representa la escala de sus cartas urbanas que contienen esta información.

En el anexo B) se encuentran los mapas a escala 1:50,000.

Geología

En el Capítulo I, punto 1.5, Geología general, se habló de manera general de la geología de la cuenca, enfatizando de cierto modo a los eventos del Sur que contribuyeron a la formación del área de estudio. F. Mooser ha estudiado la Cuenca de México desde varias décadas atrás; su ultimo trabajo publicado a la fecha es el "Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla" (1996), el cual está compuesto por 36 cartas a escala 1:100,000. Se capturó digitalmente y se georeferenció el área de interés para delimitar la geología del

área de estudio. Se tomó el trabajo de Mooser por contener la geología mas completa y detallada que se ha publicado hasta el momento.

En el anexo B) se encuentra el mapa a escala 1:50,000.

III.3 Cortes estratigráficos

La correlación de estratos se basó en el número de golpes, en la resistencia de punta del cono eléctrico, en los contenidos de agua (no digitalizados) y en la distribución de los materiales con la profundidad tomando en cuenta los lineamientos establecidos por Marsal y Mazari en 1959 (ref.2).

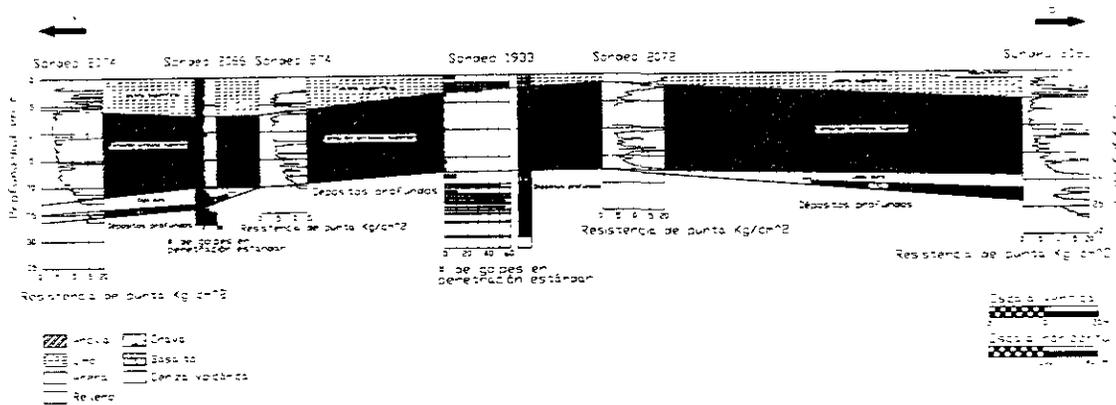
El comportamiento de los suelos está fuertemente influenciado por el contenido de agua, de aquí la importancia de su cuantificación. La determinación del contenido de agua de un suelo es la prueba más simple y la que más frecuentemente se realiza en un laboratorio de mecánica de suelos; la variación del contenido de agua con la profundidad debería ser siempre parte de un perfil estratigráfico típico. El contenido de agua de un suelo da una idea acerca de sus probables propiedades mecánicas. Particularmente en los suelos finos, y junto con los límites de plasticidad, el contenido de agua constituye un buen índice de la consistencia del suelo en estudio. En el caso del subsuelo de la Ciudad de México, particularmente en la zona del lago, la variación del contenido de agua facilita la detección de los cambios estratigráficos. Los valores bajos del contenido de agua, por lo general corresponden a las capas limo arenosas; por el contrario, en las capas compresibles arcillosas se tendrán valores altos. Desgraciadamente no todos los perfiles estratigráficos con los que se cuentan tienen determinada esta propiedad índice, pero sí fue tomada en consideración cuando fue posible.

Un mejor procedimiento para definir la estratigrafía consiste en basarse en la variación de la resistencia de punta del cono eléctrico que, como se muestra mas adelante, hace resaltar los contrastes estratigráficos con buena definición, con la ventaja adicional de hacerlo en un tiempo más corto y con menor costo.

La prueba de penetración estándar permite conocer las condiciones estratigráficas del sitio mediante la extracción de muestras alteradas y el número de golpes necesario para hincar el penetrómetro estándar.

Los siguientes cortes estratigráficos pueden ser consultados con mayor detalle en el disco compacto que acompaña a la tesis. En la estratigrafía de los cortes se omiten estratos secundarios como lentes de arena, ya que para efecto de esta tesis son irrelevantes. Esta información será utilizada mas adelante en la propuesta de zonificación, por lo que los ejes de los cortes son perpendiculares o paralelos, a las líneas virtuales de la zonificación de 1995.

El plano de localización se encuentra en el anexo B).



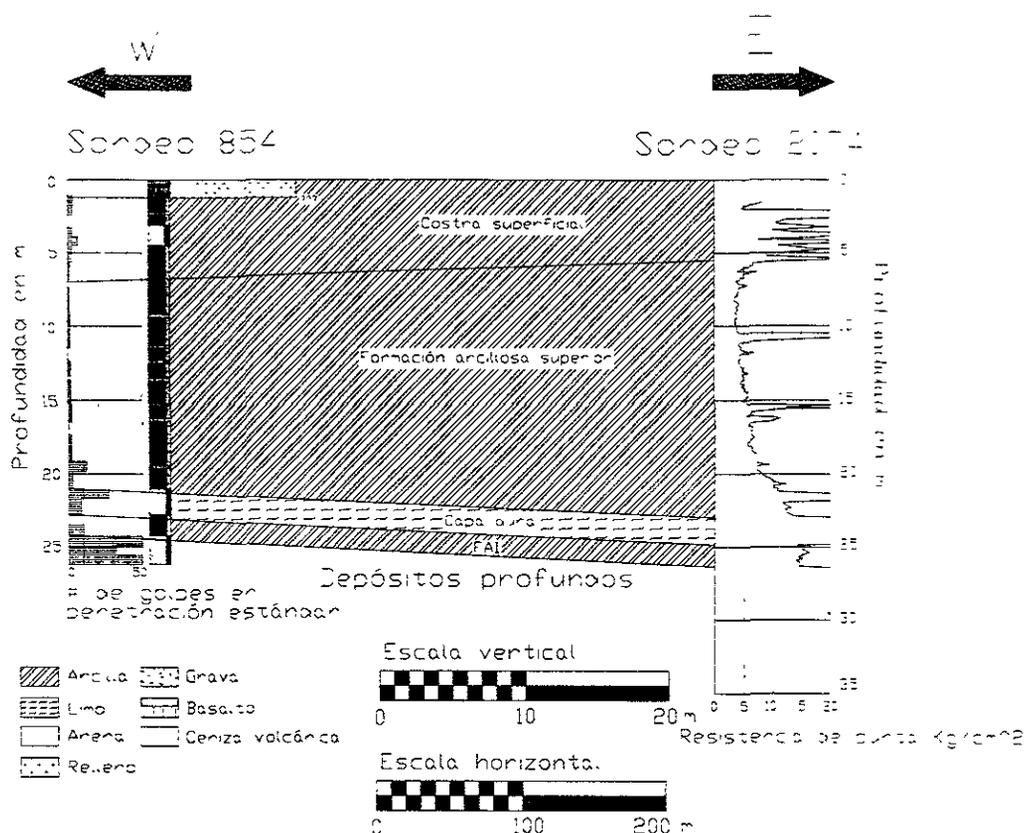
Corte estratigráfico #1

Corte estratigráfico #1 . El eje de este corte (1-1') se encuentra localizado en Zona III, cerca de la zona de transición del Cerro de la Estrella. En el corte se observa la influencia del cerro, cuyos depósitos fluviales obstruyeron la formación de la FAI y forman una sola unidad con la capa dura recibiendo el nombre de depósitos profundos. La sensibilidad de los sondeos de cono es mayor que la de los sondeos de penetración estándar, lo cual permite detectar que, a partir de 10m de profundidad, se encuentra una serie de lentes duros que probablemente se deben a la presencia de materiales erosionados del Cerro de la Estrella.

La estratigrafía del corte concuerda con su ubicación dentro del plano de zonificación del reglamento. Aunque el eje del corte se encuentre en Zona III, algunos de los perfiles que lo forman están en la Zona II (ver plano de localización).

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	1.3 a 7.0
Formación arcillosa superior	15.0
Capa dura	2.0
Formación arcillosa inferior	1.5

Estratigrafía corte #1

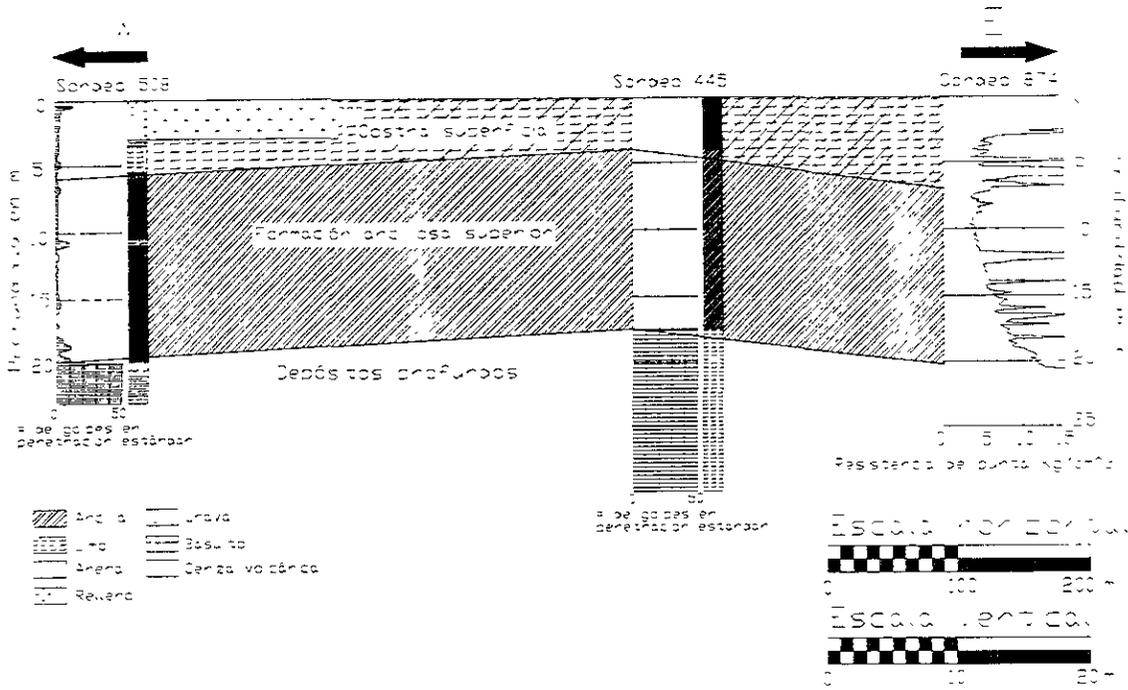


Corte estratigráfico #2

Corte estratigráfico #2 . El eje de este corte se encuentra localizado en Zona III; la estratigrafía del corte concuerda con su posición dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y de la Ciudad de México. El sondeo de cono indica la presencia de lentes duros intercalados en la formación arcillosa superior y permite observar la variación de la resistencia de punta con la profundidad.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	5.5 a 7.0
Formación arcillosa superior	14.0 a 17.5
Capa dura	1.8
Formación arcillosa inferior	1.5

Estratigrafía corte #2

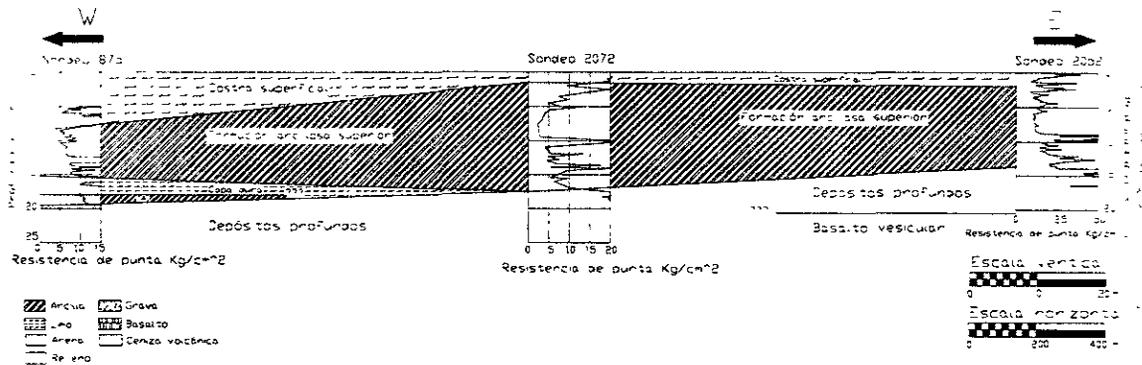


Corte estratigráfico #3

Corte estratigráfico #3. El eje de este corte se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación; la zona en la que se encuentra pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y la Ciudad de México. Es evidente la existencia de un lago debido al espesor del depósito arcilloso y a la baja resistencia de número de golpes y de penetración de cono, pero en este corte tenemos a la FAS en contacto directo con los depósitos profundos, es decir, la FAI no logra formarse por lo que según el reglamento este corte pertenece a la Zona II, ya que encontramos los depósitos profundos a 20m de profundidad o menos. El sondeo de cono indica la existencia de un gran número de lentes duros intercalados en la FAS, debidos a la presencia del Cerro de la Estrella.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	4.0 a 7.0
Formación arcillosa superior	13.2 a 13.8
Capa dura	-----
Formación arcillosa inferior	-----

Estratigrafía corte #3



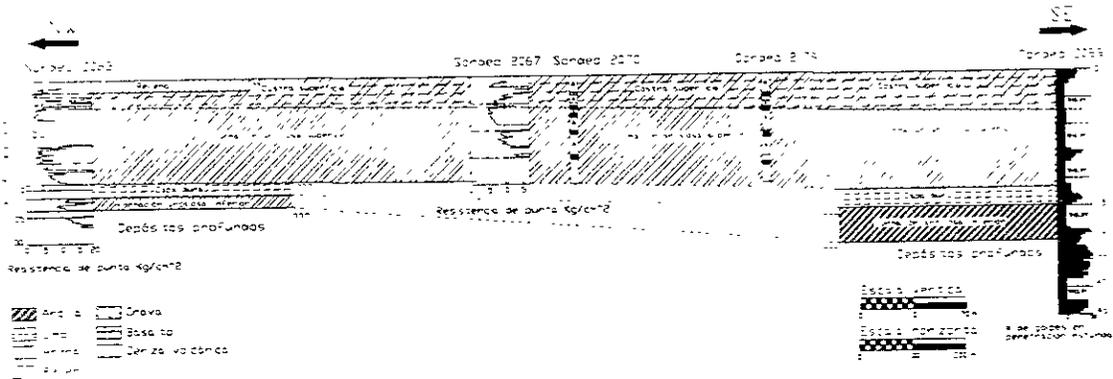
Corte estratigráfico #4

Corte estratigráfico #4. El eje transversal de este corte se encuentra localizado, de acuerdo con el mapa del reglamento, atravesando la Zona III hasta llegar a la Zona II, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación, la zona en la que se encuentra pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y la Ciudad de México, es evidente la existencia de un lago debido al espesor del depósito arcilloso y a la baja resistencia de penetración de punta, pero a lo largo de este corte tenemos, en un caso que la FAS está en contacto directo con los depósitos profundos, es decir, la FAI no logra formarse. En el otro caso, la FAI si se logra formar pero los depósitos profundos se encuentran a una profundidad menor de 20m, por lo que según el reglamento este corte pertenece a la Zona II.

Es interesante hacer notar la estratigrafía que presenta el sondeo 2052, que muestra la existencia de basalto subyaciendo a los depósitos profundos (depósitos fluviales), este basalto está asociado al Cerro de la Estrella.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	1.5 a 8.4
Formación arcillosa superior	6.7 a 16.0
Capa dura	2.7
Formación arcillosa inferior	0 a 1.6

Estratigrafía corte #4

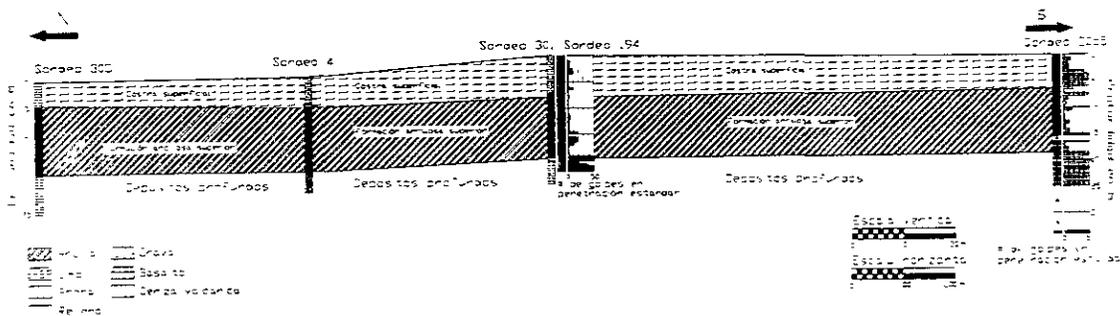


Corte estratigráfico #5

Corte estratigráfico #5. El eje de este corte se encuentra localizado en Zona III. La estratigrafía del corte concuerda con su posición dentro de la zonificación. La zona en la que se encuentra pertenece al antiguo lago de Xochimilco. Los depósitos profundos se encuentran a una profundidad mayor de 20m. Debido a que los sondeos 2067, 2070 y 2179 no son suficientemente profundos, las líneas punteadas solamente indican la posible continuidad de los estratos.

Estrato	Espesor, en m (valores promedio)
Costra superficial	5.0 a 7.0
Formación arcillosa superior	14.0
Capa dura	2.5 a 3
Formación arcillosa inferior	2.3 a 6.5

Estratigrafía corte #5

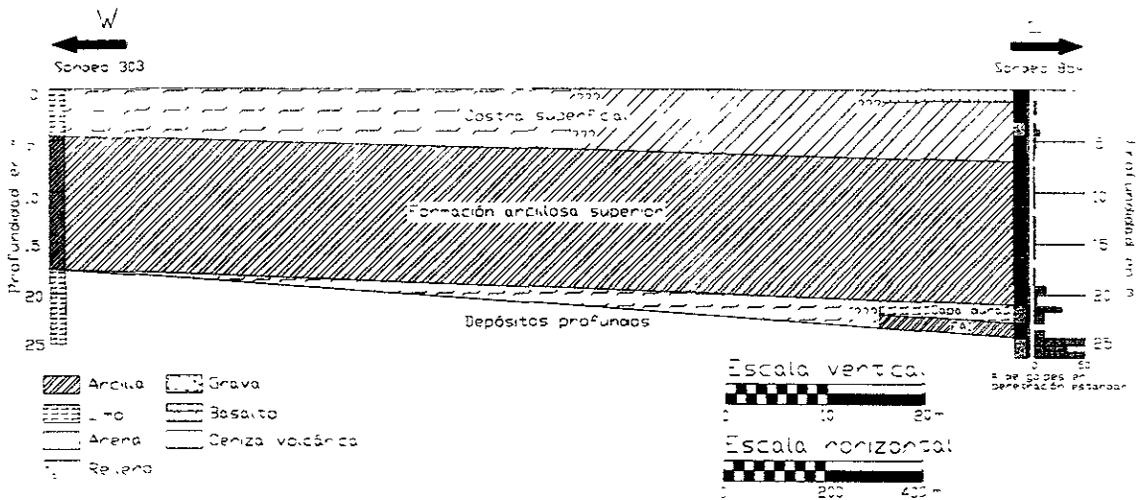


Corte estratigráfico #6

Corte estratigráfico #6. El eje transversal se encuentra localizado, de acuerdo con el mapa del reglamento, en la Zona II. La estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación.

Estrato	Espesor, en m (valores promedio)
Costra superficial	4.5 a 7.5
Formación arcillosa superior	12
Capa dura	-----
Formación arcillosa inferior	-----

Estratigrafía corte #6

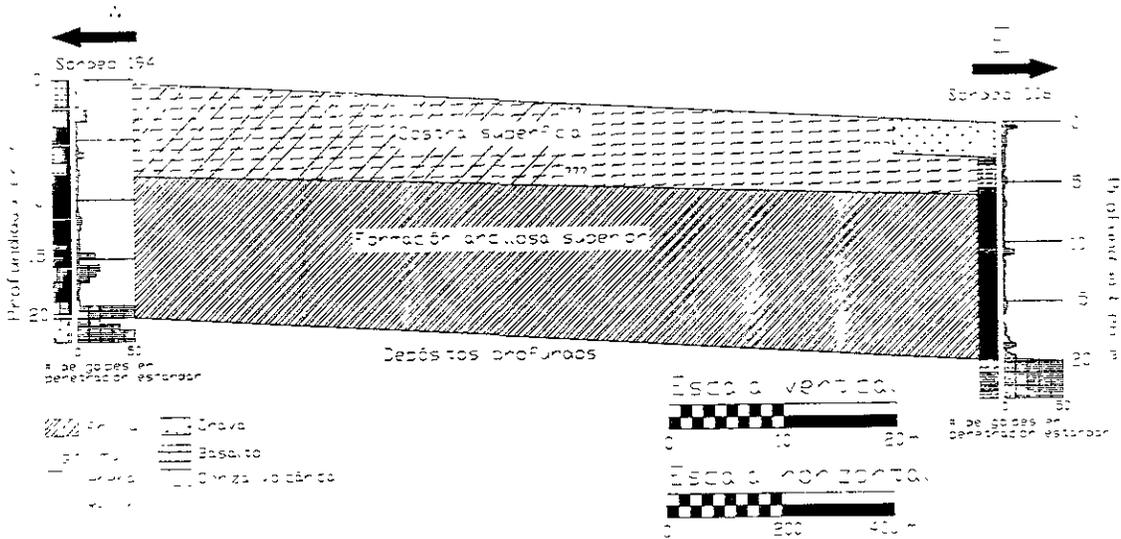


Corte estratigráfico #7

Corte estratigráfico #7. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona II y III. La estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y de la Ciudad de México. En el sondeo 303, que pertenece a la Zona II, la FAS se encuentra en contacto directo con los depósitos profundos a una profundidad de 17.5m, mientras que en el sondeo 854, que pertenece a la Zona III, los depósitos profundos subyacen la FAI y la capa dura a una profundidad de 24m. No es posible intuir donde termina la Zona III y donde empieza la Zona II, debido a la gran distancia que separa los sondeos.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	4.5 a 7.0
Formación arcillosa superior	13.5
Capa dura	1.8
Formación arcillosa inferior	1.4

Estratigrafía corte #7



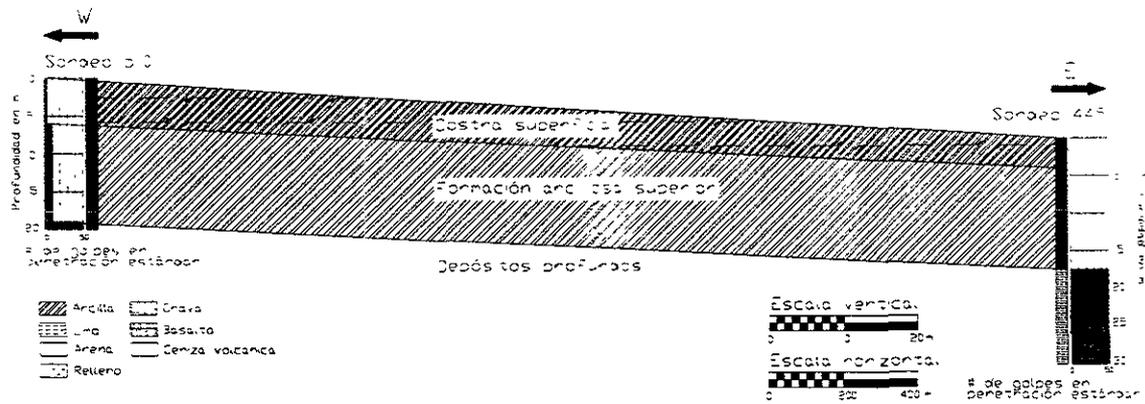
Corte estratigráfico #8

Corte estratigráfico #8. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento, en Zona II y III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación. Esta zona pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y de la Ciudad de México; donde el reglamento señala que existe incertidumbre en la zonificación.

Debido a que los sondeos no son muy profundos se pudiera pensar que subyaciendo a la FAS se encuentran la capa dura y la FAI, pero, tomando como apoyo el sondeo 445 del corte #3, se observa que no es así, por lo que, de acuerdo con las definiciones del reglamento, este corte pertenece a la Zona II, ya que los depósitos profundos se encuentran a menos de 20m.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	7
Formación arcillosa superior	12.5
Capa dura	-----
Formación arcillosa inferior	-----

Estratigrafía corte #8



Corte estratigráfico #9

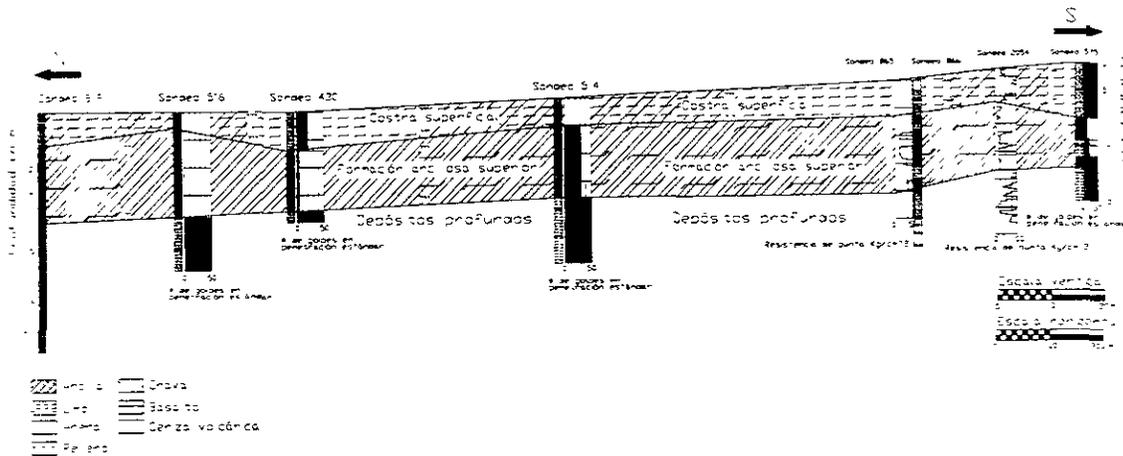
Corte estratigráfico #9. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zonas II y III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación. Esta zona pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y la Ciudad de México, donde el reglamento señala que existe incertidumbre en la zonificación, pero como los depósitos profundos se encuentran a menos de 20m, este corte pertenece a la Zona II.

Los depósitos profundos, en este caso pueden ser principalmente producto de los acarrees fluviales del Cerro de la Estrella y de los depósitos aluviales de la Sierra de las Cruces.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	5
Formación arcillosa superior	13
Capa dura	-----
Formación arcillosa inferior	-----

Estratigrafía corte #9

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

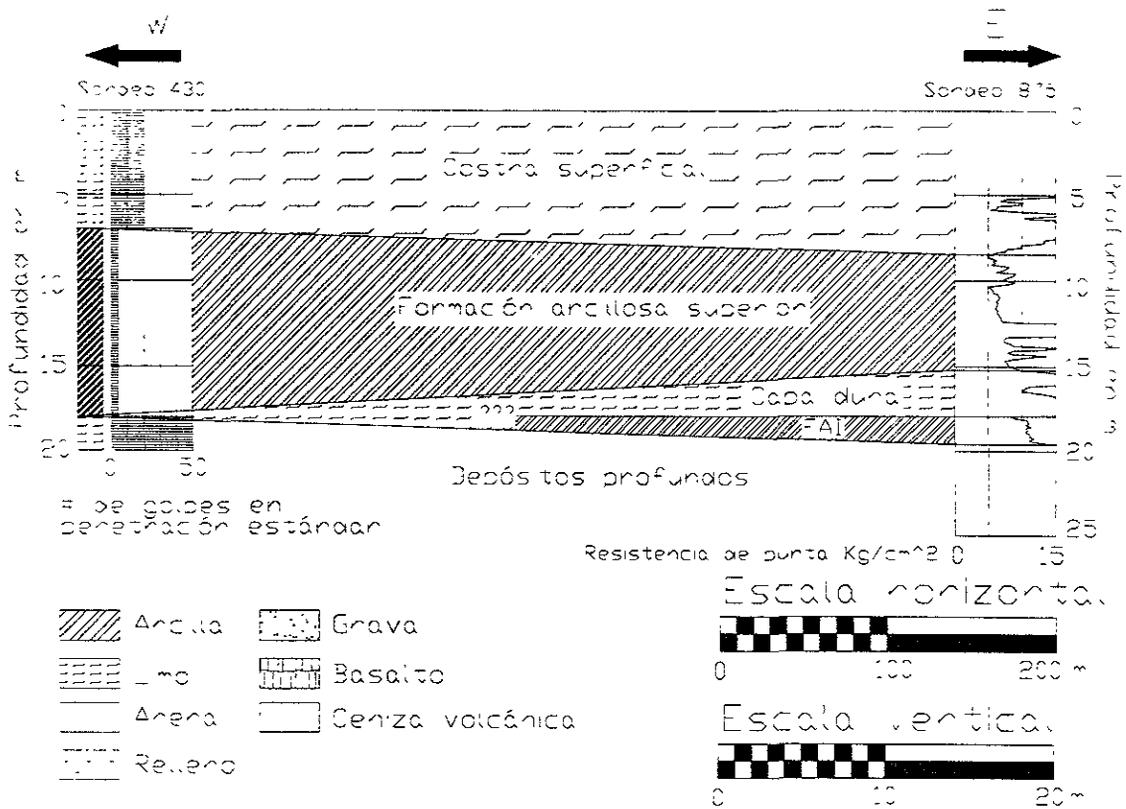


Corte estratigráfico #10

Corte estratigráfico #10. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona II. La estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	3 a 10
Formación arcillosa superior	9 a 16
Capa dura	-----
Formación arcillosa inferior	-----

Estratigrafía corte #10

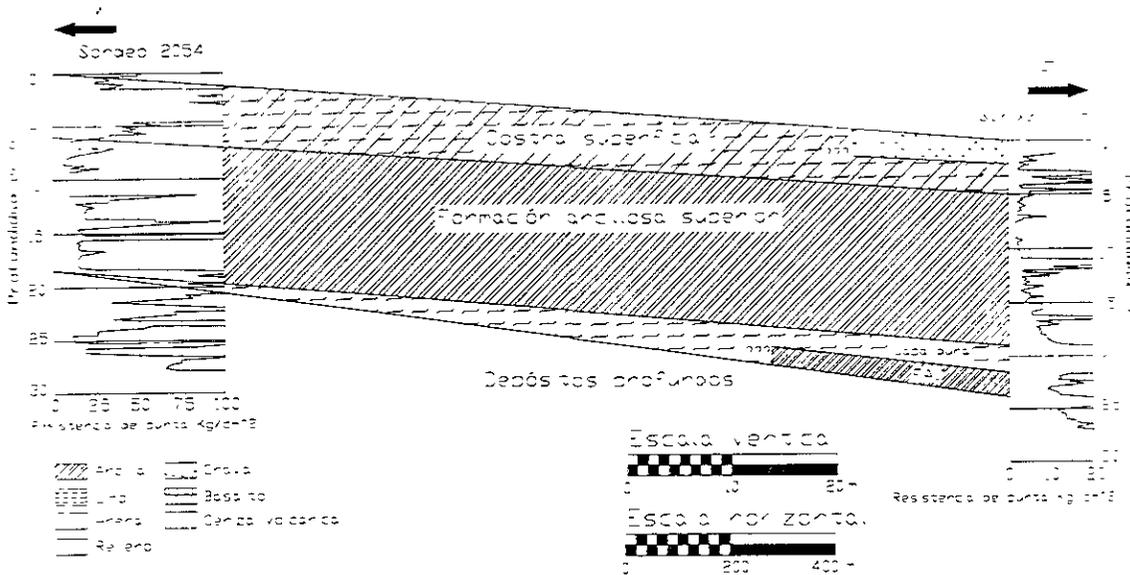


Corte estratigráfico #11

Corte estratigráfico #11. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona II y III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y de la Ciudad de México. Es evidente la existencia de un lago debido al espesor del depósito arcilloso y a la baja resistencia de número de golpes y de penetración de cono, pero a lo largo de este corte tenemos, en un caso que la FAS está en contacto directo con los depósitos profundos, es decir, la FAI no logra formarse, en el otro caso la FAI si se logra formar pero los depósitos profundos se encuentran a una profundidad menor de 20m, por lo que según las definiciones del reglamento, este corte pertenece a la Zona II.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	7.7
Formación arcillosa superior	6.8 a 11.0
Capa dura	2.7
Formación arcillosa inferior	1.7

Estratigrafía corte #11



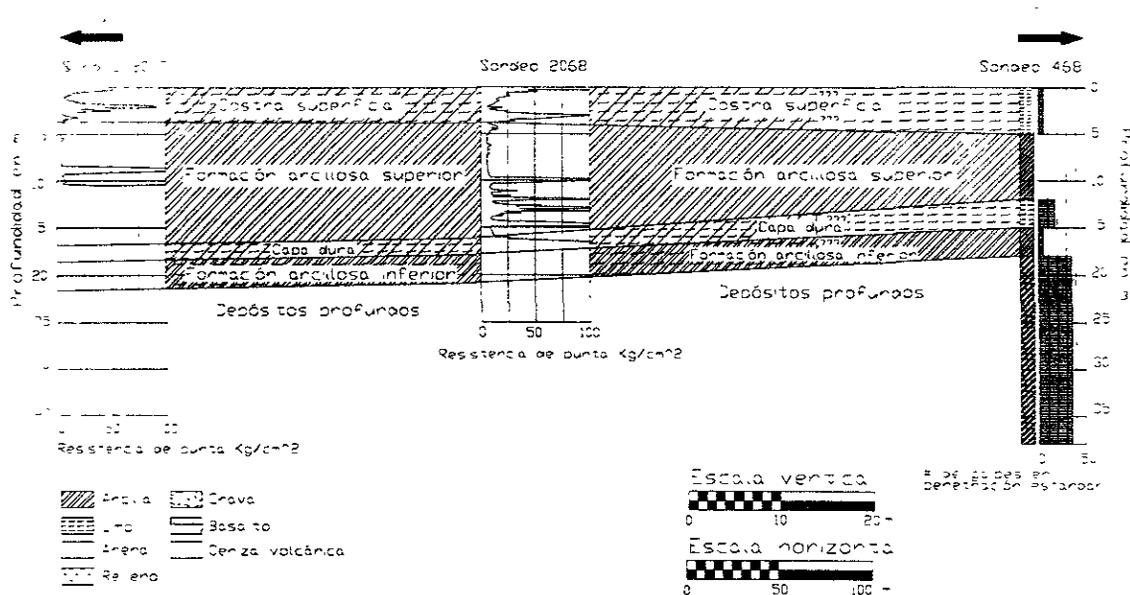
Corte estratigráfico #12

Corte estratigráfico #12. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas II y III. La estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece a la antigua transición entre los lagos de Xochimilco y de la Ciudad de México. En el sondeo 2054, que pertenece a la Zona II, la FAS se encuentra en contacto directo con los depósitos profundos a una profundidad de 18.4m, mientras que en el sondeo 2083 que pertenece a la Zona III, se encuentran los depósitos profundos subyaciendo a la FAI y a la capa dura a una profundidad de 23.8m. Los sondeos de cono muestran que, en esta zona, existe gran cantidad de lentes duros intercalados en la FAI.

No es posible intuir donde termina la Zona III y donde empieza la Zona II, debido a la gran distancia que separa los sondeos.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	5.5
Formación arcillosa superior	13.0
Capa dura	2.5
Formación arcillosa inferior	2.3

Estratigrafía corte #12

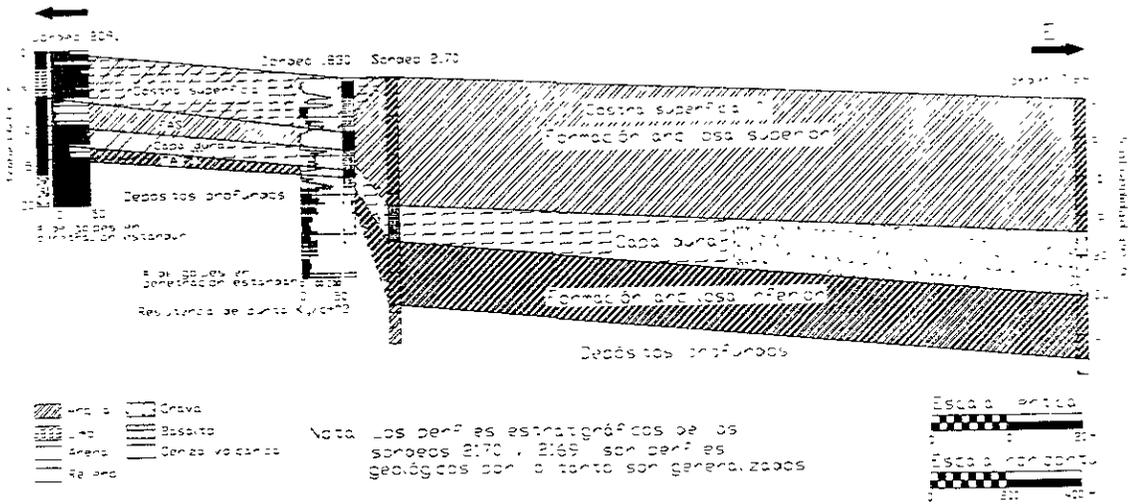


Corte estratigráfico #13

Corte estratigráfico #13. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece al antiguo lago de Xochimilco. La estratigrafía del sondeo 468 lo ubica en Zona II, pero los sondeos de cono indican que es Zona III. Desgraciadamente no se tiene mas información que pudiera confirmar la zonificación.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	3.7 a 5
Formación arcillosa superior	7 a 13.2
Capa dura	3.0 a 1.7
Formación arcillosa inferior	3.0

Estratigrafía corte #13



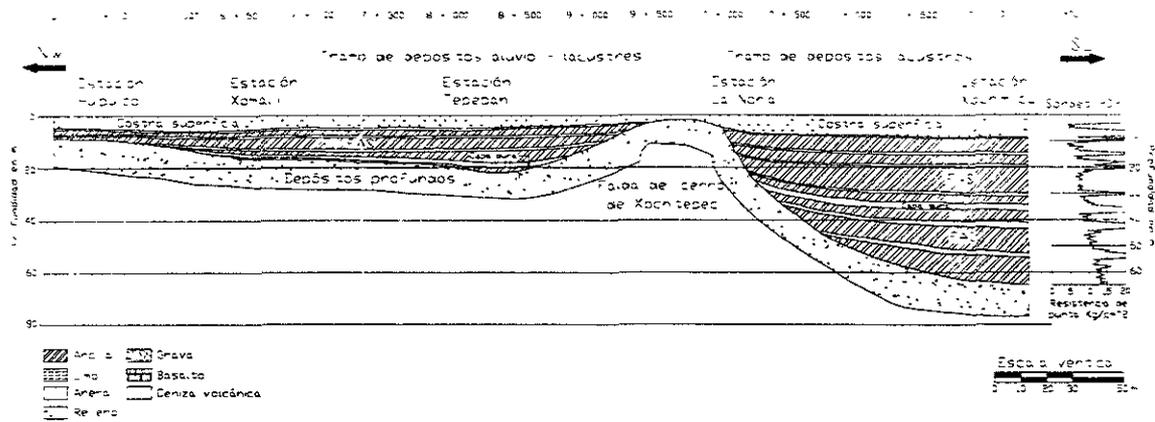
Corte estratigráfico #14

Corte estratigráfico #14. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I y Zona III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece al antiguo lago de Xochimilco. Desgraciadamente no se cuenta con el contenido de agua para la FAS y FAI que se extiende entre los sondeos 2091 y 1830, pero debe ser alto debido a la baja resistencia que presentan. De acuerdo con el mapa del reglamento, estos dos sondeos pertenecen a la Zona I, pero según su estratigrafía pertenecen a la Zona II.

El sondeo 2170 según el reglamento se encuentra en Zona I, pero según su estratigrafía se localiza en Zona III. Las grandes pendientes entre los estratos de los sondeos 1830 y 2170, se deben a la escala con que se representó el corte y a que el perfil del sondeo 2170, fue obtenido de un perfil geológico el cual presenta una estratigrafía muy general. La línea virtual que delimita la Zona II y la Zona III, se encuentra precisamente entre estos dos sondeos, la cual puede ser ubicada arbitrariamente en la distancia media que separa los sondeos.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	5.8
Formación arcillosa superior	2.5 a 17
Capa dura	2.5 a 8
Formación arcillosa inferior	1.2 a 8

Estratigrafía corte #14

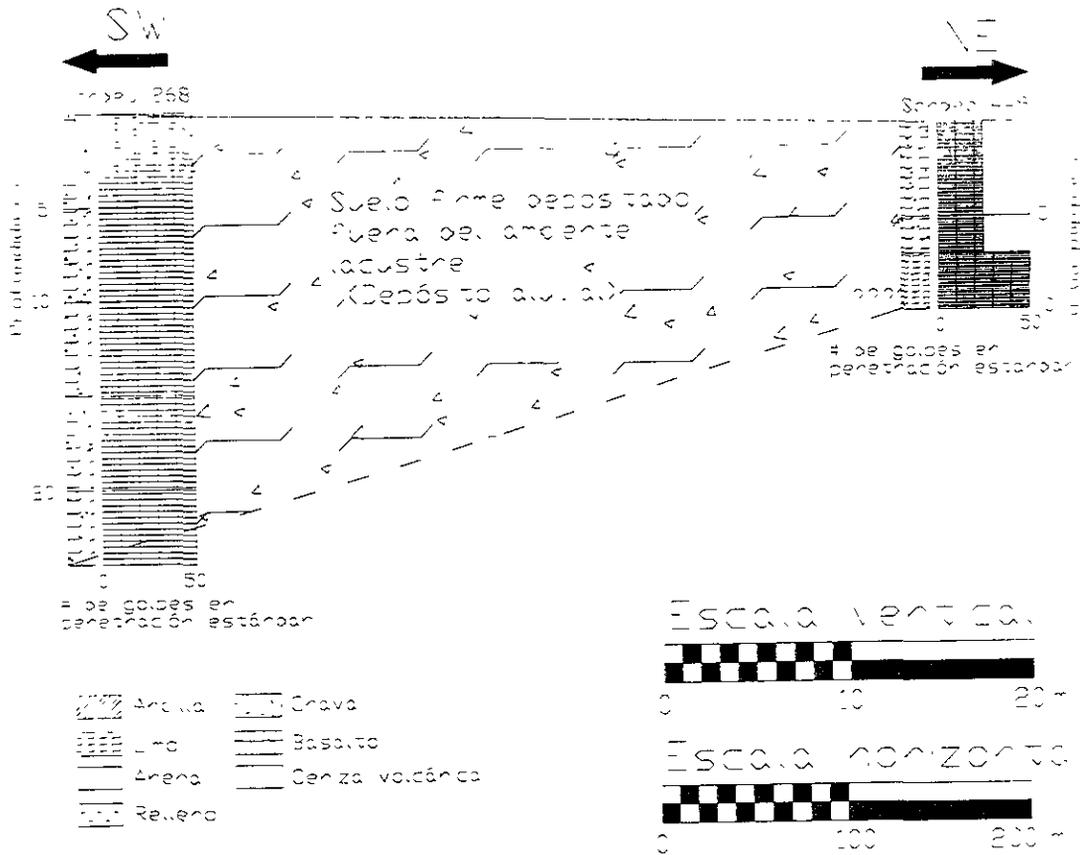


Corte estratigráfico #15

Corte estratigráfico #15. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I, Zona II y Zona III, este corte fue elaborado por TGC y representa la estratigrafía general a lo largo de la línea del tren ligero Huipulco-Xochimilco. Es interesante la presencia de la falda del cerro de Xochitepec en esta zona; desgraciadamente no fue posible la recopilación de los sondeos que sirvieron para la elaboración del corte.

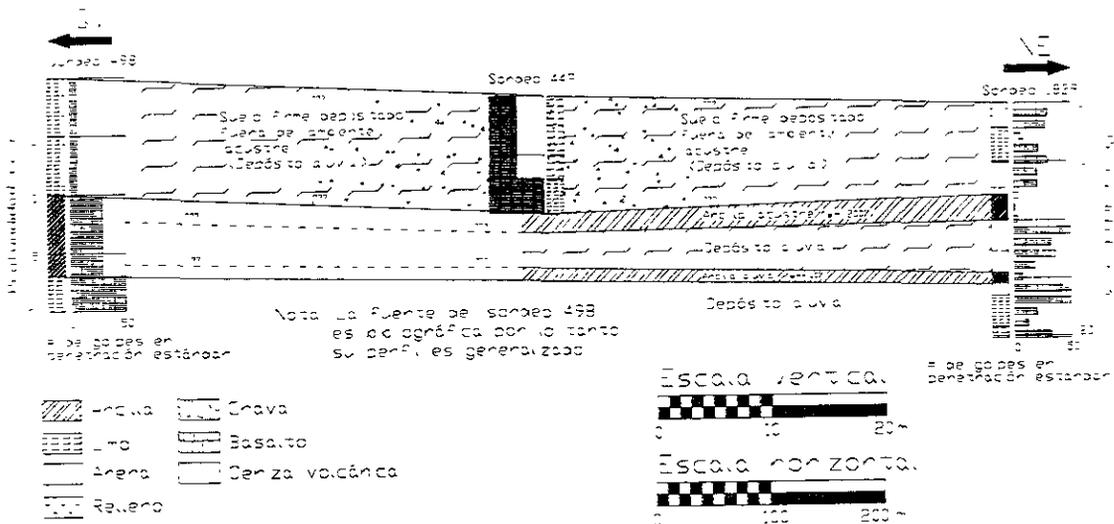
Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	8
Formación arcillosa superior	25
Capa dura	2.8
Formación arcillosa inferior	28

Estratigrafía corte #15 (Tramo de depósitos lacustres)



Corte estratigráfico #16

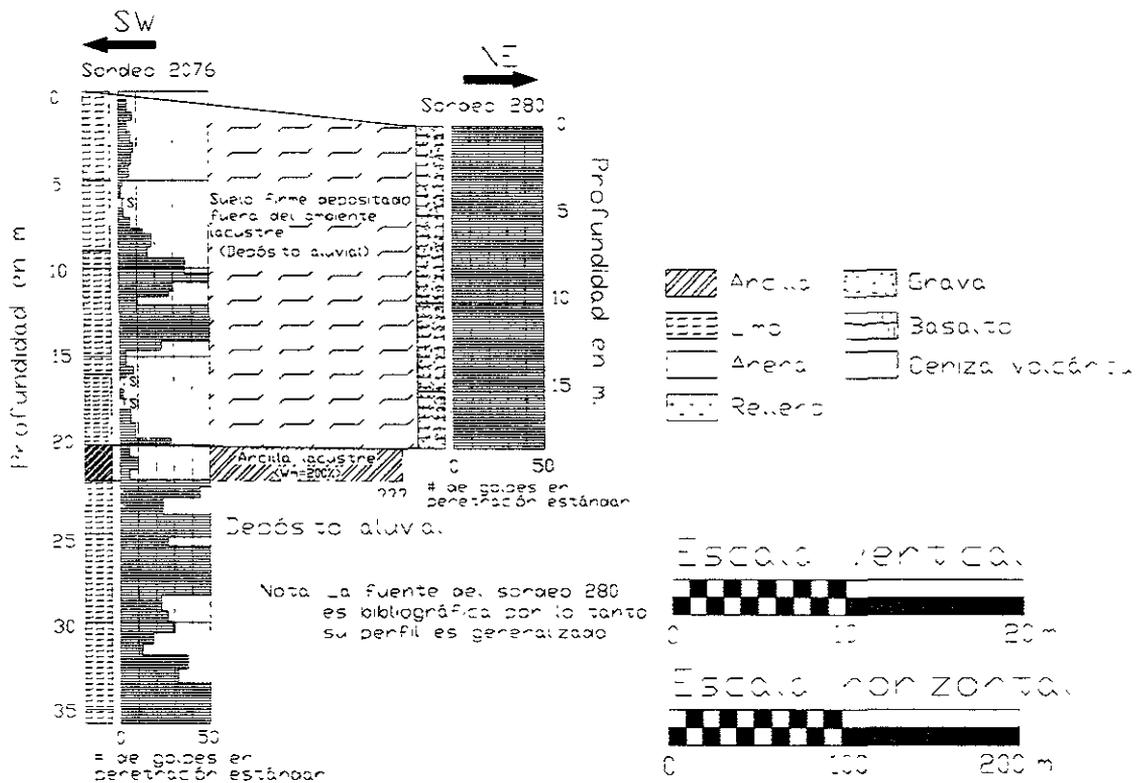
Corte estratigráfico #16. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I. La estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación.



Corte estratigráfico #17

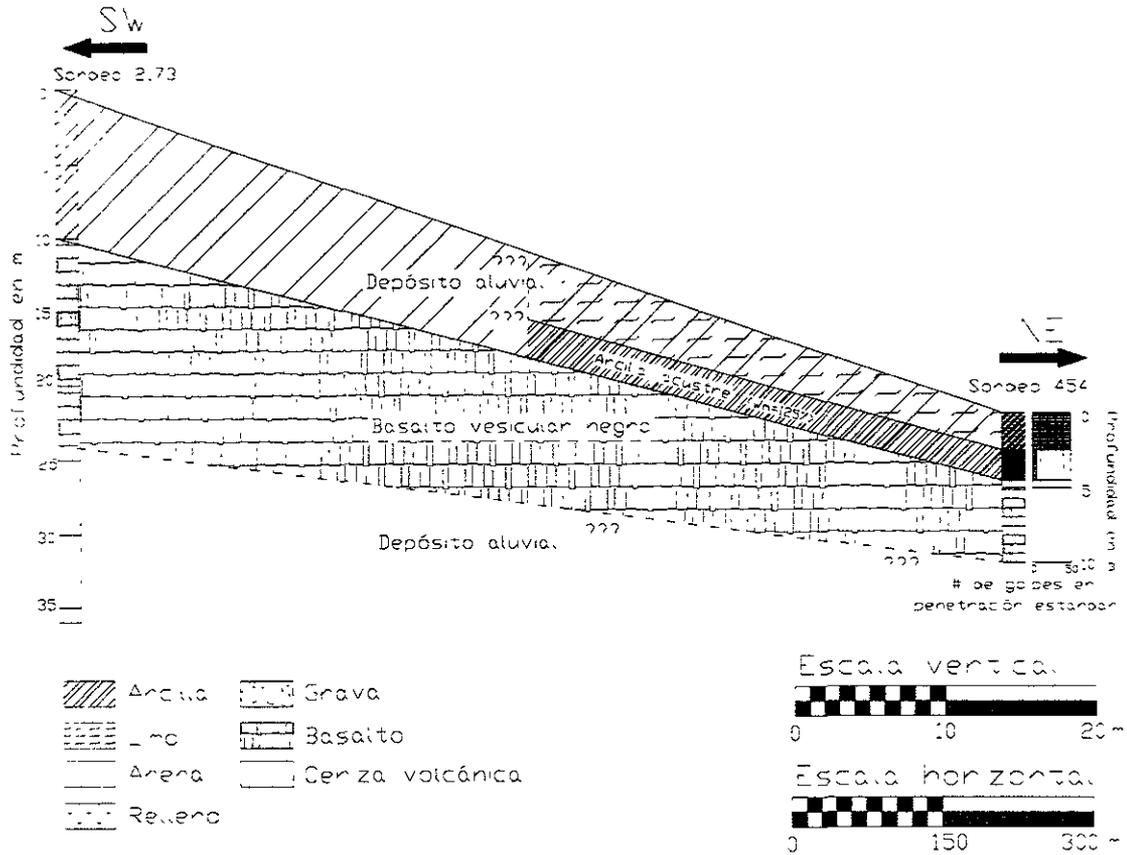
Corte estratigráfico #17. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La estratigrafía del sondeo 1829 lo ubica en Zona II, el sondeo 449 desgraciadamente no es lo suficientemente profundo, por lo que no se puede definir la zona geotécnica y la estratigrafía del sondeo 498 solamente se conoce muy general, debido a que su fuente es bibliográfica.

Las líneas punteadas indican la posible continuidad de los estratos del sondeo 1829.



Corte estratigráfico #18

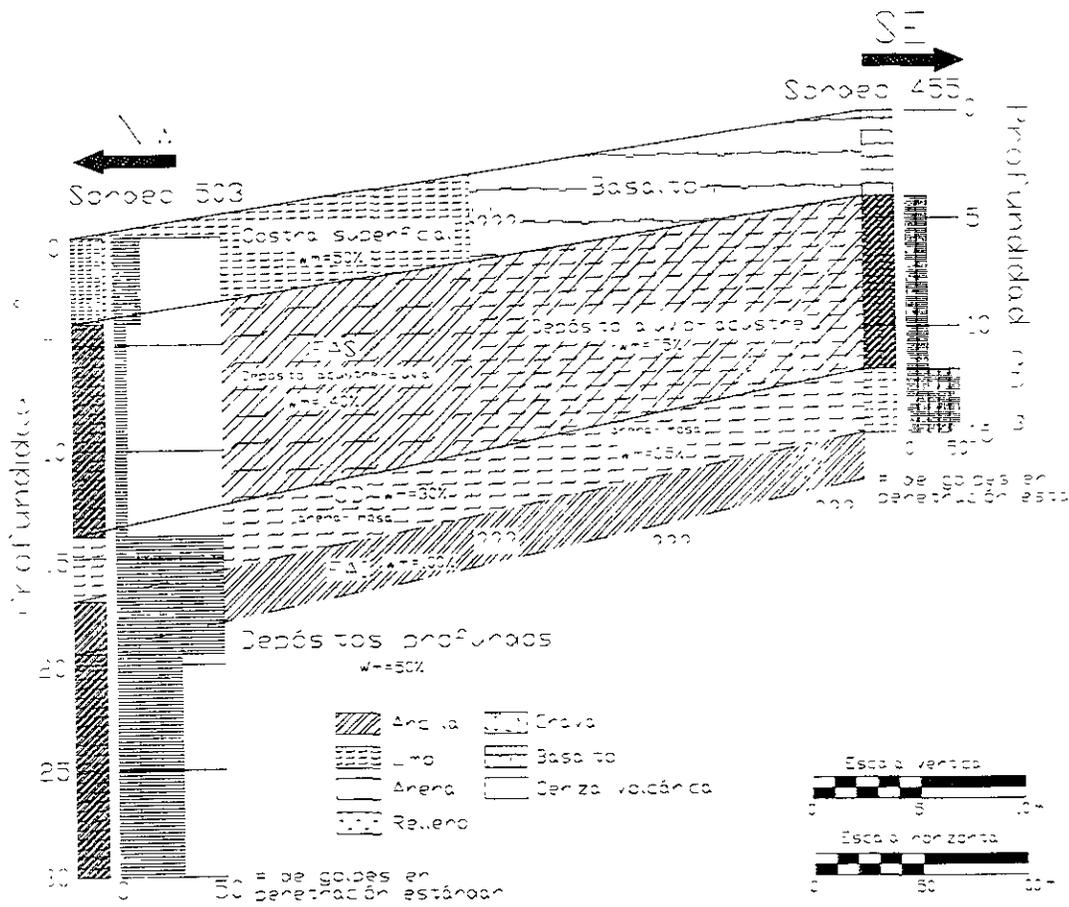
Corte estratigráfico #18. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas I y II, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La estratigrafía del sondeo 2076 lo ubica en Zona II, el sondeo 280 no es profundo pero debido a su localización, se puede inferir que también pertenece a la Zona II, por lo que, de acuerdo con las definiciones del reglamento, el corte se encuentra en la Zona II.



Corte estratigráfico #20

Corte estratigráfico #20. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas I, II y III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación (ver plano de localización). La estratigrafía del corte corresponde a las Zonas I y II. El basalto que presenta el corte no forma parte de los derrames del Xitle, pertenece a un evento volcánico más antiguo.

No es posible intuir donde termina la Zona II y donde empieza la Zona I, debido a la gran distancia que separa los sondeos.

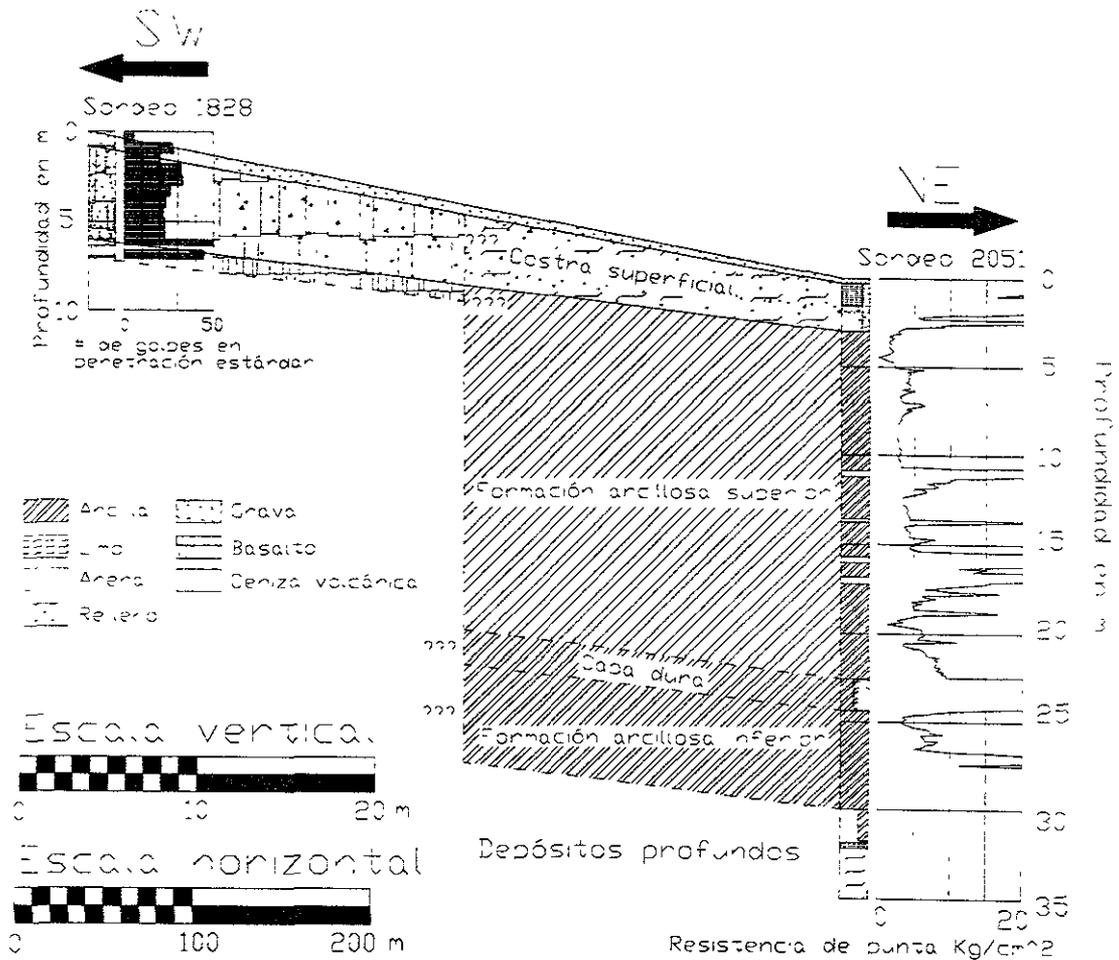


Corte estratigráfico #21

Corte estratigráfico #21. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en la Zona III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La estratigrafía del corte corresponde a la Zona II. El basalto que presenta el corte no forma parte de los derrames del Xitle, pertenece a un evento volcánico más antiguo. Las líneas punteadas indican la posible continuidad de la FAI.

Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	4
Formación arcillosa superior	10
Capa dura	3
Formación arcillosa inferior	2.5

Estratigrafía corte #21



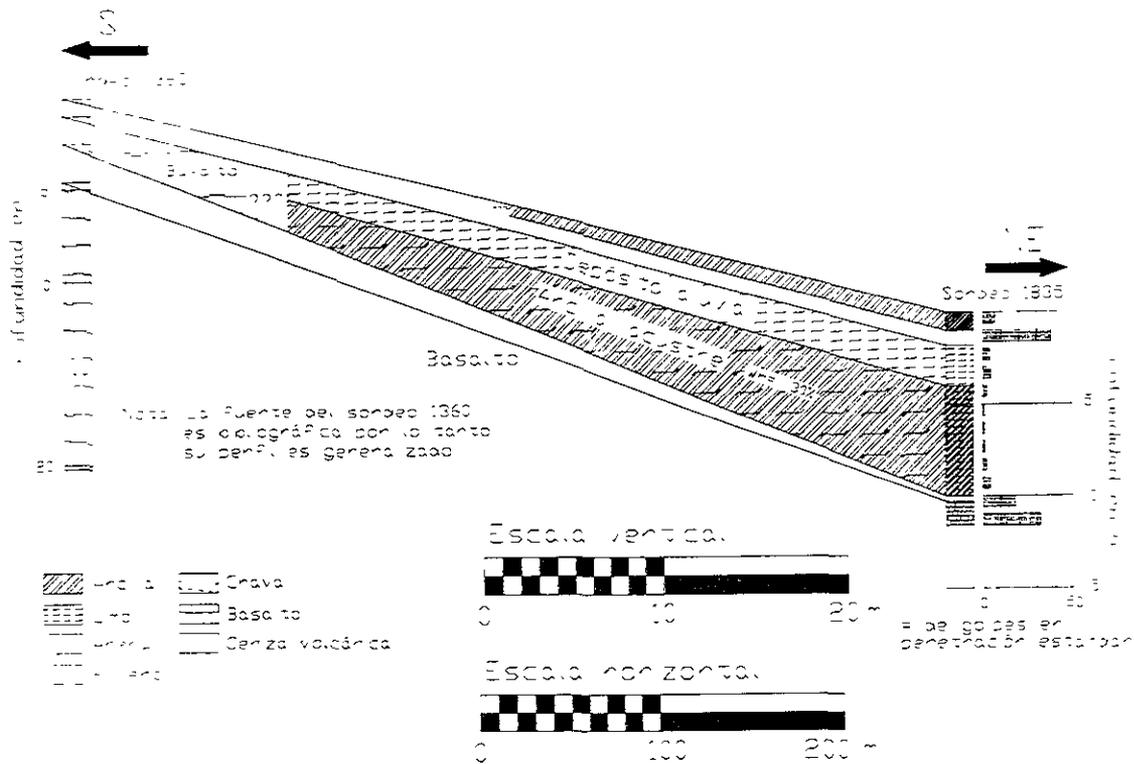
Corte estratigráfico #22

Corte estratigráfico #22. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona II y Zona III, la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. La zona lacustre en la que se encuentra pertenece al antiguo lago de Xochimilco. El sondeo 1828 muestra la posible culminación de una colada de lava, este basalto no forma parte de los derrames del Xitle, pertenece a un evento volcánico más antiguo.

La línea virtual que limita a la Zona II de la Zona III se encuentra precisamente entre estos dos sondeos, la cual puede ser ubicada arbitrariamente en la distancia media que separa a los sondeos.

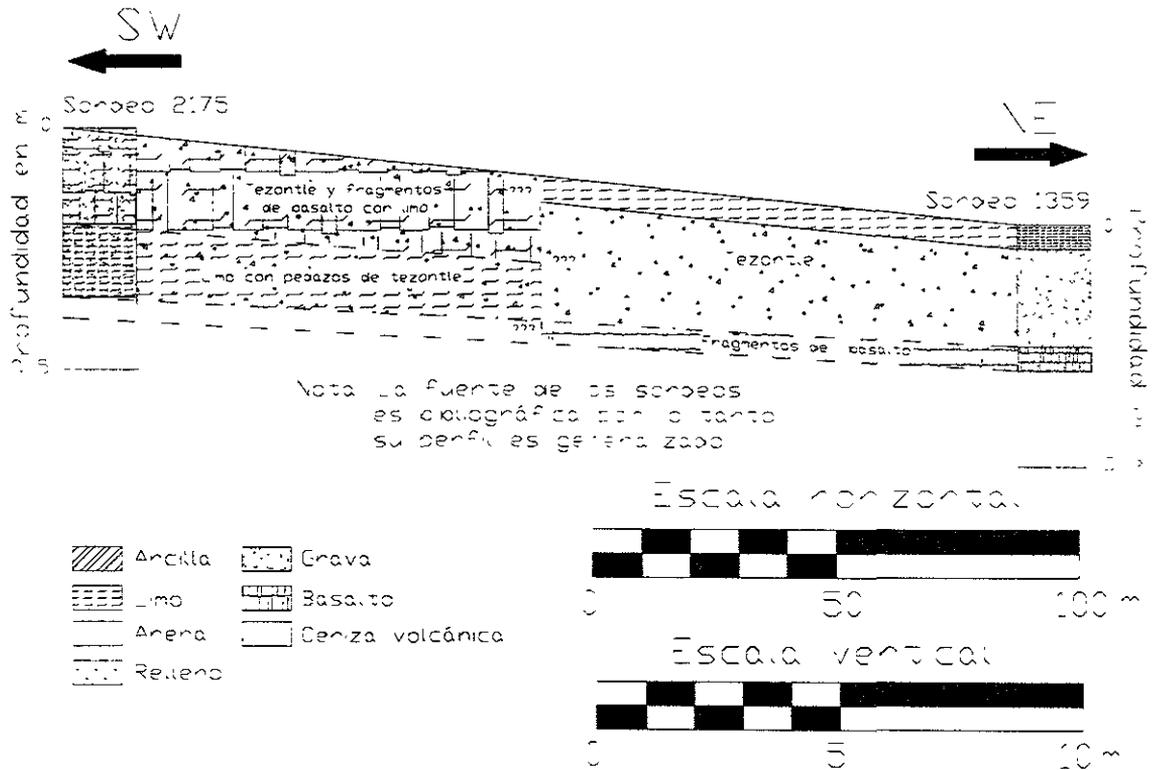
Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	3.0
Formación arcillosa superior	19.6
Capa dura	1.8
Formación arcillosa inferior	5.6

Estratigrafía corte #22



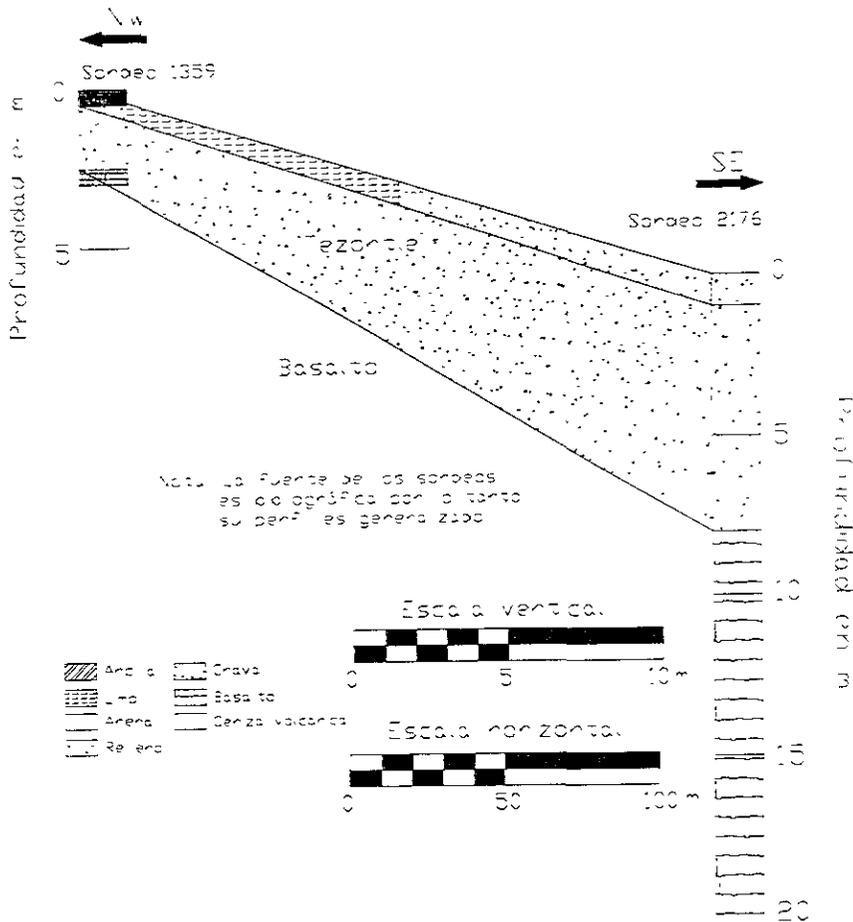
Corte estratigráfico #23

Corte estratigráfico #23. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas I y II, la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. El basalto que se encuentra en el corte, no forma parte de los derrames del Xitle, pertenece a un evento volcánico más antiguo, la arcilla lacustre del sondeo 1835 se debe al antiguo lago de Xochimilco y los depósitos aluviales a la Sierra del Chichinautzin.



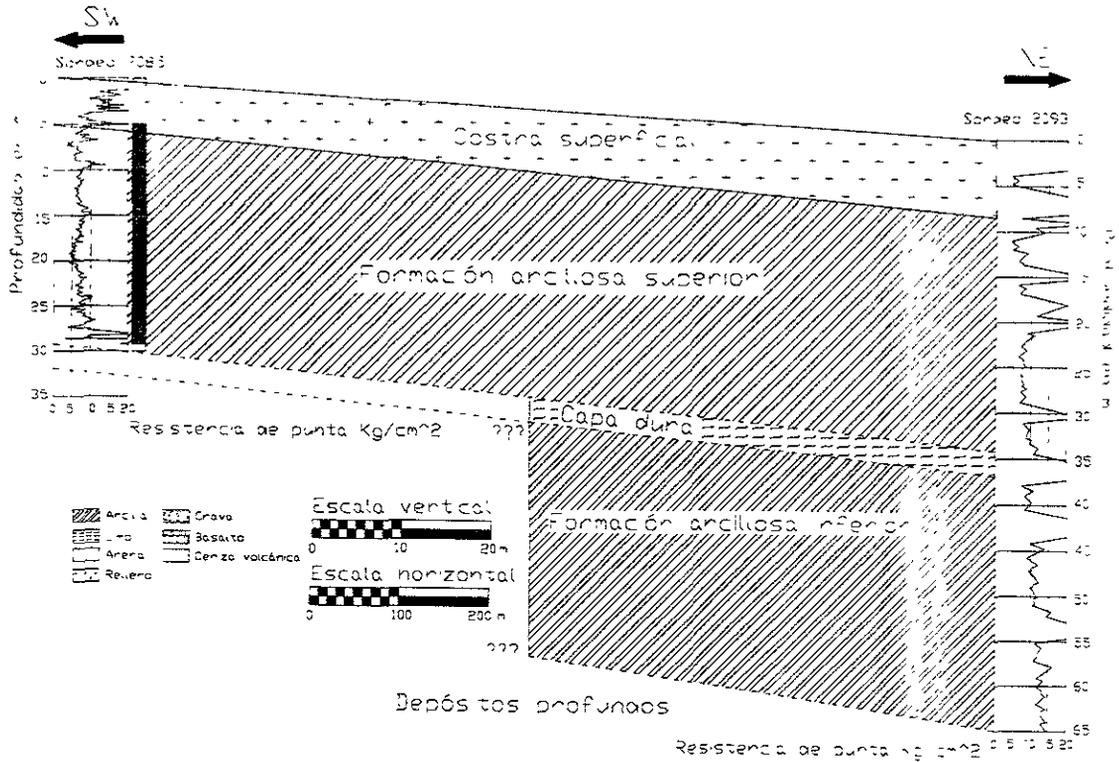
Corte estratigráfico #24

Corte estratigráfico #24. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas I y II. Los sondeos no son profundos por lo tanto, no se puede corroborar su zona geotécnica. El basalto que se encuentra en el corte, no forma parte de los derrames del Xitle, pertenece a un evento volcánico más antiguo. Las líneas punteadas indican la posible continuidad de basalto.



Corte estratigráfico #25

Corte estratigráfico #25. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas I y II. El sondeo 2176 según el reglamento se debería encontrar en Zona II, pero de acuerdo con su estratigrafía se localiza en Zona I, por lo tanto el corte se encuentra en Zona I. El basalto que se encuentra en el corte, no forma parte de los derrames del Xitle, probablemente pertenece a la Sierra de Xochitepec.

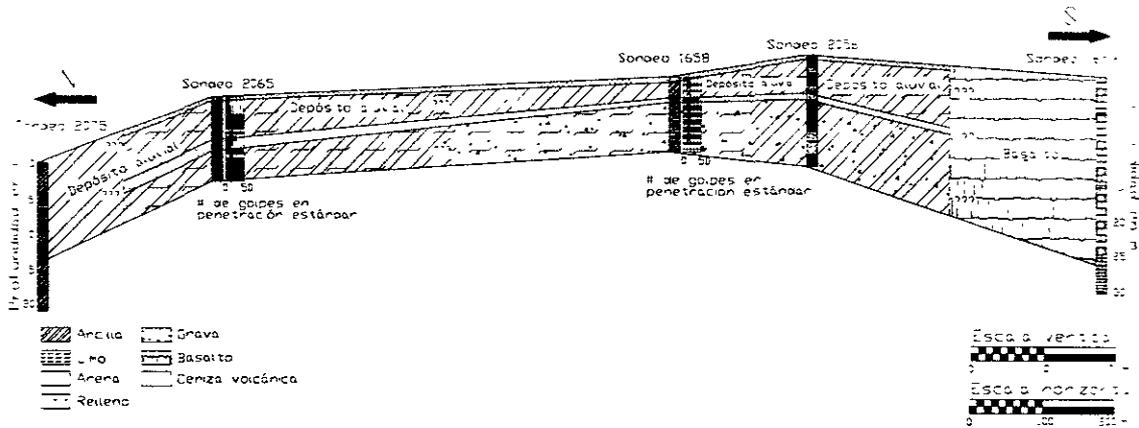


Corte estratigráfico #26

Corte estratigráfico #26. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas II y III, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. El sondeo 2085 según el reglamento se debería encontrar en Zona II, pero de acuerdo con su estratigrafía se localiza en Zona III. La zona lacustre en la que se encuentra el corte pertenece al antiguo lago de Xochimilco. La línea punteada indica la posible continuidad de la capa dura.

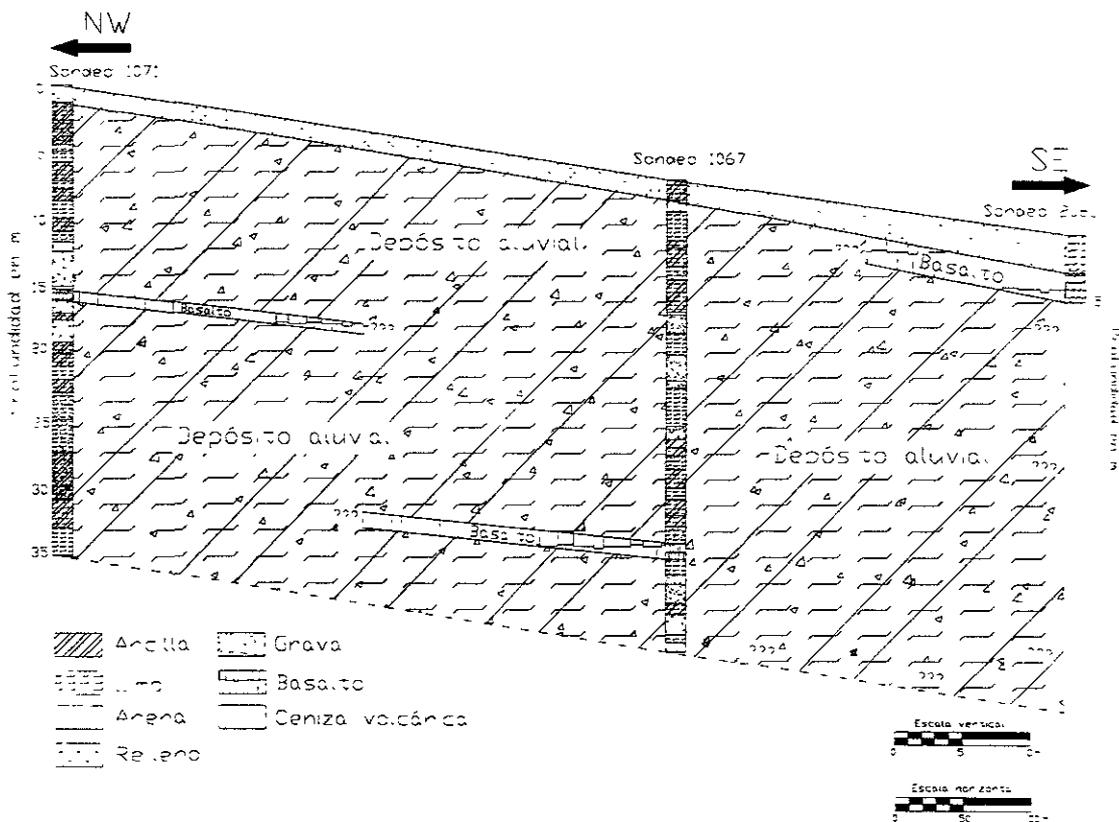
Estrato	Espesor, en m (valores medios)
Costra superficial	6.5
Formación arcillosa superior	25.0
Capa dura	2.7
Formación arcillosa inferior	28.0

Estratigrafía corte #26



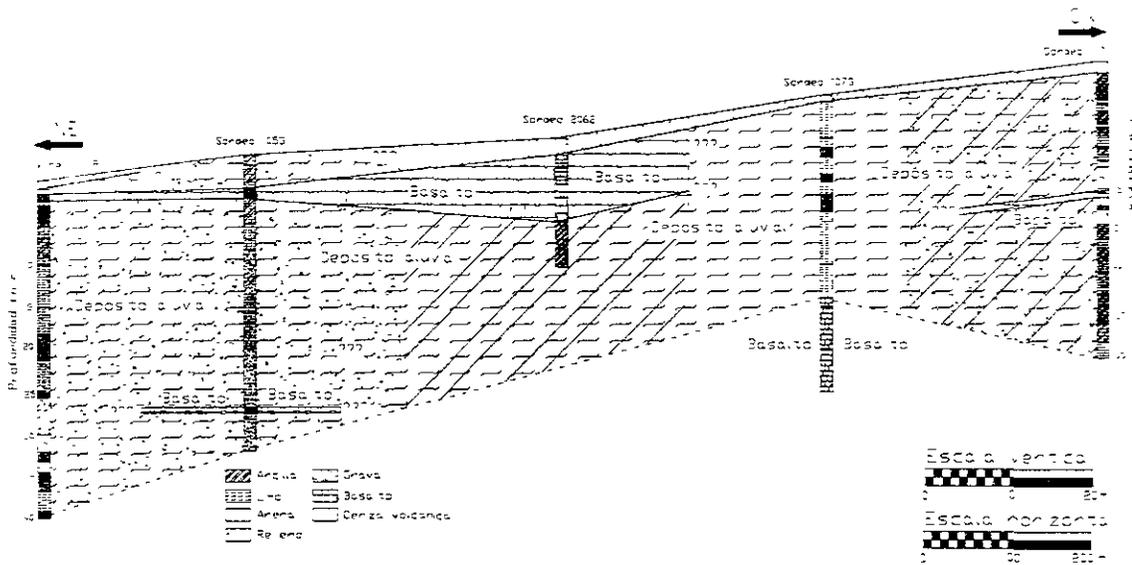
Corte estratigráfico #28

Corte estratigráfico #28. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en la Zona I; la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. El basalto del sondeo 1659 forma parte de los derrames del Xitle, subyaciendo al derrame se encuentra limo arenoso de la formación Tarango, la colada de lava se va perdiendo conforme se avanza hacia el Norte, hasta encontrarse con los depósitos aluviales provenientes de la Sierra de las Cruces.



Corte estratigráfico #29

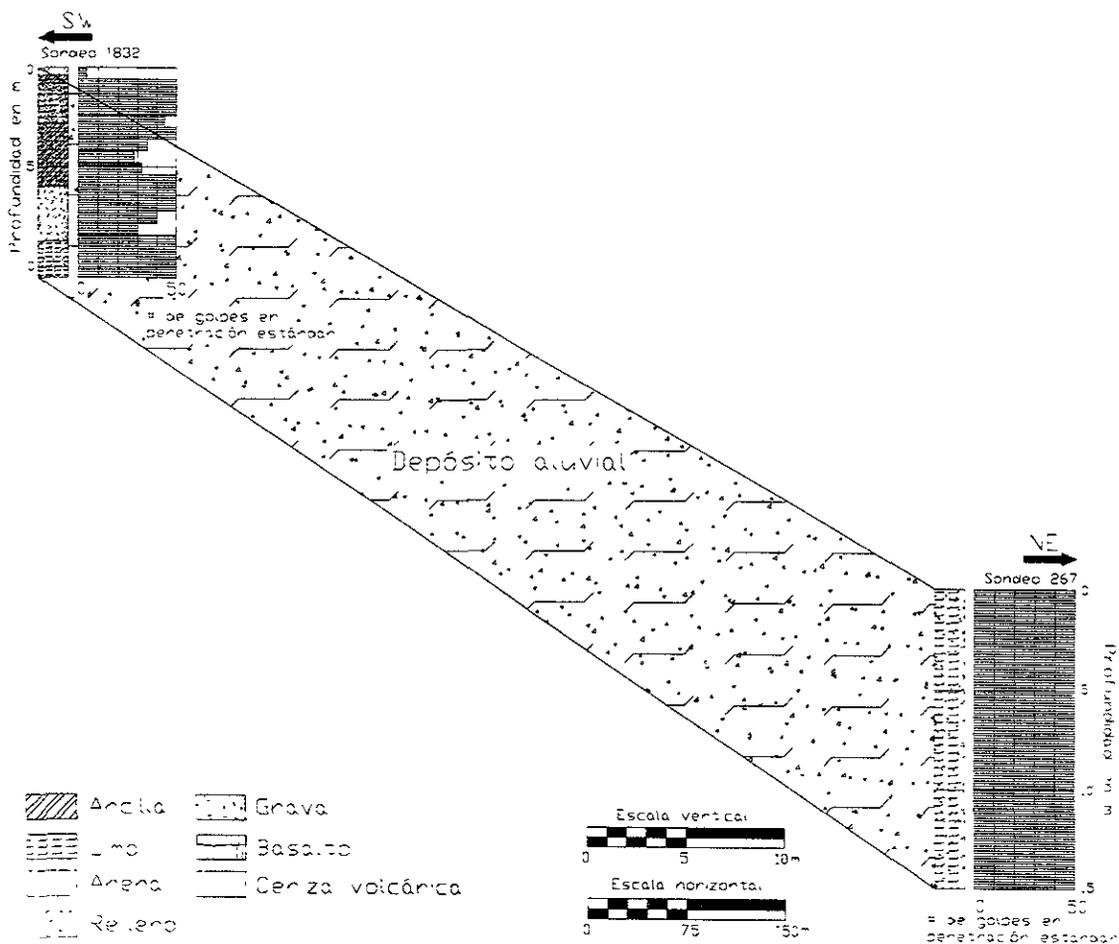
Corte estratigráfico #29. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en la Zona I; la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. Los lentes de basalto forman parte de los derrames del Xitle y están intercalados entre los depósitos aluviales provenientes de la Sierra de las Cruces.



Corte estratigráfico #30

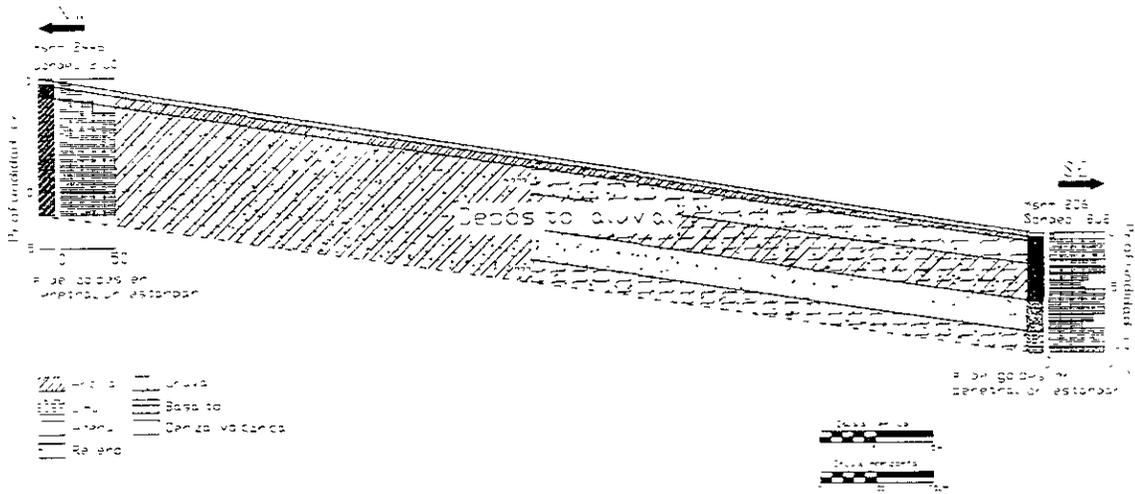
Corte estratigráfico #30. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en las Zonas I y II, pero la estratigrafía del corte no concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación. Los sondeos 2181, 1053 y 2062 según el reglamento se encuentran en Zona II, pero de acuerdo a su estratigrafía se localizan en Zona I, el número medio de golpes para estos sondeos es 50 y el contenido de agua 50%. El basalto que se encuentra en el corte forma parte de los derrames del Xitle, intercalados entre los depósitos aluviales provenientes de la Sierra de las Cruces.

Corte estratigráfico #33. El eje se encuentra localizado fuera del mapa del reglamento. Los sondeos no son profundos, pero la estratigrafía que presentan, corresponde a la Zona I, formada por depósitos aluviales de la Sierra de las Cruces.



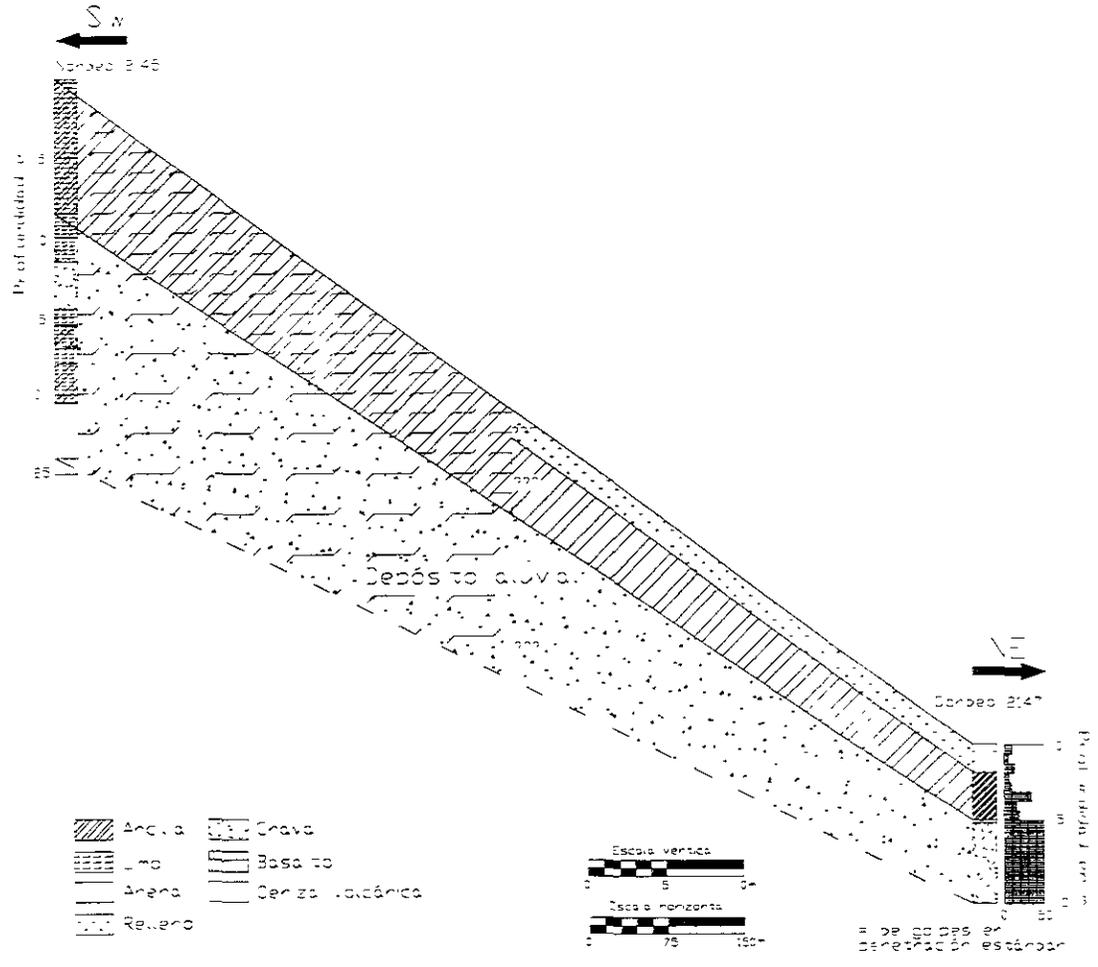
Corte estratigráfico #34

Corte estratigráfico #34. El eje se encuentra localizado fuera del mapa del reglamento. Los sondeos no son profundos, pero la estratigrafía del corte corresponde a la Zona I, formada por depósitos aluviales provenientes de la Sierra de las Cruces.



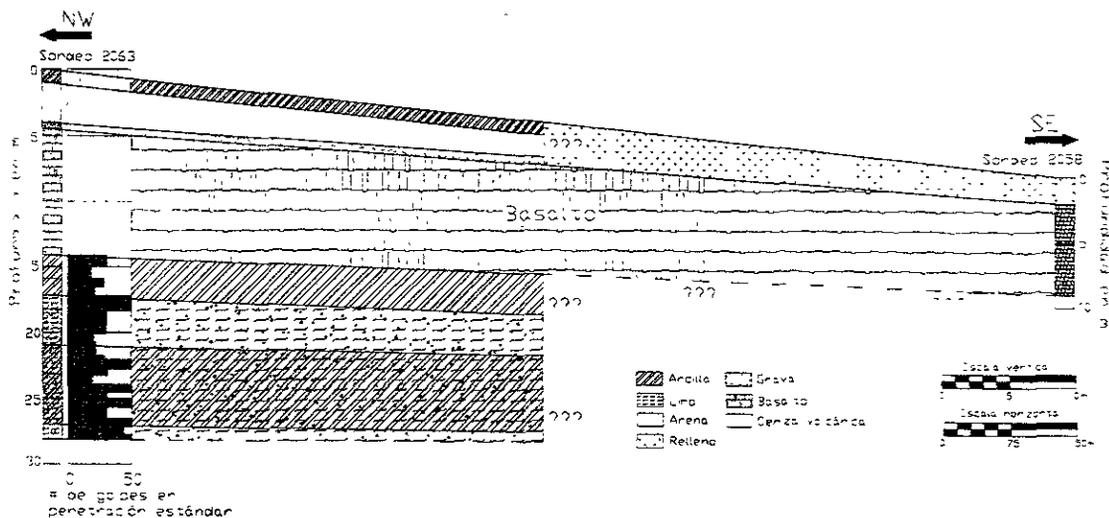
Corte estratigráfico #35

Corte estratigráfico #35. El eje se encuentra localizado fuera del mapa del reglamento. Los sondeos no son profundos, pero la estratigrafía del corte corresponde a la Zona I, formada por depósitos aluviales provenientes de la Sierra de las Cruces.



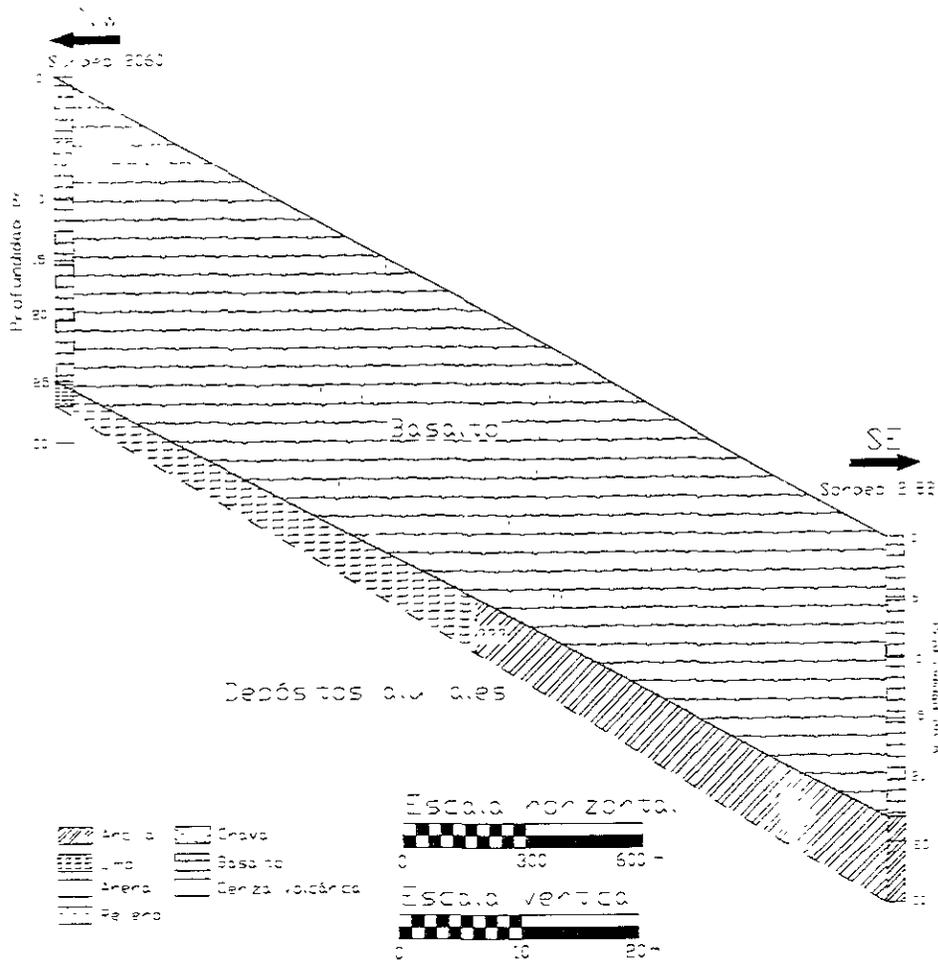
Corte estratigráfico #36

Corte estratigráfico #36. El eje se encuentra localizado fuera del mapa del reglamento. La estratigrafía del corte corresponde a la Zona I, formada por depósitos aluviales provenientes de la Sierra de las Cruces.



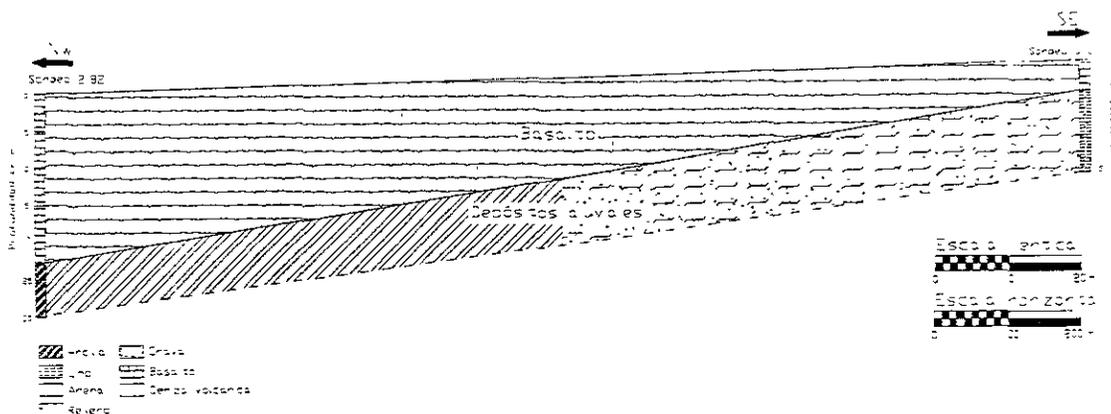
Corte estratigráfico #37

Corte estratigráfico #37. El eje se encuentra localizado fuera del mapa del reglamento. La estratigrafía del corte corresponde a la Zona I, formada por basalto del Xitle y depósitos aluviales de la Sierra de las Cruces, con número de golpes variable de 20 a 50.



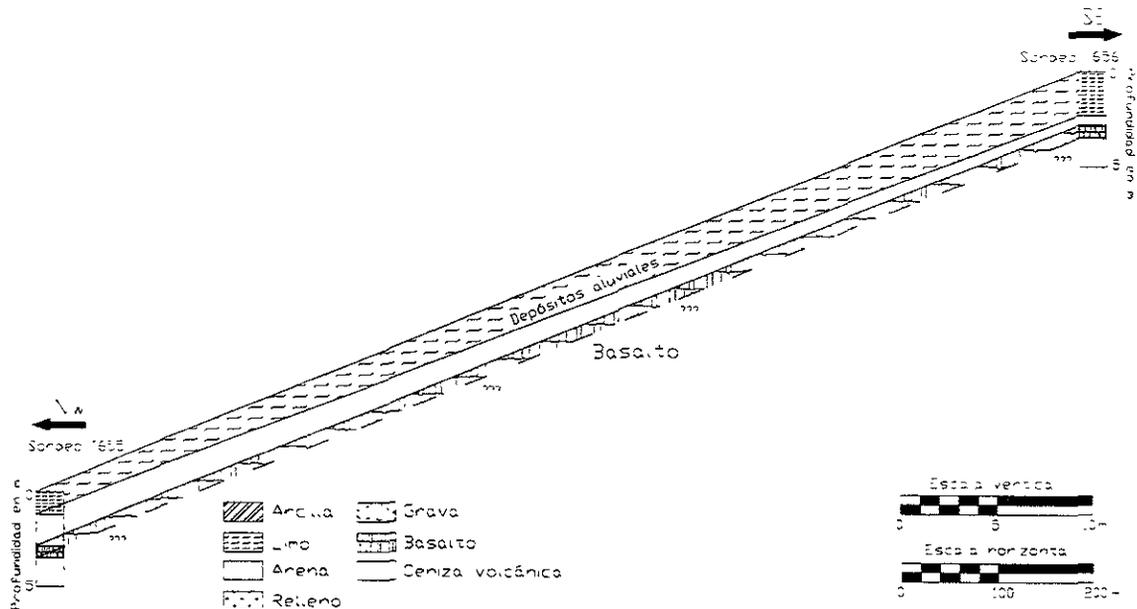
Corte estratigráfico #38

Corte estratigráfico #38. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en la Zona I, la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación, este corte reporta el espesor máximo encontrado para el basalto del Xitle, subyaciendo a los derrames se encuentran los depósitos aluviales de la Sierra de las Cruces.



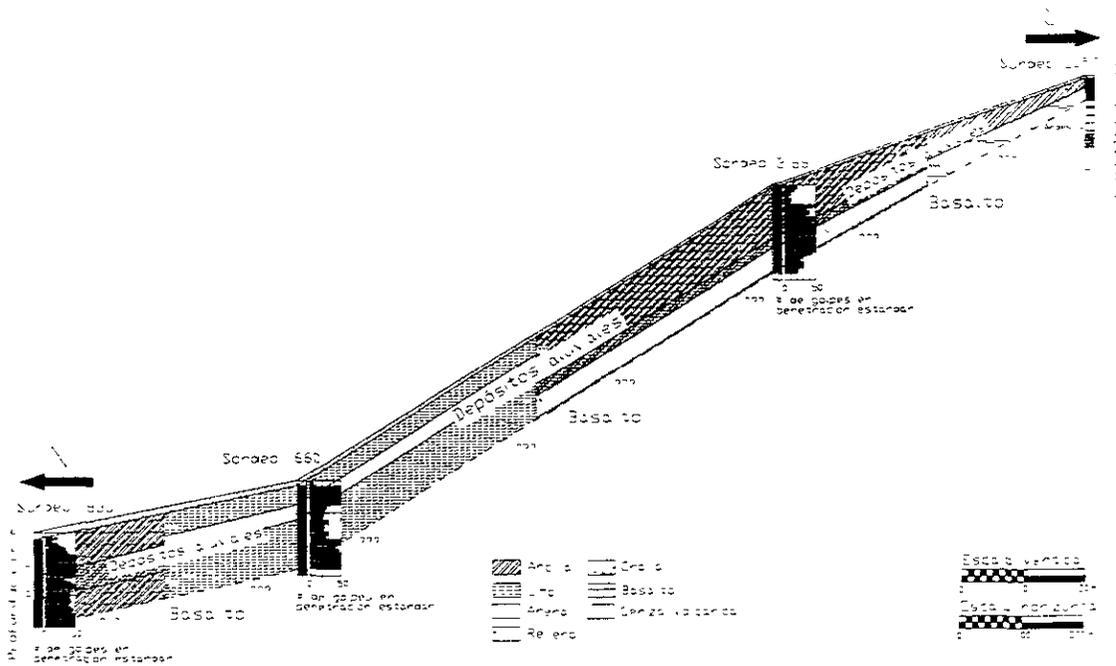
Corte estratigráfico #39

Corte estratigráfico #39. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I, la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación, este corte reporta la variación del espesor de los derrames del Xitle, subyaciendo a los derrames se encuentran depósitos aluviales de la Sierra de las Cruces y probablemente también de la Sierra del Chichinautzin.



Corte estratigráfico #40

Corte estratigráfico #40. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I, los sondeos no son profundos por lo que no se puede corroborar dicha ubicación geotécnica, el basalto que se encuentra en el corte no pertenece a los derrames del Xitle, pertenece a un evento volcánico más antiguo. Los depósitos aluviales que sobreyacen a este derrame se deben, a la Sierra de las Cruces y a la Sierra del Chichinautzin.



Corte estratigráfico #41

Corte estratigráfico #41. El eje se encuentra localizado de acuerdo con el mapa del reglamento en Zona I, la estratigrafía del corte concuerda con esta ubicación dentro de la zonificación, el basalto y la andesita que se encuentra en el corte pertenecen a los derrames del Xitle. Los depósitos aluviales se deben, a la Sierra de las Cruces y en menor parte a la Sierra del Chichinautzin.

III.4 Propuesta de zonificación geotécnica

La propuesta se basa en toda la información antes presentada y comentada, siguiendo las definiciones de Zona I, II y III del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

El marco de referencia que sirvió de base o punto de partida para la elaboración de la propuesta de zonificación geotécnica, lo constituye el mapa digital de zonificación (fig. III.2.3.2), de tal forma que en zonas sin información de utilidad, se respetó la ubicación de las líneas virtuales existentes. Las modificaciones se definieron conforme a la estratigrafía de los cortes. En zonas donde no existan perfiles estratigráficos, como por ejemplo en el Pedregal de Santa Ursula, se zonificó, mediante la interpretación de la información contenida en los mapas digitales respaldada con información fotográfica del lugar; en zonas de difícil acceso, como por ejemplo en las inmediaciones de Santa Rosa Xochiac, solo se zonificó basándose en la información digital.

A continuación se presenta la propuesta de zonificación geotécnica (fig. III.4.1), y el mapa de referencia (fig. III.4.2): Se omite la traza urbana para tener mejor visualización.

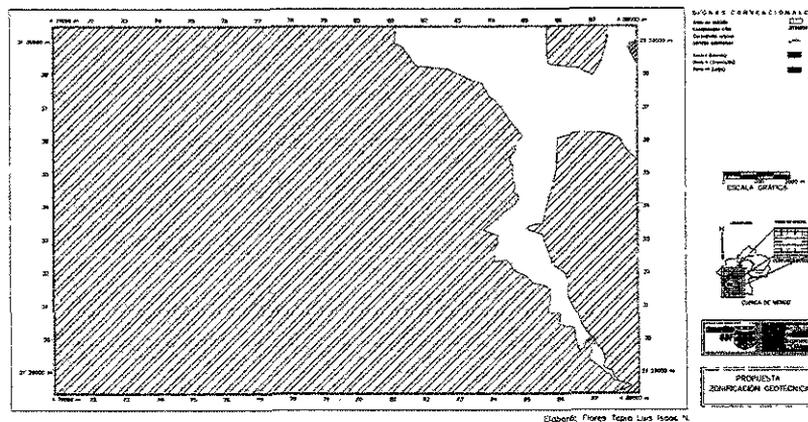


Fig. III.4.1 Propuesta de zonificación geotécnica



Fig. III.4.2 Zonificación geotécnica (NTC, 1995)

Las modificaciones y contribuciones más importantes a la zonificación geotécnica son las siguientes:

- a) En la propuesta de zonificación geotécnica existe una franja correspondiente a la Zona II que divide a las zonas lacustres de los extintos lagos de la Ciudad de México y Xochimilco. Esta división de zonas ya era contemplada en el mapa (fig. 6) realizado por J.J. Schmitter en 1968, el cual fue tomado como referencia para la elaboración de la zonificación de 1987, y posteriormente esta última para la de 1995. Sin embargo, ambas zonificaciones omiten la franja divisoria y aceptan la existencia una zona lacustre continua, indicando la zona de incertidumbre con líneas punteadas.
- b) Desde la zonificación de 1968 y hasta la de 1995, se encuentra un “pico” (por nombrarlo de alguna forma) correspondiente a la Zona I el cual fue eliminado en la propuesta, ya que la información demuestra que no existe tal Zona I y que corresponde a la Zona II y Zona III.
- c) La zonificación evidente de las faldas de la Sierra de las Cruces, mostrando la variedad de materiales que se pueden encontrar en la zona.

También se afinó la posición de las líneas de zonificación a lo largo de su trayectoria, dándole precisión al mapa propuesto.

El mapa de zonificación de 1995 conserva la nomenclatura de la zonificación de 1968 pero sin hacer referencia alguna de ello, es decir, la zonificación de 1995 de acuerdo con el reglamento se divide en tres zonas geotécnicas pero la simbología de su mapa contempla cinco zonas: lacustre, aluvial, pétreo, transición progresiva y transición interestratificada, por lo que además de llevar a cabo movimientos de las líneas virtuales de zonificación, se uniformizó la nomenclatura del mapa en las tres zonas reglamentadas.

En el anexo B) se encuentra la propuesta de zonificación geotécnica, escala 1:50,000 que incluye a la traza urbana.

IV Cimentaciones más comunes en el área de estudio

La técnica de las cimentaciones tiene en la actualidad mucho de arte, en el sentido de que muchos de los criterios, normas y reglas empleadas no tienen una sustentación teórica directa y, a veces, casi no la tienen en absoluto, quedando mucho del éxito a lograr en una cimentación en la experiencia precedente, la intuición y el ingenio del ingeniero.

Al estudiar una cimentación debemos considerar dos medios: la estructura y el subsuelo. El cimientamiento o estructura de cimentación es la parte de la estructura que transmite las cargas al subsuelo. Por su parte, el terreno de cimentación es la parte del subsuelo que recibe las cargas de la estructura. Por lo tanto, al hablar de una cimentación debemos considerar la estructura de cimentación y el terreno de cimentación.

En relación con el subsuelo, el medio de cimentación está formado por los materiales que constituyen la corteza terrestre, que son los suelos y las rocas. La mecánica de suelos estudia las propiedades de los primeros y la mecánica de rocas las propiedades de las segundas. Una ciencia de gran utilidad para ambas es la geología. Por lo tanto, los principales apoyos de la ingeniería de cimentaciones, en lo que respecta al subsuelo, lo constituyen la geología, la mecánica de suelos y la mecánica de rocas.

La geología es un gran auxiliar para una estimación preliminar de las características del terreno de cimentación. En efecto, las propiedades de éste son, en gran parte, función de su origen geológico. Un adecuado conocimiento de la geología permite tener una idea general de los problemas de cimentación que se pueden presentar y hacer un programa racional de exploración del subsuelo.

Una cimentación es en realidad el resultado de la superposición de dos problemas diferentes, si se juzgan las cosas desde el punto de vista de la mecánica de suelos. El primero respondería a la pregunta de qué esfuerzo puede comunicar el cimientamiento o conjunto de ellos al terreno, sin sobrepasar la resistencia de éste, es decir sin provocar una falla. El segundo contestaría a la no menos importante cuestión de que deformaciones va a sufrir el suelo y, por ende, la cimentación al aplicarse tales esfuerzos. Las teorías de capacidad de carga y los métodos de análisis de asentamientos (o expansiones) son la contribución medular de la mecánica de suelos al problema de las cimentaciones. Pero una teoría de capacidad de carga y un criterio para el cálculo de asentamientos no resuelven todos los problemas que un ingeniero encuentra en el proyecto y construcción de una cimentación. Las teorías de capacidad de carga y los métodos de análisis de asentamiento dan una idea aproximada del tipo de cimentación que debe emplearse, determinando por ejemplo, si ésta ha de ser del tipo superficial o profundo. El afinamiento y detalle de la cimentación por emplear resultará en general de tomar en cuenta las características específicas del conjunto suelo-estructura, los factores económicos y los circunstanciales del caso, como por ejemplo, la disponibilidad de materiales en el lugar o de equipo de construcción.

Elegida la cimentación, el ingeniero se enfrenta a los problemas constructivos, en todos los cuales la mecánica de suelos lo guiará para manejar correctamente al suelo, que es el medio en el cual la cimentación ha de construirse.

Las cimentaciones suelen manejarse como pertenecientes a uno de dos grandes grupos: las **superficiales** y las **profundas**. Las cimentaciones superficiales son aquellas en que la profundidad de desplante no excede de dos o tres veces al ancho del cimientto, sin que pueda ofrecerse un criterio más preciso para diferenciarlas, pues naturalmente no existe una frontera estricta que las delimite. La presencia del NAF es un problema que limita con mucha frecuencia el uso de las cimentaciones superficiales, ya que el flujo de agua en las paredes de la excavación plantea los problemas de estabilidad de taludes, obligando al empleo de ademes que hacen perder la ventaja económica de la solución, produce el inconveniente adicional de anegar el fondo de la excavación dificultando mucho la realización de los trabajos; eliminar esta agua puede exigir complicados y muy costosos procesos de bombeo que intervienen muy fácilmente la balanza económica a favor de las cimentaciones profundas.

Si en el caso de emplear una cimentación superficial, los esfuerzos transmitidos al subsuelo sobrepasan la capacidad de carga de éste o se generan asentamientos excesivos, evidentemente habrá de recurrirse a soportar la estructura en estratos más firmes, que se encuentren a mayores profundidades, llegándose así a las cimentaciones profundas, pero a veces estratos con suficiente resistencia no aparecen dentro de profundidades alcanzables económicamente, generándose así las cimentaciones profundas que distribuyen por fricción o adherencia sus cargas a espesores suficientemente grandes de suelo.

No hay reglas muy precisas para elegir entre cimentaciones superficiales y profundas. Las consideraciones económicas suelen ser el factor decisivo de la elección que finalmente se haga. Las cimentaciones superficiales son menos costosas que las profundas pero incuestionablemente esta favorable relación de costos se va haciendo menos significativa según aumente la profundidad de desplante, pues es sabido que el costo de las excavaciones a cielo abierto varía con la profundidad muy rápidamente.

El presente capítulo describe los tipos de cimentaciones más comunes y se discute su aplicabilidad en el área de estudio.

IV.1 Cimentaciones superficiales

Los tipos más frecuentes de cimentaciones superficiales son las zapatas aisladas, las zapatas corridas y las losas de cimentación.

IV.1.1 Zapatas aisladas

El objetivo básico de las zapatas aisladas (fig. IV.1.1.1), es recibir las descargas de la superestructura por medio de columnas, es decir, puntualmente corresponde una zapata a cada columna en la base de ésta. Las zapatas aisladas generalmente están formadas por una base rectangular rígida de piedra o concreto armado de dimensiones: anchura B y longitud L. Generalmente se tiene $L/B \leq 1.5$ (ref. 40).

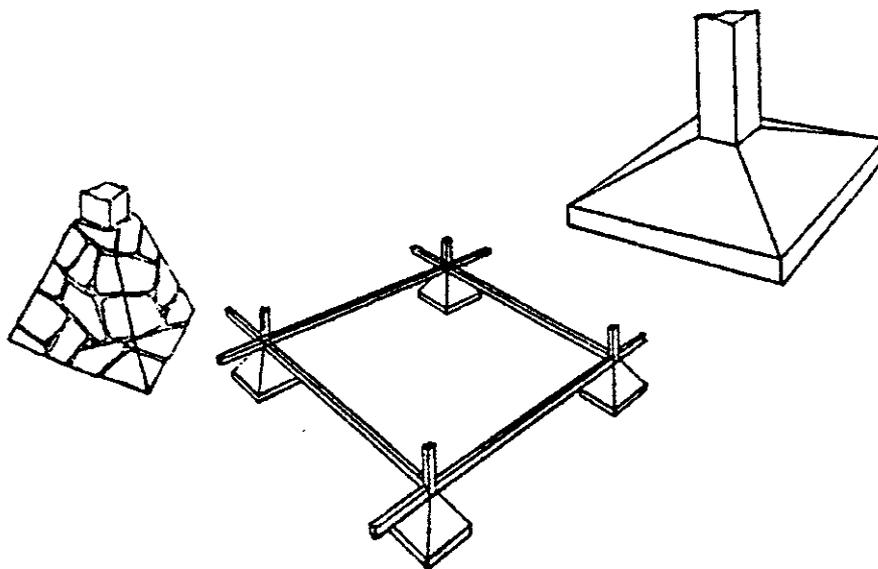


Fig. IV.1.1.1 Zapatas aisladas

Este tipo de cimentación resulta económico, para el subsuelo de la Ciudad de México, pero no es recomendable para las Zonas II y III sobre todo para cargas considerables, ya que se pueden generar hundimientos diferenciales entre estos elementos de cimentación que puedan sobrepasar lo permitido, para disminuir dichos hundimientos es común ligar las zapatas aisladas con travesaños de liga. En general, las zapatas aisladas se usan en suelos de baja compresibilidad o en estructuras que previamente se diseñaron con uniones que permitan reducir los hundimientos diferenciales.

IV.1.2 Zapatas corridas

Cuando se está en presencia de suelos de mediana compresibilidad (Zona II) y las cargas transmitidas a la cimentación son altas, las áreas requeridas para el apoyo de la cimentación deben aumentarse, llegándose al empleo de zapatas corridas, que sostienen varios elementos estructurales de transmisión de carga. Este tipo de cimentación puede recibir las descargas de la superestructura de manera puntual o lineal, es decir, por de medio de columnas o muros de carga. Las zapatas corridas pueden construirse de diferentes materiales tales como la mampostería y el concreto armado (fig. IV.1.2.1).

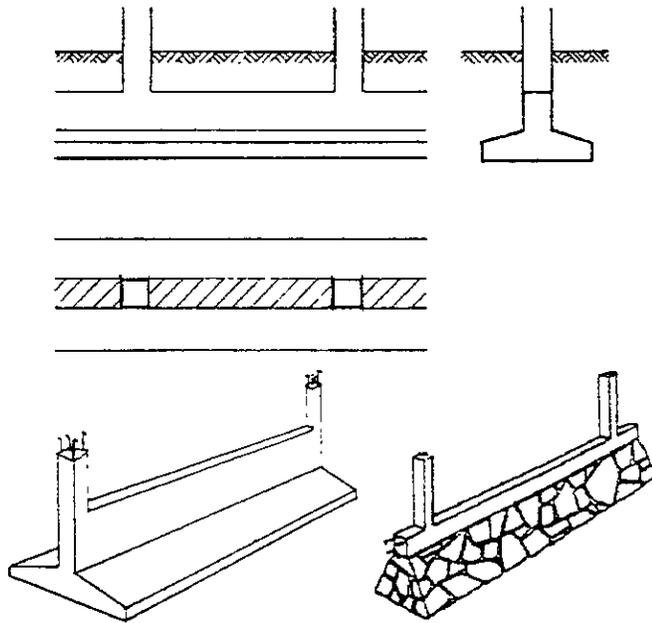


Fig. IV.1.2.1 Zapatas corridas

Este tipo de cimentación es ventajoso en suelos de mediana compresibilidad (Zona II), donde es necesario controlar los hundimientos diferenciales que se pudieran generar entre las columnas de la superestructura; otra ventaja de la cimentación con zapatas corridas es la variedad de arreglos que se pueden adoptar con éstas, permitiendo, si lo requiere el proyecto, proporcionar rigidez en una o ambas direcciones (fig. IV.1.2.2).

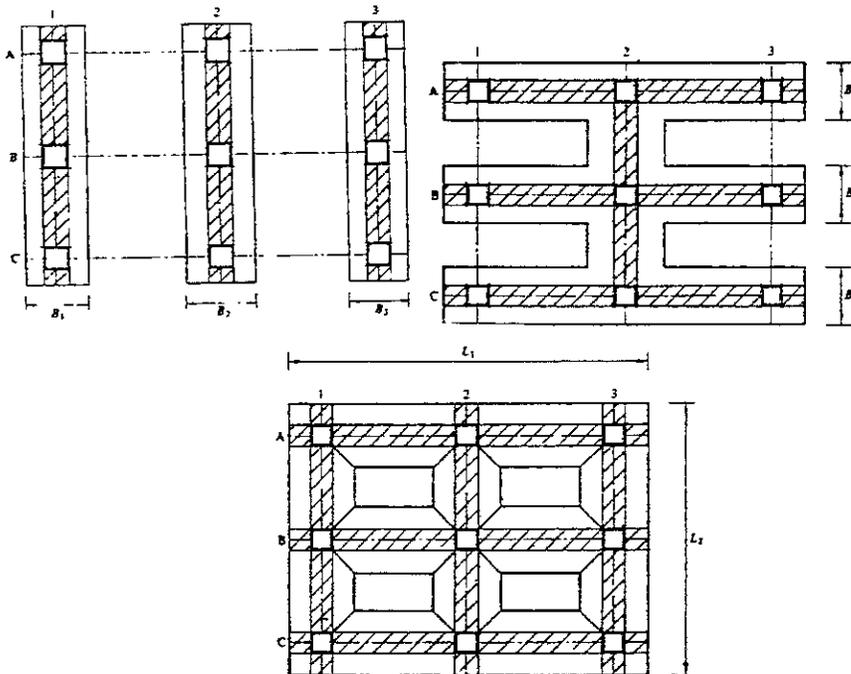


Fig. IV.1.2.2 Zapatas corridas

Las zapatas corridas pueden ser definidas como elementos resistentes que unen columnas sucesivas mediante vigas de cimentación (ref.40).

IV.1.3 Losa de cimentación

Cuando las cargas son tan grandes tal que las zapatas continuas ocupan cerca del 50% del área proyectada del edificio, es más económico usar una losa continua que cubra el área total, como se muestra en la fig. IV.1.3.1. En este caso, se puede asumir que la carga total es distribuida uniformemente en el área cubierta por el edificio.

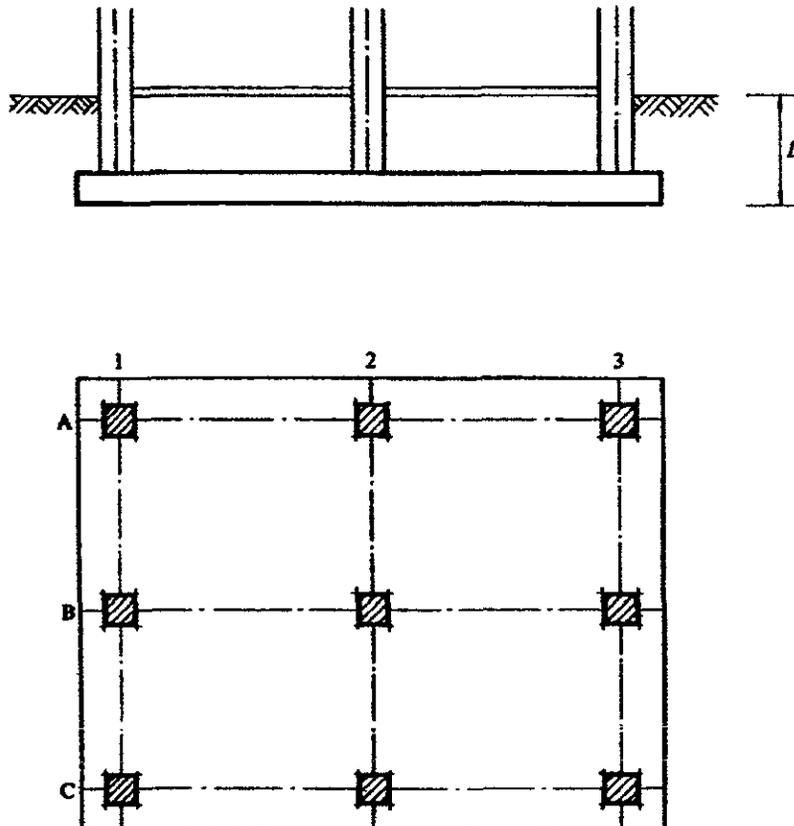


Fig. IV.1.3.1 Losa de cimentación

La losa de cimentación (ref.40) puede ser usada en suelos de mediana y alta compresibilidad (Zona II y III). Este tipo de cimentación también puede ser usada con eficiencia en la reducción de hundimientos diferenciales. Comúnmente las losas forman un elemento monolítico junto con una retícula de traveses que transmiten las descargas de la superestructura, la retícula proporciona al mismo tiempo rigidez a la losa, lo que evita los hundimientos diferenciales. Por lo tanto las traveses se localizan bajo muros de carga o ejes de columnas, quedando por arriba o abajo de la losa, según el arreglo estructural que convenga.

IV.1.4 Aplicabilidad en la zona estudiada

En la Zona I donde la compresibilidad es baja y la resistencia al corte es grande, las cimentaciones de zapatas aisladas son frecuentes, aún para estructuras altas y pesadas. Sin embargo se pueden encontrar serios problemas, debido a la explotación de depósitos de origen volcánico, integrados por arena y materiales pumíticos utilizables en la construcción. En esta zona, se sabe de colapsos que han producido la destrucción total de las construcciones. Cuando las cavidades se identifican oportunamente, se procede a rellenarlas desde la superficie, a través de perforaciones, o a reforzar las bóvedas mediante muros construidos en su interior.

Los derrames basálticos del Xitle plantean problemas de discontinuidades y cavernas. Las cavernas representan un riesgo para la cimentación de estructuras, ya que la discontinuidad generada, altera la distribución de cargas. Esto provoca la concentración de esfuerzos en los techos de las cavernas y puede llevarlas a condiciones de inestabilidad principalmente por la fragilidad del arco que definen, ya que la capacidad de carga de los techos o pilares es en ocasiones muy baja. El arco puede fallar con un pequeño incremento en la carga que soporta.

El riesgo que implica la falla de cavernas, justifica la necesidad de explorar meticulosamente el área de cimentación para determinar si las hay. El estudio del predio deberá incluir la localización de las cavernas definiendo su profundidad, su posible forma.

Una vez detectadas las cavernas y determinada su posible forma, se debe proceder a estabilizarlas con una metodología adecuada para cada caso. Las soluciones comunes se comentan a continuación.

Tratar la roca a base de inyecciones. Consiste en introducir una mezcla cementante a baja presión en las cavidades que se encuentran en la zona, cuyo objetivo es dar continuidad y a su vez mejorar la capacidad de carga del terreno.

La metodología para realizar los trabajos de inyección, contempla dos etapas, la de bloqueo y la de consolidación. La etapa de bloqueo consiste en inyectar una mezcla viscosa de agua, cemento y arena fina a través de barrenos localizados en el perímetro de las zapatas de cimentación. El objetivo de esta etapa es el de aislar y darle continuidad a la zona donde se distribuirán los esfuerzos hasta una profundidad significativa. La presión de inyección en esta primera etapa (ref. 31) será de 0.5kg/cm^2 , para evitar que la mezcla cementante se fuge por las discontinuidades, reduciéndose así el consumo de mortero.

La segunda etapa de inyección o de consolidación consiste en inyectar una mezcla de agua y cemento a través de barrenos localizados en el área de la zapata. El objetivo de esta etapa es rellenar todas las discontinuidades no rellenadas en la primera etapa. La presión de inyección (ref.31) será de 1.0kg/cm^2 .

Las mezclas cementantes deben ser, en general, fluidas para poder ser bombeadas con facilidad, y de grano fino para que pase por fisuras muy pequeñas. La dosificación de la mezcla de inyección puede ser la señalada en la siguiente tabla. Las cantidades están en referencia al peso del agua empleada.

	Agua	Cemento	Arena fina
1ª Etapa	1.0	1.5	3.5
2ª Etapa	1.0	1.5	0.0

Dosificación (ref. 31)

Desplantar los cimientos a profundidad. Cuando las cavidades encontradas son someras, una posibilidad es extraer todo el material donde se encuentren las discontinuidades, para desplantar la estructura de cimentación sobre roca más sana.

Solución estructural. Cuando la configuración de las cavernas lo permita, se pueden diseñar estructuras de cimentación que nulifiquen los efectos de las cavernas como travesaños para librar el ancho de estas.

Soluciones combinadas. Dependiendo de las características de cada caso, es posible utilizar más de una de las técnicas mencionadas para garantizar la estabilidad de los arcos de roca.

La Zona II puede plantear los problemas más diversos y complejos en la cimentación de construcciones. Difícil sería predecir las condiciones del subsuelo a partir de un número limitado de exploraciones; su característica fundamental es la erraticidad. Por ello, no es sorprendente que en esta región de la ciudad hayan ocurrido los casos más notables de edificios afectados por asentamientos diferenciales. En realidad, es muy raro el caso de una falla imputable a insuficiencia de la resistencia al corte del suelo, y en cambio, muy frecuente los daños en casas (grietas, desplomes o destrucción parcial) provocados por movimientos diferenciales. Es común emplear travesaños de liga en las zapatas aisladas, con el propósito de disminuir los asentamientos diferenciales.

En la Zona III la alta compresibilidad y baja resistencia al corte de los estratos arcillosos, son causa de cimentaciones costosas y, en ocasiones, de comportamiento poco satisfactorio de las mismas. En cimentaciones de zapatas aisladas, la condición que generalmente rige, es la impuesta por los asentamientos diferenciales tolerables por el tipo de estructura de que se trate. El hundimiento generalizado de la ciudad por lo general no impone condiciones al diseño de estas cimentaciones. Es común emplear travesaños de liga en las zapatas aisladas, con el propósito de disminuir los asentamientos diferenciales.

A las estructuras ligeras, como viviendas de 1 a 2 pisos, es usual cimentarlas sobre zapatas de mampostería o de concreto. Normalmente no se determina la capacidad de carga del terreno y como consecuencia es frecuente que las estructuras de este tipo se agrieten por movimientos diferenciales de la cimentación.

Las zapatas corridas se usan cuando las cargas transmitidas a la cimentación son tales que, no puedan ser soportadas por las zapatas aisladas. Este tipo de cimentación es ventajoso en suelos donde sea necesario controlar los hundimientos diferenciales.

Las losas de cimentación son utilizadas cuando las cargas son tales que, las zapatas corridas ocupan cerca del 50% del área proyectada del edificio, es más económico usar una losa continua que cubra el área total. Este tipo de cimentación también puede ser usado con eficiencia en la reducción de hundimientos diferenciales, comúnmente las losas forman un elemento monolítico junto con una retícula de trabes que proporciona al mismo tiempo rigidez a la losa, lo que evita los hundimientos diferenciales

Al desplantar cimentaciones superficiales en el área de estudio, se debe tener en cuenta la posible falla frágil del estrato de apoyo, provocada por la consolidación de los estratos arcillosos que le subyacen. Este problema lo podemos encontrar en las Zonas II y III del área de estudio. Los cortes estratigráficos 10, 11, 22 y 26 muestran que la rigidez de la costra superficial difiere en gran medida de la resistencia de la formación arcillosa superior, lo que trae como consecuencia que al consolidarse la arcilla por el efecto del bombeo, la costra superficial tenga una falla frágil.

Este problema se ha registrado en la zona de Tláhuac (fig. IV.1.4.1). Zona que se encuentra bajo un intenso bombeo y cuya estratigrafía es semejante a la antes comentada.



Fig. IV.1.4.1 Falla frágil provocada por la consolidación de arcillas en Tláhuac

IV.2 Cimentaciones profundas

Si aún en el caso de emplear una losa corrida, la presión transmitida al subsuelo sobrepasa la capacidad de carga de éste o se piensa que producirá asentamientos excesivos, evidentemente habrá de recurrirse a soportar la estructura en estratos más firmes, que se encuentren a mayores profundidades, caso de los pilotes, o bien, optando por el sistema de substituir peso de suelo por peso del edificio, teniendo que ejecutar excavaciones considerables. Llegándose así a las cimentaciones profundas.

IV.2.1 Cimentaciones compensadas

Se llaman "compensadas" las cimentaciones en las que se busca minimizar el incremento neto de carga aplicado al subsuelo mediante excavación del terreno y uso de un cajón desplantado a cierta profundidad. Según el incremento neto de carga aplicado al suelo en la base del cajón resulte positivo, nulo o negativo, la cimentación se denomina parcialmente compensada, totalmente compensada o sobrecompensada, respectivamente.

Este tipo de cimentación es el indicado (ref.40), cuando se está en presencia de depósitos de suelo de media, alta y muy alta compresibilidad (Zona II y III).

Teóricamente las cimentaciones totalmente compensadas no deberían presentar problemas de expansiones o hundimientos, pero debido al proceso constructivo y a los tiempos de construcción esto se hace imposible de cumplir. Debido a que el peso del suelo extraído no se sustituye inmediatamente, surgen problemas de estabilidad y de deformación de las paredes y del fondo de la excavación. El movimiento de las paredes se puede evitar diseñando un troquelamiento apropiado para estabilizar los bordes de la excavación. Cuando las expansiones inmediatas por descarga, son excesivas se recomienda hacer la excavación por partes, construyendo inmediatamente la sección de cimentación correspondiente. Las cimentaciones compensadas tienen el grave inconveniente de requerir que la capa que se ha escogido para la sustentación, permanezca lo más inalterada posible. Es decir se deben controlar los trabajos de excavación y bombeo con el fin de evitar al máximo las expansiones y hundimientos del suelo, que puedan dañar las obras vecinas y la propia construcción.

Para lograr el efecto de compensación, este tipo de cimentación requiere un cajón monolítico, como se muestra en la fig. IV.2.1.1.

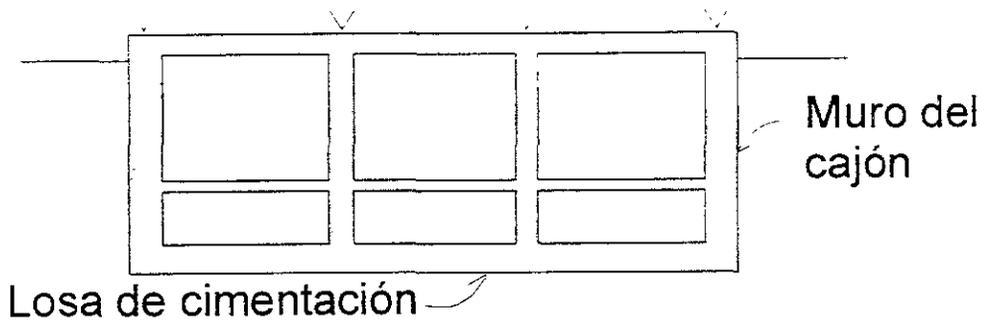


Fig. IV.2.1.1 Cimentación compensada

Al igual que las losas de cimentación, las cimentaciones compensadas forman un elemento monolítico junto con una retícula de trabes, que le transmiten las descargas de la superestructura, la retícula proporciona al mismo tiempo rigidez a la losa, lo que evita los hundimientos diferenciales.

VI.2.2 Pilotes

La función principal de los pilotes es transmitir la carga de la superestructura a capas más profundas.

Esto se puede hacer de dos formas:

- De punta**, son los que transmiten la mayor parte de la carga a un estrato resistente por medio de su punta, es decir, trabajan como columnas transmitiendo la carga de la superestructura a una capa inferior más resistente (fig. IV.2.2.1).
- Por fricción**, en este caso transmiten a capas inferiores del terreno la carga de la superestructura; la fricción a lo largo de su superficie lateral hace que sostengan el peso que se les ha asignado. Su resistencia aumenta con la longitud. Frecuentemente se utilizan las cimentaciones combinadas de un cajón que compensa parte del peso del edificio y pilotes de fricción a los que se les transmite el peso restante (fig. IV.2.2.1).

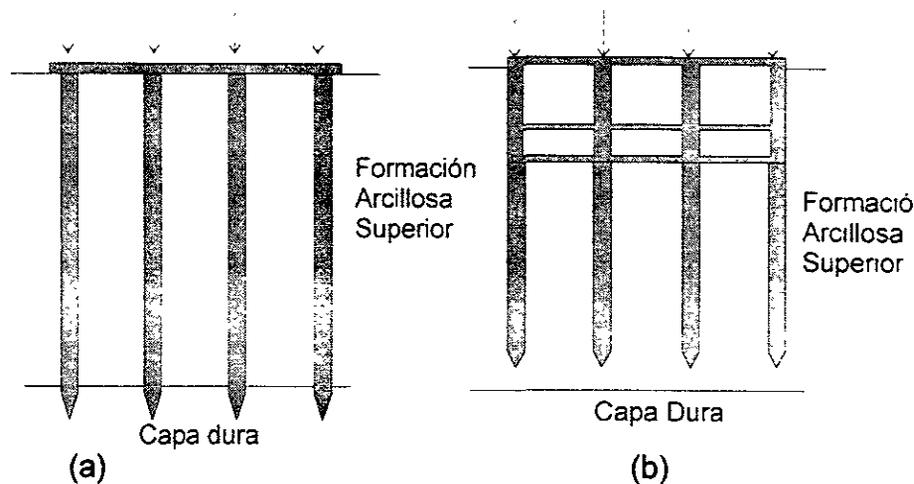


Fig. IV.2.2.1 Pilotes de punta (a) y fricción (b)

El material de los pilotes puede ser madera, acero o concreto. El pilote de madera ha caído en desuso en México por no conseguirse fácilmente, por su baja resistencia y porque generalmente se requiere de longitudes grandes lo que implicaría el uso de varios tramos difíciles de empalmar. Los pilotes de concreto pueden ser colados en el lugar o prefabricados. Los pilotes de concreto reforzado prefabricados (fig. IV.2.2.2) son los que más se utilizan en la Ciudad de México debido a su bajo costo relativo. La sección transversal del pilote puede ser rectangular, cuadrada, triangular u octogonal.



Fig. IV.2.2.2 Pilotes de concreto reforzado

Se construyen cimentaciones combinadas como la que se muestra en la fig. IV.2.2.3, que aprovechan las características de los pilotes de punta y de fricción, reduciendo los hundimientos que tendría la cimentación con pilotes de

fricción, y a la vez permiten que la cimentación siga los movimientos del terreno circundante. Cabe señalar que el proceso constructivo de esta cimentación es complicado.

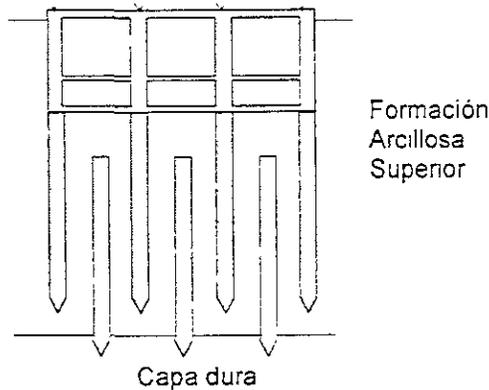


Fig. IV.2.2.3 Pilotes entrelazados

Debido al proceso de consolidación del subsuelo, es frecuente observar que los edificios cimentados directamente sobre pilotes, en algunos casos, van sobresaliendo continuamente del terreno y que los edificios adyacentes a veces se desploman y sufren daños más o menos importantes (fig. IV.2.2.4). Además es necesario reparar las banquetas, drenajes, ductos, reacondicionar entradas al edificio, etc. Este fenómeno aumenta las cargas que deben soportar los pilotes.

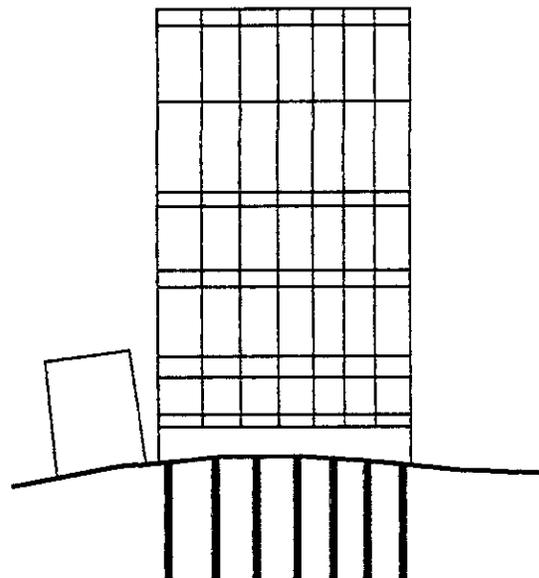


Fig. IV.2.2.4 Desplome del edificio de la izquierda ocasionado por el hundimiento del subsuelo

Para reducir los efectos anteriores existen varios dispositivos o mecanismos, para subir o bajar a voluntad los edificios o estructuras cimentadas sobre pilotes, permitiendo, si se desea, que el edificio siga los movimientos del terreno, o bien corregir desplomes. Asimismo permitirá que los pilotes reciban únicamente las cargas para que fueran proyectados, en consecuencia, la cimentación trabajará

siempre de acuerdo con las cargas para las que fue diseñada. Estos mecanismos trabajan conjuntamente con los pilotes y la cimentación o subestructura del edificio. También permitirá que el edificio o estructura se apoye siempre en el terreno, aún cuando éste se compacte o enjute, por lo que el terreno puede tomar parte de la carga o peso del edificio. Los pilotes cuya forma de trabajo es la mencionada reciben el nombre de pilotes de control (fig.IV.2.2.5).

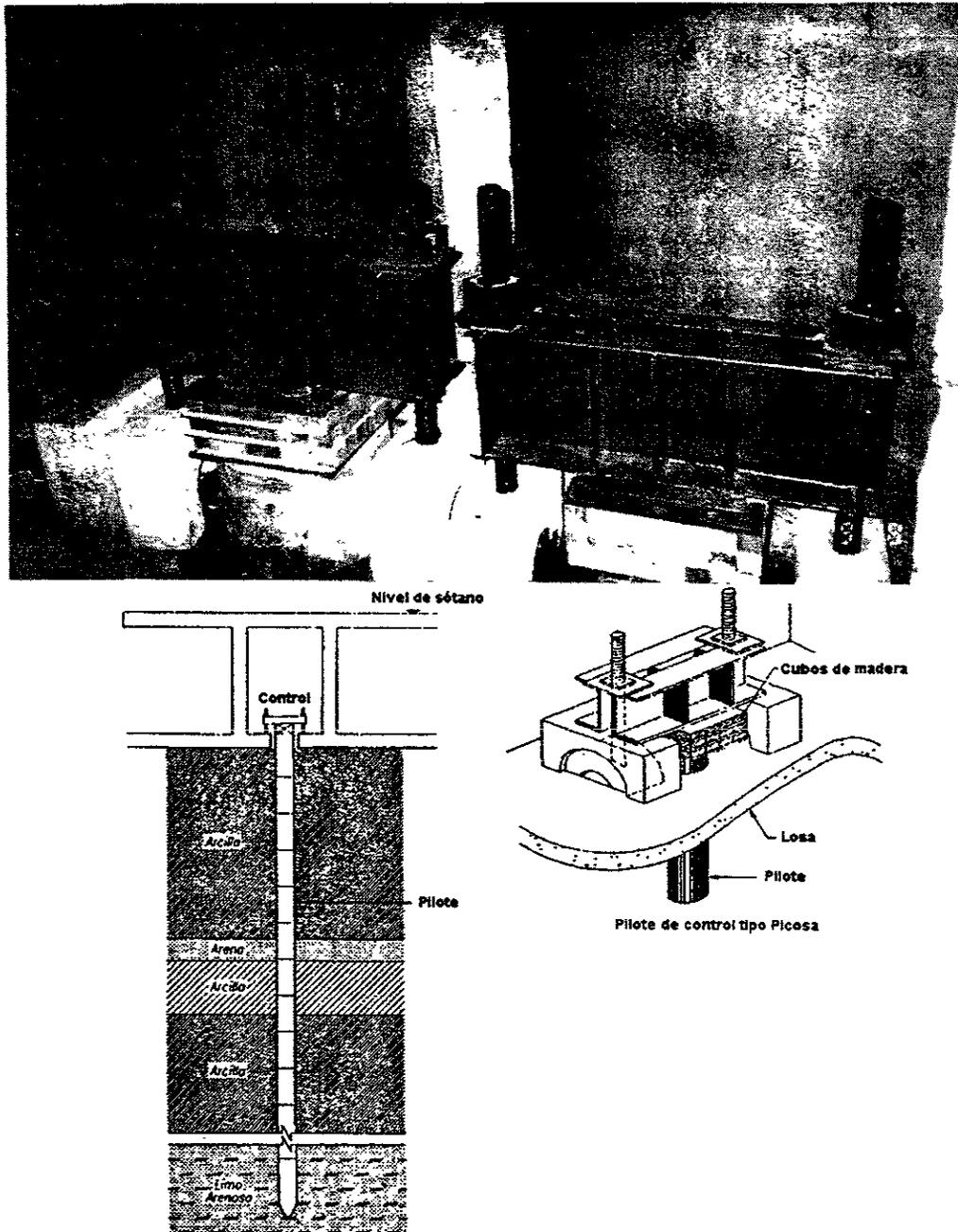


Fig. IV.2.2.5 Pilotes de control

Teniendo en cuenta que muy posiblemente haya necesidad de variar la carga que se le da a cada pilote, los dispositivos o controles, deben quedar en lugar fácilmente accesible, y este lugar se ha buscado que sea el espacio que queda entre la losa de cimentación y la losa de piso.

El control como puede apreciarse en la fotografía de la figura IV.2.2.5, consta esencialmente de cuatro elementos:

- a) Anclas, que después del colado sobresalen lo indispensable para sujetar los tornillos; estas anclas, después de colocados los tornillos pueden protegerse con concreto.
- b) Los tornillos con los que se permite la penetración del pilote y con los cuales moviendo las tuercas se hace variar la carga o el nivel del edificio.
- c) El puente, el cual transmite la carga directamente al pilote.
- d) La celda de deformación, patentada, que es un dispositivo por medio del cual el pilote recibe una descarga constante, previamente proyectada y que, sin embargo, permite que el pilote penetre dentro del edificio en forma natural hasta determinada longitud.

Los elementos cuyo ancho sobrepasa 80.0cm suelen llamarse pilas. En rigor no hay dimensión definida entre pilas y pilotes y el criterio arriba expuesto tiene como único mérito el ser seguido por un cierto número de especialistas. En ocasiones se requieren elementos de mayor sección que los anteriores, a los que se llama cilindros, cuando tienen tal forma o cajones de cimentación, cuando son paralelepípedicos. Se construyen de concreto reforzado y son huecos por razones de ahorro de material.

Todo diseño de cimentación requiere el conocimiento de la estratigrafía del lugar, pero en el caso de los pilotes se debe prestar mayor atención en ello. Es conveniente hacer una interpretación geológica de la zona, e indispensable hacer estudios detallados de la estratigrafía en donde se piensa hincar los pilotes. La estratigrafía es determinante para escoger la profundidad, el tipo de pilotes más adecuado y la carga que pueden soportar. La presencia de lentes duros intermedios puede entorpecer el hincado, provocando fallas en los pilotes debido al golpeo.

VI.2.3 Aplicabilidad en la zona estudiada

Las cimentaciones compensadas tienen el inconveniente de requerir que la capa que se ha escogido para la sustentación, sea de espesor constante y permanezca lo más inalterada posible durante el proceso de construcción. De no cumplirse con estas dos condiciones el comportamiento de este tipo de cimentación no será el esperado. En el área de estudio se debe hacer un estudio detallado de la estratigrafía debido a la erraticidad de materiales que conforman a la costra superficial en esta zona.

Los pilotes de punta se utilizan cuando la carga es grande, y se está en presencia de potentes estratos de suelo compresible, y de baja resistencia al esfuerzo cortante. En el área de estudio es factible el uso de esta cimentación, ya que la profundidad máxima de la capa dura se localiza aproximadamente a 35m. Sin embargo, debe tenerse presente el problema de la emersión aparente. El hundimiento regional en el área de estudio, tiene presencia en la zona de transición de la Sierra del Chichinautzin y el ex-lago de Xochimilco, así como en la propia zona lacustre del ex-lago de Xochimilco. La información que se tiene acerca de este fenómeno debe ser actualizada ya que seguramente está ocurriendo un importante hundimiento, debido a la intensa extracción de agua para consumo humano. Si se subestima esta realidad en el diseño de las cimentaciones con pilotes, el comportamiento de ellas podría ser catastrófico.

La presencia de la Sierra de las Cruces y del Cerro de la Estrella en el área de estudio, así como la reciente actividad volcánica de esta zona, trae como consecuencia la existencia de una gran cantidad de lentes duros discontinuos. Esta situación puede conducir a un comportamiento inadecuado de las cimentaciones sobre pilotes de fricción. En efecto, si algunos pilotes se apoyan sobre estos lentes duros, debe esperarse que la estructura presente fuertes desplomes.

Los pilotes de control pueden ser empleados para que el edificio siga los movimientos del terreno, o bien corregir desplomes, pero su principal desventaja es la de requerir atención constante durante toda la vida de la estructura.

Conclusiones

El presente trabajo constituye una contribución al mejor conocimiento del subsuelo de la Ciudad de México

El área de estudio se localiza en la región Sur del Distrito Federal. De acuerdo con el programa de estudio emprendido en el Instituto de Ingeniería, se consideró específicamente el área limitada por las coordenadas (470860.00, 2139440.00)m y (488305.00, 2128370.00)m en el sistema UTM. El subsuelo de la zona Sur es formado principalmente por la actividad volcánica y la erosión, de la Sierra de las Cruces y de la Sierra del Chichinautzin. La Sierra de las Cruces contribuyó con grandes abanicos aluviales y la Sierra del Chichinautzin con derrames de lava, ambas sierras contribuyeron con sus respectivos productos piroclásticos.

La lava proveniente del volcán Xitle cubre aproximadamente el 40% del área de estudio y sobreyace a depósitos glaciares y aluviales de la Sierra de las Cruces. Su edad no se ha podido precisar, debido a que diversos estudios muestran discrepancias de unos 2000 años, la mayoría de los investigadores concuerdan en una edad de 2422 años aproximadamente, se comenta en algunas publicaciones que es el último evento de la Sierra del Chichinautzin, pero no es así ya que existen otros aparatos volcánicos que tuvieron actividad posterior a él, como por ejemplo el Pelado y posiblemente el volcán Chichinautzin (palabra que significa el señor que quema).

Debido a la actividad reciente de pequeños conos volcánicos del Sur, la estratigrafía de la zona lacustre de Xochimilco, presenta diferencias con la estratigrafía lacustre de la Ciudad de México. Es decir las formaciones arcillosas de la Ciudad de México están intercaladas con algunas pequeñas capas o lentes de arena, mientras que en las formaciones de Xochimilco, la existencia de dichas capas es más abundante, y la arcilla se encuentra considerablemente contaminada con arena.

El hundimiento y la aparición de grietas son problemas característicos de zonas en donde se realiza un intenso bombeo para la extracción de agua. El agrietamiento y hundimiento en el área de estudio, esta ocurriendo principalmente en la zona de transición abrupta entre la Sierra del Chichinautzin y el ex-lago de Xochimilco, debido a la extracción del agua que se infiltra a través del basalto de dicha sierra.

La llamada Zona I está representada principalmente por derrames de lava, grava, arena, limo y arcilla de bajo contenido de agua. En esta zona se puede encontrar toba sobre basalto o abanicos aluviales con intercalaciones de basalto y así como depósitos de arena, limo y arcilla subyaciendo al basalto.

La Zona II está formada por abanicos aluviales, intercalados con estratos de arcilla lacustre y en ciertas zonas se encuentran algunos lentes de basalto. La zona de transición que separa al extinto lago de la Ciudad de México y al de Xochimilco, se localiza aproximadamente a lo largo de la Calzada Taxqueña, y se extiende unos 2000m al Sur hasta llegar a la Calzada de la Virgen. Transición que se generó debido a las condiciones climáticas que propiciaban, a las transgresiones y regresiones que dieron origen a estos dos lagos. Tal vez esta zona se extiende

mas al Sur, pero debido a la escasa y baja calidad de la información en esta zona, no se puede corroborar tal hecho.

En la Zona III el principal material encontrado es la arcilla lacustre intercalada con abundantes lentes de arena y limo.

La actualización del mapa de zonificación geotécnica es importante, ya que tiene el objetivo principal de guiar al ingeniero o arquitecto, en la planeación de los trabajos de exploración y muestreo del subsuelo. Además el de intuir las dificultades que se pueden encontrar durante el proceso constructivo. El mapa de zonificación propuesto podrá seguir siendo actualizado a medida que se obtenga más y mejor información, aparentemente casi toda el área cubierta por esta tesis ya esta urbanizada, pero un buen porcentaje de las construcciones son ligeras o medianas de poca extensión, lo que tal vez en un futuro próximo cambie a edificaciones más importantes que requieran de información preliminar más confiable.

El reto a vencer en el diseño de las cimentaciones, es el de evitar o contrarrestar los hundimientos, que se generan debido al proceso de consolidación en los estratos compresibles inducidos por la extracción de agua y el peso propio de la estructura, sin menospreciar la problemática que implican los trabajos de construcción. La problemática que presentan las áreas con basaltos radica principalmente en que presentan peculiaridades que dificultan este diseño, sobre todo debido a la combinación de las distintas discontinuidades que aparecen en estas rocas durante su formación.

El uso de herramientas como la informática agiliza el proceso de consulta y ofrece la ventaja de administrar y manejar grandes volúmenes de información gráfica y alfanumérica. Pero la principal ventaja, es la de almacenar sistemática y permanentemente la información capturada, lo que evita la dispersión y pérdida de información como sucedía décadas atrás. Con ello el conocimiento de la distribución de los materiales, será fortalecido y servirá para evitar ineficiencias en los trabajos de reconocimiento y exploración del subsuelo. Esto no significa que se pueda evitar el estudio geotécnico detallado, solo es una guía y punto de referencia para su ejecución.

Futuras líneas de trabajo

Tradicionalmente, en ciencias de la Tierra se ha utilizado la estadística para describir o explicar la variación espacial de las propiedades del subsuelo a través de tablas, histogramas y correlaciones. Actualmente se cuenta con nuevas herramientas estadísticas con gran potencial, que permiten tomar en cuenta esta dependencia espacial, pero que hasta ahora poco se han usado para fines geotécnicos. Una de ellas es la denominada geoestadística, que puede aplicarse a la descripción de las condiciones estratigráficas y a la distribución espacial de las propiedades de los materiales. Con esta herramienta, es posible describir racionalmente las formaciones geológicas y resolver problemas tales como, la estimación de espesores de estratos o de valores de las propiedades índice o mecánicas en un sitio dado, a partir de la información de sondeos existentes. La información recopilada y capturada en esta tesis, complementada con la información pertinente, es el punto de partida para aplicar la geoestadística, que permitirá la elaboración de cortes estratigráficos y al mismo tiempo de la zonificación geotécnica con fundamentos matemáticos.

Se utilizarán imágenes de satélite, fotografías aéreas y modelos digitales tridimensionales, para el estudio de zonas que carezcan de información geotécnica, abarcando un área más importante de la cuenca. Desplegando los resultados en el Sistema de Información Geográfica SIG-SG.

Referencias

- 1.- Marsal, R.J. "Estudios Relativos al Comportamiento del Subsuelo del Valle de México", Instituto Nacional de la Investigación Científica, México, D.F., 1952.
- 2.- Marsal, R.J., Mazari, M. "El subsuelo de la Ciudad de México", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, D.F., 1959.
- 3.- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, 9 de Febrero de 1966.
- 4.- Marsal, R.J. "La estratigrafía y sus implicaciones", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 1-7, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
- 5.- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, 14 de diciembre de 1976.
- 6.- Del Castillo, R. "Ciudad de México", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 15-50, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
- 7.- Mooser, F., Santoyo, E., Támez, E. "Características Geológicas y Geotécnicas del Valle de México", Serie 100km de Metro, COVITUR, septiembre de 1986.
- 8.- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, 12 de noviembre de 1987.
- 9.- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, 3 de julio de 1987.
- 10.- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, 27 de febrero de 1995.
- 11.- Auvinet, G., Mendoza, M., Reséndiz, D. "Comentarios Ayudas de Diseño y ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y construcción de Cimentaciones, D.D.F.", Serie de Instituto de Ingeniería. No ES-6, 1993.
- 12.- Aguayo, J., Marín, S., Sánchez, F. "Evaluación Geológica de la Cuenca de México", Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México, pp 25-39, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1989.
- 13.- Domínguez, R. "Sistema para el Control y Drenaje de las Avenidas en el Área Metropolitana del Valle de México", Series del Instituto de Ingeniería, No.593, 1997.

- 14.- Correa, A., Mazari, M., Mooser, F., Nelson, P. "El Suministro de Agua de la Ciudad de México; Mejorando la Sustentabilidad", National Research Council, Academia de la Investigación Científica, A.C., Academia Nacional de Ingeniería, A.C., NATIONAL ACADEMY PRESS, Washington, D.C., 1995.
- 15.- Legorreta, J. "Ríos y Presas Sobrevivientes", Ecológica – Agua, Centro de Ecológica y Desarrollo, México, D.F., 1997.
- 16.- Martínez, J. L. "América Antigua", Secretaría de Educación Pública, México, D.F., 1988.
- 17.- Cuaderno Estadístico Delegacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1997.
- 18.- Menéndez, F. "Abastecimiento sustentable de agua para la Ciudad de México: la recarga de sus acuíferos", Ecológica – Los Retos Ambientales de la Ciudad de México, Centro de Ecológica y Desarrollo, México, D.F., 1997.
- 19.- Tolson, G. "La Escala del Tiempo Geológico", Instituto de Geofísica (Internet).
- 20.- Palomo, A. Comunicación personal. (Servicio Geológico Metropolitano)
- 21.- Ryan, M. C. "An investigation of inorganic nitrogen compounds in the groundwater in the Valley of Mexico", Geofísica Internacional, pp 419, Instituto de Geofísica, México, D. F., 1 de abril de 1989.
- 22.- Mooser, F. "Geología del relleno Cuaternario de la Cuenca de México", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 9-13, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
- 23.- Mooser, F. "Estratigrafía y estructura del Valle de México", El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo", pp 29-36, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1990.
- 24.- Mooser, F., Santoyo, E., Támez, E. "Manual de Diseño", COVITUR, agosto de 1987.
- 25.- Mooser, F., Montiel, A. Zúñiga, A. "Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla", Comisión Federal de Electricidad, México, D.F., 1996.
- 26.- Vázquez, E., Jaimes, R. "Geología de la Cuenca de México", Simposio sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México, pp 9, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1989.
- 27.- Yarza, E. "Volcanes de México", Instituto de Geografía, pp 87-160, México, D.F., 1992.

- 28.-** Taméz, E., Santoyo, E. "Características geológicas y geotécnicas del Valle de México", TGC, No. 277, agosto de 1986.
- 29.-** Reglamento para los trabajos de Exploración y Explotación de Yacimientos de Arena, Cantera de Tepetate y Piedra, en el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, México, D.F., 7 de abril de 1932.
- 30.-** Badilla, R. "Estudio petrológico de la parte NE del Pedregal de San Ángel, Distrito Federal" Tesis de licenciatura, I.P.N., México, D.F., 1975.
- 31.-** Santoyo, E. "Cimentaciones sobre los basaltos del Surponiente de la Ciudad de México", Tesis de licenciatura, U.N.A.M., México, D.F., 1990.
- 32.-** Estudios aplicados a la detección de cavernas, en el Metro (Líneas 7 y 3 Sur) y Periférico Norte. Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, 1982.
- 33.-** Real, E., Milan, R. "Estudio geológico encaminado a localizar cavernas o túneles en seis colonias ubicadas dentro del área Poniente de la Ciudad de México, D.F.", Tesis de licenciatura, I.P.N., México, D.F., 1989.
- 34.-** Orozco, J, Figueroa, G. "Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre el agrietamiento de terrenos", Agrietamiento de suelos, pp 1-11, Sociedad Mexicana de Suelos, México, D.F., 1991.
- 35.-** Gutiérrez, C., Cuevas, A. Sánchez, B. "Soluciones geotécnicas para el agrietamiento de suelos". Agrietamiento de Suelos, pp 95-108, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1991.
- 36.-** Marín, G. "Un mecanismo de falla generado por el abatimiento piezométrico", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 192-194, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
- 37.-** Moreno, G. "Influencia del abatimiento piezométrico en los agrietamientos y hundimientos del subsuelo", Memorias del Simposio El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, pp 186-191, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1978.
- 38.-** Murillo, R. "Sobreexplotación del acuífero de la Cuenca del Valle de México: efectos y alternativas", El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo, pp 114, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1990.
- 39.-** Auvinet, G., Arias, A. "Propagación de grietas", Agrietamiento de suelos, pp 21-31, Sociedad Mexicana de Suelos, México, D.F., 1991.
- 40.-** Zeevaert, L. "Foundation engineering for difficult subsoil conditions", pp 1-15, Van Nostrand Reinhold Company, New York, N. Y., 1983.