



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

COMPORTAMIENTO DEL SUELO EN LA ZONA PRÓXIMA AL CERRO DEL MARQUÉS Y SUS EFECTOS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN MECÁNICA DE SUELOS**

PRESENTA:

JUAN HINOJOSA MARIN

Director:

DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD

Director:

M. EN C. MOISÉS JUÁREZ CAMARENA



México, D.F.

Junio de 2010



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F. siendo las 18:30 horas del día 26 del mes de Mayo del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis titulada:

“Comportamiento del suelo en la zona próxima al cerro del Marqués y sus efectos en obras de infraestructura”.

Presentada por el alumno:

Hinojosa
Apellido paterno

Marin
Apellido materno

Juan
Nombre(s)

Con registro:

B	0	2	1	6	6	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN MECÁNICA DE SUELOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Gabriel Auvinet Guichard

M. en C. Moisés Juárez Camarena

Dr. Héctor Aureliano Sánchez Sánchez

Dr. Esteban Flores Méndez

Dr. Norberto Domínguez Ramírez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

M. en C. Pino Durán Escamilla



SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 7 del mes Junio del año 2010, el que suscribe **Ing. Juan Hinojosa Marín**, alumno del Programa de Posgrado en Mecánica de Suelos con número de registro B021667, adscrito a Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Gabriel Auvinet Guichard** y el **M. en C. Moisés Juárez Camarena**, y cede los derechos del trabajo intitulado “**Comportamiento del suelo en la zona próxima al cerro del marqués y sus efectos en obras de infraestructura**”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico; **juan.hinojosa01@cfe.gob.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Ing. Juan Hinojosa Marín

AGRADECIMIENTOS...

- A *Dios*, por haber iluminado el camino que me permitió llegar a esta meta;
- A las dos personas que más admiro y con las que estaré agradecido por siempre, mis padres: *Minerva Marín Balderas y Lucas Hinojosa Hernández*;
- A mis hermanos, *Jesús, Miguel, Maria Isabel, Lucas Francisco, Argelia, Cecilia Minerva y Maria de los Ángeles*, por ser mis grandes amigos y por estar siempre a mi lado;
- Al *Dr. Gabriel Auvinet Guichard, Moisés Juárez Camarena y Edgar Méndez Sánchez*, por el enorme apoyo en la realización de este trabajo;
- A mis compañeros del Laboratorio de Geoinformática; *Norma Patricia López Acosta, Juan Félix Rodríguez Rebolledo, Olivier Pham Lee, Alma Rosa Pineda Contreras, Elizabeth Zarazúa Flores*, gracias por su apoyo y colaboración para la realización de este trabajo;
- Al Instituto Politécnico Nacional y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la formación que me han dado.

COMPORTAMIENTO DEL SUELO EN LA ZONA PRÓXIMA AL CERRO DEL MARQUÉS Y SUS EFECTOS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

ÍNDICE

RESUMEN	Pág.
ABSTRACT	iv
	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	xii
NOMENCLATURA	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes	1
I.2 Objetivo	3
I.3 Alcances	3
II. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	4
II.1 Marco geográfico	5
II.1.1 Ubicación geográfica	5
II.1.2 Información histórica	7
II.1.3 Cartografía	12
II.1.4 Topografía	13
II.1.5 Imágenes satelitales y fotografías aéreas	16
II.2 Marco físico	18
II.2.1 Geología	19
II.2.2 Geomorfología	22
II.2.3 Hidrografía	29
II.2.4 Geotecnia	30
II.2.4.1 Zonificación geotécnica	30
II.2.4.2 Zonificación sísmica	31
II.2.4.3 Sondeos geotécnicos	34
II.2.4.4 Hundimiento regional	35
a) Bancos de nivel	36
b) Pozos de bombeo	41
II.2.4.5 Agrietamiento	45
II.2.4.6 Inestabilidad de laderas	58
II.2.5 Geofísica	62
II.2.6 Instalaciones hidráulicas	65
II.3 Sistema de información geográfica	6

	Pág.
III. MODELO ESTRATIGRÁFICO DEL SUBSUELO	68
III.1 Información geotécnica disponible	68
III.2 Estratigrafía del subsuelo a lo largo del eje en estudio	69
III.2.1 Información geotécnica considerada	69
III.2.2 Corte estratigráfico	72
III.2.3 Condiciones y propiedades del subsuelo	72
III.2.4 Condiciones piezométricas	79
III.3 Análisis geoestadístico de la distribución espacial de las propiedades del subsuelo	82
III.3.1 Datos	85
III.3.2 Análisis de la distribución espacial del contenido de agua	89
III.3.2.1 Análisis exploratorio	89
III.3.2.2 Descripción estadística	91
III.3.2.3 Análisis estructural	91
III.3.2.4 Estimación de sondeos y cortes	93
III.3.2.5 Validación de la estimación	93
III.3.3 Análisis de la distribución espacial de la resistencia de cono eléctrico	94
III.3.3.1 Análisis exploratorio	94
III.3.3.2 Descripción estadística	97
III.3.3.3 Análisis estructural	97
III.3.3.4 Estimación de sondeos y cortes	99
III.3.3.5 Validación de la estimación	99
 IV. MODELACIÓN SIMPLIFICADA DE LOS EFECTOS DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LA ESTRUCTURA DEL METRO	 101
IV.1 Características de la estructura	101
IV.1.1 Estaciones	102
IV.1.2 Secciones estructurales del cajón del metro	103
IV.1.3 Juntas	110
IV.1.4 Instalaciones electromecánicas	120
IV.2 Historia del comportamiento del tramo de análisis	121
IV.2.1 Movimientos verticales y diferenciales	121
IV.2.2 Daños ocasionados por el hundimiento regional	126
IV.2.3 Trabajos de rehabilitación anteriormente efectuados	140
IV.3 Análisis armónico de la deformada del suelo	143
IV.4 Modelo numérico para la simulación del comportamiento del cajón del metro y del suelo de apoyo	152
IV.4.1 Modelo simplificado de interacción suelo estructura con el Método del Elemento Finito	152
IV.4.2 Análisis con elementos finitos 3D	171

	Pág.
V. ALTERNATIVAS PARA MITIGAR LOS PROBLEMAS DEL METRO	176
V.1 Inclusiones	176
V.2 Flexibilizar la estructura del cajón	178
V.3 Rigidizar la estructura del cajón	179
V.4 Tratamiento para la estabilización de grietas	179
 VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 181
VI.1 Conclusiones	181
VI.2 Recomendaciones	183
 VII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	 184
 VIII. ANEXOS	 193
ANEXO A	193
MECANISMOS DE GENERACIÓN DE GRIETAS EN LA ZONA	
 ANEXO B	
ESTACIONES Y SECCIONES ESTRUCTURALES DEL CAJÓN DEL METRO	205
 ANEXO C	
SECCIONES ESTRUCTURALES TRANSVERSALES (KM 18+983 - 19+100)	216
 ANEXO D	
MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO PARA EL ANÁLISIS DE VIGAS CONTINUAS	221
 ANEXO E	
DIAGRAMAS DE ESFUERZOS DEL CAJÓN (GUELATAO-LOS REYES)	225

RESUMEN

El presente trabajo describe las condiciones geotécnicas en la zona próxima al cerro del Marqués, sobre la cual se ubica la “Línea A” del Sistema de Transporte Colectivo (STC), en el tramo *Guelatao - Los Reyes*. Se analiza y evalúa el comportamiento del cajón del metro, así como alguna alternativa de solución a los problemas de asentamientos diferenciales y deformaciones que se presentan en el subsuelo.

En primer lugar, se desarrolla un sistema de Información Geográfica, con la intención de describir, conocer, y comprender la genética de la naturaleza de los depósitos de suelo en la zona de estudio, definiendo dos marcos de referencia: el geográfico (información histórica, cartografía, topografía, imágenes satelitales, fotografías aéreas) y el físico (geología, geomorfología, hidrografía, geotécnica, geofísica).

Así mismo, con el propósito de conocer las condiciones del subsuelo en la zona, se elabora un modelo estratigráfico, con base en la información geotécnica contenida en la base de datos del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG (Laboratorio de Geoinformática, Instituto de Ingeniería, UNAM). Además, se emplea la Geoestadística como herramienta para construir modelos que describen la distribución espacial de las propiedades del subsuelo, particularmente se analiza el contenido de agua y la resistencia de punta de cono eléctrico.

Por otra parte, en esta tesis se describen las características de la estructura del metro (estaciones, secciones estructurales del cajón, juntas constructivas y de expansión, estaciones electromecánicas) en el tramo *Guelatao - Los Reyes*. Se reconstruye la historia de los movimientos verticales totales y diferenciales del tramo en estudio en las direcciones longitudinal y transversal. Así como los daños físicos en los muros del cajón del metro causados por la influencia del hundimiento regional y las medidas adoptadas para corregir los daños; debajo de la estructura del cajón, en las juntas de los muros y en las vías. Se presenta un análisis de la deformada del suelo mediante la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y la representación espectral de las vibraciones armónicas que la componen. Empleando la teoría de elasticidad, se propone un modelo numérico simplificado de viga continua de la interacción suelo-estructura del cajón del metro, así como un modelo en 3D, del comportamiento del cajón del metro y del subsuelo de apoyo en su condición actual y futura, basado en el método de los elementos finitos. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

In this thesis the geotechnical conditions of the zone next to the “Marqués” hill are described. This area is crossed by subway “Line A” of the Mexico City Collective Transport System (STC), in the section located between the “Guelatao” and “Los Reyes” stations. The behaviour of the subway caisson is assessed, and some possible solutions to the problems induced by the subsoil differential settlements are examined.

For a better interpretation of the subsoil conditions, a GIS (Geographic Information System), was implemented with the aim of understanding the nature of the ground deposits in the zone of study, taking as reference: geographic information (historical information, cartography, topography, satellite pictures, aerial photographs) and physical information (Geology, Geomorphology, Geophysics, Hydrography, Geotechnics).

In order to represent the subsoil conditions in this area, a cross-section model was built. This model is based on the geotechnical information stored in the database of the Geographic Information System for Geotechnical Borings, GIS-SB, developed in the Geocomputing Laboratory, Institute of Engineering, UNAM. Geostatistical techniques are used to build models that describe the spatial distribution of subsoil properties; particularly: water content and cone resistance.

On the other hand, the characteristics of the subway structure (stations, structural sections of the caisson, construction and expansion joints, electromechanical stations) in the section between the “Guelatao” and “Los Reyes” stations are described. The history of total vertical movements and differential movements in the longitudinal and transverse directions was reconstructed for the section under consideration. The physical damage to the subway structure caused by the influence of regional subsidence and the actions taken to correct the damages observed in the structural box, the joints of the walls and the pavement are described. An analysis of the soil deformation represented by means of the Discrete Fourier Transform (DFT) is presented. Using elasticity theory, a simplified numerical continuous beam model as well as a 3D model based on the finite element method are used to represent the soil-structure-interaction and the behaviour of the structural box of the subway and subsoil support in its current and future conditions. Finally, conclusions and recommendations are presented.

LISTA DE FIGURAS

PÁG.

Capítulo II

Figura II.1	Localización del área de estudio en la cuenca de México.	5
Figura II.2	Límites del área de estudio.	6
Figura II.3	Ubicación de la zona y del tramo en estudio (INEGI, 2003).	7
Figura II.4	Vistas oblicuas de la zona en estudio.	7
Figura II.5	Zona en estudio (Carta Corográfica de Fernández Leal, 1899).	8
Figura II.6	Zona en estudio (Carta Corográfica de la Comisión Geográfica de Guerra y Fomento, 1909).	9
Figura II.7	Zona en estudio (Mapa cartográfico de la Secretaria de Comunicaciones y Obras Publicas, 1927).	10
Figura II.8	Zona en estudio (Mapa cartográfico de la Comisión Cartográfica Militar, 1950).	11
Figura II.9	Nomenclatura cartográfica del INEGI.	12
Figura II.10	Carta topográfica de la ciudad de México (E14 A 39), Esc. 1:50000 (INEGI, 2003).	12
Figura II.11	Carta topográfica, Esc. original 1:10,000 (INEGI, 2003).	13
Figura II.12	Orografía y topografía de la zona en estudio.	14
Figura II.13	Modelo digital del terreno de la zona de estudio.	15
Figura II.14	Imagen satelital de la cuenca de México (Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM, 2004).	17
Figura II.15	Mosaico fotográfico digital de la zona en estudio (Laboratorio de Geoinformática, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2006).	18
Figura II.16	Geología de la zona (Mooser, 1996).	20
Figura II.17	Fallas geológicas en zona de estudio (Hernández – Lozano; Vázquez – Sánchez y Jaimes – Palomera, 1989).	22
Figura II.18	Geomorfología de la zona en estudio (J. J. Zamorano, 1997).	23
Figura II.19	Plano altimétrico de la zona de estudio y sus alrededores.	24
Figura II.20	Evolución morfológica del <i>cerro del Marqués</i> .	25
Figura II.21	Perfil longitudinal de la <i>sierra de Santa Catarina</i> (Lugo-Hubp <i>et al.</i> , 1994).	27
Figura II.22	Hidrografía de la zona en estudio (INEGI, 2003).	30
Figura II.23	Zonificación geotécnica del Distrito Federal (GDF, 2004).	32
Figura II.24	Zonificación sísmica del Distrito Federal (GDF, 2004).	33
Figura II.25	Distribución espacial de sondeos geotécnicos en la zona.	34
Figura II.26	Ubicación y distribución espacial de bancos de nivel (SACM, 2005).	37
Figura II.27	Distribución espacial del hundimiento para el periodo 1998-2002.	40
Figura II.28	Distribución espacial del hundimiento en el periodo 2002-2005.	41
Figura II.29	Distribución espacial de pozos de bombeo en la zona de estudio.	44
Figura II.30	Sección hidrogeológica de la zona de estudio (Aguilar <i>et al.</i> , 2006).	45
Figura II.31	Captura, procesamiento y visualización de las grietas (Méndez, 2007).	47
Figura II.32	Distribución espacial de grietas en la zona de estudio (Méndez, 2007).	47
Figura II.33	Zonas de riesgo de agrietamiento por transición abrupta	48

	PÁG.
(adaptado de Santoyo <i>et al.</i> , 1990).	
Figura II.34 Ladera Nor-poniente del <i>cerro del Marqués</i> (flanco sur del Deportivo “Costa Verde”).	49
Figura II.35 Fotografías de la Grieta 13, colonia U. H. Ejercito del oriente y San Lorenzo Xicotencatl (km. 17+020).	49
Figura II.36 Fotografías de la Grieta 42, colonias el <i>Eden</i> y <i>Fuentes de Zaragoza</i> (km 18+860).	50
Figura II.37 Fotografías de la Grieta 43, colonia el <i>Eden</i> y <i>Fuentes de Zaragoza</i> (km 19+000).	50
Figura II.38 Fotografías de la Grieta 46, colonia el <i>Eden</i> y <i>Fuentes de Zaragoza</i> (km 19+050).	51
Figura II.39 Fotografías de la Grieta 56, colonia <i>Unidad habitacional Tepozanes</i> y la colonia <i>Ermita Zaragoza</i> (km 21+320).	51
Figura II.40 Diagrama de rosa de direcciones en la zona.	52
Figura II.41 Distribución espacial de deformaciones verticales de la superficie del terreno (curvas verticales) y anomalía geotécnica en la zona.	57
Figura II.42 <i>cerro del Marqués</i> .	58
Figura II.43 Vistas de laderas susceptibles a deslizamiento en el <i>cerro del Marqués</i> .	59
Figura II.44 Inestabilidad de laderas en el flanco norte del <i>cerro del Marqués</i> .	60
Figura II.45 Zonas de alto riesgo en el flanco sur del <i>cerro del Marqués</i> .	60
Figura II.46 Zonas inestables en el <i>cerro del Marqués</i> y sus alrededores.	61
Figura II.47 Distribución espacial de las mediciones de ruido ambiental en el tramo de estudio.	62
Figura II.48 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE en el cajón (estación <i>Guelatao</i> al <i>cerro del Marqués</i>).	64
Figura II.49 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE lado sur (<i>cerro del Marqués</i> a la estación <i>Acatitla</i>).	64
Figura II.50 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE (<i>Acatitla –Santa Marta</i>).	64
Figura II.51 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE lado norte (<i>Santa Marta – Los Reyes</i>).	65
Figura II.52 Instalaciones Hidráulicas en el área de estudio.	65
 Capítulo III	
Figura III.1 Ubicación de los sondeos.	70
Figura III.2 Corte estratigráfico <i>Guelatao–Peñón Viejo</i> .	75
Figura III.3 Corte estratigráfico <i>Peñón Viejo – Acatitla</i> .	76
Figura III.4 Corte estratigráfico <i>Acatitla – Santa Marta</i> .	77
Figura III.5 Corte estratigráfico <i>Santa Marta – Los Reyes</i> .	78
Figura III.6 Localización en planta de las estaciones piezométricas (LAC, 2005).	79
Figura III.7 Mediciones piezométricas.	81
Figura III.8 Ubicación de sondeos del contenido de agua.	89

	PÁG.
Figura III.9 Diagrama de dispersión del contenido de agua.	90
Figura III.10 Histograma del contenido de agua.	91
Figura III.11 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección horizontal.	92
Figura III.12 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección vertical.	92
Figura III.13 Corte estimado (virtual) de contenido de agua.	94
Figura III.14 Ubicación de sondeos de cono eléctrico.	95
Figura III.15 Diagrama de dispersión de la resistencia de punta de cono eléctrico.	96
Figura III.16 Histograma de la resistencia de punta de cono eléctrico.	97
Figura III.17 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección horizontal.	98
Figura III.18 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección vertical.	98
Figura III.19 Corte estimado (virtual) de resistencia de punta de cono eléctrico.	100

Capítulo IV

Figura IV.1 Estación <i>Peñón Viejo</i> , vista oblicua.	102
Figura IV.2 Sección transversal de la estación <i>Peñón Viejo</i> .	103
Figura IV.3 Secciones estructurales del cajón en planta del tramo de estudio.	104
Figura IV.4 Sección transversal del cajón con losa de cimentación.	104
Figura IV.5 Sección transversal del cajón con celdas de cimentación.	105
Figura IV.6 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .	106
Figura IV.7 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .	107
Figura IV.8 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .	108
Figura IV.9 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo <i>Marta-Los Reyes</i> .	109
Figura IV.10 Junta de construcción tipo del muro del cajón.	100
Figura IV.11 Junta de expansión tipo del muro del cajón (armado del muro central).	111
Figura IV.12 Comparación de la localización de juntas en el tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> , entre 1987 y 2003.	116
Figura IV.13 Comparación de la localización de juntas en el tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> , entre 1987 y 2003.	117
Figura IV.14 Comparación de la localización de juntas en el tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> , entre 1987 y 2003.	118
Figura IV.15 Comparación de la localización de juntas en el tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i> , entre 1987 y 2003.	119
Figura IV.16 Movimientos verticales del tramo <i>Guelatao-Los Reyes</i> efectuadas en 1987 y 2001.	122
Figura IV.17 Nivelaciones topográficas en el tramo <i>Guelatao -Peñón Viejo</i>	124

	PÁG.
	en 1987, 2001 y 2007.
Figura IV.18	125
Figura IV.19	126
Figura IV.20	127
Figura IV.21	127
Figura IV.22	128
Figura IV.23	128
Figura IV.24	128
Figura IV.25	129
Figura IV.26	129
Figura IV.27	129
Figura IV.28	129
Figura IV.29	130
Figura IV.30	130
Figura IV.31	130
Figura IV.32	130
Figura IV.33	130
Figura IV.34	131
Figura IV.35	131
Figura IV.36	131
Figura IV.37	131
Figura IV.38	132
Figura IV.39	132
Figura IV.40	132
Figura IV.41	132
Figura IV.42	132
Figura IV.43	132
Figura IV.44	133
Figura IV.45	133
Figura IV.46	133
Figura IV.47	133
Figura IV.48	135
Figura IV.49	136
Figura IV.50	138
Figura IV.51	139
Figura IV.52	141

	PÁG.
	de los tubos utilizados para la inyección del lodo.
Figura IV.53	141
	Placa metálica fijada en juntas de expansión y construcción con tendencia a abrirse.
Figura IV.54	142
	Cambio de balastro, km 17+500.
Figura IV.55	144
	Series de Fourier asociadas a la curva de asentamientos, tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.56	145
	Series de Fourier asociadas a la curva de asentamientos, tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .
Figura IV.57	145
	Series de Fourier asociadas a la curva de asentamientos, tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .
Figura IV.58	146
	Series de Fourier asociadas a la curva de asentamientos, tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i> .
Figura IV.59	147
	Armónicas de la deformación en representación de Fourier, tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.60	148
	Armónicas de la deformación en representación de Fourier, tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .
Figura IV.61	148
	Armónicas de la deformación en representación de Fourier, tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .
Figura IV.62	149
	Armónicas de la deformación en representación de Fourier, tramo <i>Santa Marta- Los Reyes</i> .
Figura IV.63	150
	Espectro de la serie de Fourier (T=2510 m; N = 251) tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.64	151
	Espectro de la serie de Fourier (T=1690 m; N = 169), tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .
Figura IV.65	151
	Espectro de la serie de Fourier (T=1430 m; N = 143), tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .
Figura IV.66	152
	Espectro de la serie de Fourier (T=2090 m; N = 209), tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i> .
Figura IV.67	153
	Modelación del tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.68	154
	Asentamientos medidos y línea de tendencia tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.69	155
	Zonas potenciales de huecos bajo la estructura tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.70	155
	Zonas potenciales de huecos bajo la estructura tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .
Figura IV.71	155
	Zonas potenciales de huecos bajo la estructura tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .
Figura IV.72	156
	Zonas potenciales de huecos bajo la estructura tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i> .
Figura IV.73	157
	Estructura tipo del cajón del metro.
Figura IV.74	158
	Esfuerzos en la parte superior del cajón en el tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.75	158
	Esfuerzos en la parte inferior del cajón en el tramo <i>Guelatao-Peñón Viejo</i> .
Figura IV.76	159
	Esfuerzos en la parte superior del cajón en el tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .

	PÁG.
Figura IV.77 Esfuerzos en la parte inferior del cajón en el tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i> .	159
Figura IV.78 Esfuerzos en la parte superior del cajón en el tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .	160
Figura IV.79 Esfuerzos en la parte inferior del cajón en el tramo <i>Acatitla-Santa Marta</i> .	160
Figura IV.80 Esfuerzos en la parte superior del cajón en el tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i> .	161
Figura IV.81 Esfuerzos en la parte inferior del cajón en el tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i> .	161
Figura IV.82 Casos analizados de la deformación del suelo.	163
Figura IV.83 Desplazamientos impuestos para el caso A.	164
Figura IV.84 Esfuerzos en la parte superior del cajón (muro), caso A.	164
Figura IV.85 Esfuerzos en la parte inferior del cajón (losa), caso A.	164
Figura IV.86 Desplazamientos impuestos para el caso B.	165
Figura IV.87 Esfuerzos en la parte superior del cajón (muro), caso B.	165
Figura IV.88 Esfuerzos en la parte inferior del cajón (losa), caso B.	165
Figura IV.89 Desplazamientos impuestos para el caso C.	166
Figura IV.90 Esfuerzos en la parte superior del cajón (muro), caso C.	166
Figura IV.91 Esfuerzos en la parte inferior del cajón (losa), caso C.	166
Figura IV.92 Desplazamientos impuestos para el caso D.	167
Figura IV.93 Esfuerzos en la parte superior del cajón (muro), caso D.	167
Figura IV.94 Esfuerzos en la parte inferior del cajón (losa), caso D.	167
Figura IV.95 Esfuerzos máximos en el muro cajón al variar "h".	169
Figura IV.96 Esfuerzos máximos en la losa del cajón al variar "h".	169
Figura IV.97 Esfuerzos máximos en el muro cajón al variar "l".	170
Figura IV.98 Esfuerzos máximos en la losa del cajón al variar "l"	170
Figura IV.99 Malla deformada del tramo transversal analizado condición actual, Caso I, abatimiento piezométrico de 30% (Auvinet <i>et al.</i> , 2007)..	172
Figura IV.100 Malla deformada del tramo transversal analizado condición a futuro, Caso I, abatimiento piezométrico de 60% (Auvinet <i>et al.</i> , 2007).	172
Figura IV.101 Características de la sección longitudinal analizada, Caso II (Auvinet <i>et al.</i> , 2007).	173
Figura IV.102 Junta constructiva sujeta a giro positivo (muro central, km 19+035 del tramo <i>Peñón Viejo-Acatitla</i>).	173
Figura IV.103 Junta de expansión sujeta a giro positivo (muro central, km 22+350 del tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i>).	173
Figura IV.104 Características de la sección longitudinal analizada, Caso III (Auvinet <i>et al.</i> , 2007).	174
Figura IV.105 Junta constructiva sujeta a giro negativo (muro sur, km 19+733, del tramo <i>Peñón Viejo - Acatitla</i>).	174
Figura IV.106 Junta constructiva sujeta a giro negativo (muro norte, km 21+354 del tramo <i>Santa Marta-Los Reyes</i>).	174

LISTA DE TABLAS

Capítulo II	Pág.
Tabla II.1 Elementos considerados para enmarcar y fundamentar el modelo geotécnico en la zona.	4
Tabla II.2 Elevaciones principales dentro de la zona.	15
Tabla II.3 Formación y descripción de la unidades geológicas (Mooser, 1996).	19
Capítulo III	
Tabla III.1 Tabla de sondeos.	69
Tabla III.2 Datos de sondeos geotécnicos.	71
Tabla III.3 Datos generales de las estaciones piezométricas (LAC, 2005).	79
Tabla III.4 Lecturas piezométricas (LAC, 2005 y 2006).	80
Tabla III.5 Coordenadas de ubicación de los sondeos para contenido de agua.	86
Tabla III.6 Coordenadas de ubicación de los sondeos para resistencia de punta.	87
Tabla III.7 Parámetros estadísticos.	91
Tabla III.8 Distancias de correlación del contenido de agua.	92
Tabla III.9 Parámetros estadísticos.	97
Tabla III.10 Distancias de correlación de la resistencia de punta de cono eléctrico.	98
Capítulo IV	
Tabla IV.1 Cadenamientos y propiedades geométricas del cajón del metro.	105
Tabla IV.2 Juntas en el tramo <i>Guelatao - Peñón Viejo</i> .	112
Tabla IV.3 Juntas en el tramo <i>Peñón Viejo – Acatitla</i> .	113
Tabla IV.4 Juntas en el tramo <i>Acatitla – Santa Marta</i> .	114
Tabla IV.5 Juntas en el tramo <i>Santa Marta – Los Reyes</i> .	114
Tabla IV.6 Cadenamientos donde interfiere el <i>cerro del Marqués</i> y la <i>sierra Santa Catarina</i> con el cajón del metro.	125
Tabla IV.7 Ubicación de fallas en las juntas (<i>Guelatao–Los Reyes</i>).	134
Tabla IV.8 Ubicación de fallas en los tramos, (<i>Guelatao–Los reyes</i>).	137
Tabla IV.9 Esfuerzos máximos obtenidos para los casos propuestos.	163

NOMENCLATURA

a	Área bajo la curva de una función
A	Área transversal
$V(X)$	Campo aleatorio
$\rho_V(X_1, X_2)$	Coefficiente de autocorrelación
$a(k)$	Coefficiente de fourier (amplitud de la función coseno)
$b(k)$	Coefficiente de fourier (amplitud de la función seno)
λ	Coefficiente de peso de estimación, kriging ordinario
$CV_V(X)$	Coefficiente de variación del campo aleatorio
β	Coefficiente del modelo de correlación espacial
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$	Coefficientes polinominales
w	Contenido de agua
x, y, z	Coordenadas de un punto dentro de una región R_p ,
$\varepsilon(x)$	Deformación del elemento barra
v_1, v_2	Desplazamientos verticales en los nodos de la viga
$\sigma_V(X)$	Desviación estándar del campo aleatorio
R_p	Dimensión del campo aleatorio
α	Dirección (Azimut) en que se estiman las funciones de variabilidad espacial
δ	Distancia de correlación o influencia
h	Distancia de separación entre los puntos X_1 y X_2
y	Distancia del centroide a la fibra más alejada
ε	Error aleatorio
σ	Esfuerzo
$\mu_V(X)$	Esperanza
F_{y_1}, F_{y_2}	Fuerzas en los nodos de la viga
$R_V(X_1, X_2)$	Función de autocorrelación
$C_V(X_1, X_2)$	Función de autocovarianza:
e	Función exponencial

ÍNDICE

θ_1, θ_2	Giros en los nodos de la viga
k	Índice frecuencial o variable frecuencial discreta
L	Longitud del elemento barra, Longitud del sondeo
K^e	Matriz de rigidez
\bar{x}	Media de una muestra de datos
x	Mediana de una muestra de datos
E	Módulo de elasticidad
I	Módulo de inercia
M	Momento
M_1, M_2	Momentos en los nodos de la viga
n	Número total de datos en una muestra
N	Numero total de muestras discretas
γ	Peso volumétrico
ν	Relación de Poisson
$W_{\text{ext}}, W_{\text{int}}$	Trabajo externo y interno respectivamente
$X(k)$	Transformada discreta de Fourier
$X, X1, X2$	Variable aleatoria
n	Variable discreta
$\sigma_v^2(X)$	Varianza de una muestra de datos
$2\gamma(h)$	Variograma
$x(n)$	Vector de datos de entrada
u^e	Vector de desplazamientos

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes

A 82 años de su descubrimiento por Roberto Gayol y a 60 años de su explicación científica realizada por Nabor Carrillo en 1947, el fenómeno del hundimiento regional persiste, con manifestaciones cada vez más dramáticas, causando asentamientos diferenciales y grietas en el suelo lacustre, dañando seriamente las obras de infraestructura, estructuras coloniales y modernas de la ciudad de México. Instalaciones metropolitanas tan importantes como el *Gran canal*, la *Red de agua potable* y el *Metro*, sufren también sus efectos. En el presente trabajo se analizan algunos aspectos de esta problemática con énfasis en el comportamiento de la *Línea A* del sistema de transporte colectivo (metro).

La *Línea A* del metro se ubica al oriente de la zona metropolitana de la ciudad de México, sobre uno de los corredores de mayor demanda de transporte urbano que es la calzada *General Ignacio Zaragoza*, tiene su origen en el centro urbano *Pantitlán* en la delegación *Iztacalco*, y termina en el municipio de *La Paz* en el Estado de México. La longitud de la línea es de 17 km, de los cuales 13 km se localizan en el Distrito Federal y 4 km en el Estado de México.

Con más de 15 años de servicio, se han presentado movimientos diferenciales considerables, principalmente a lo largo del tramo delimitado por las estaciones *Guelatao* y *Acatitla*, generando deformaciones en la estructura del cajón, oquedades bajo la losa y celda de cimentación, que inducen esfuerzos para los que no fue diseñada la estructura, así como desplazamientos relativos entre las diferentes secciones estructurales que la constituyen, los cuales han ocasionado concentración de esfuerzos y causado deformaciones excesivas en las vías. Estos puntos de riesgo se han extendido a lo largo de la línea entre las estaciones *Acatitla* y *Los Reyes*. Estos problemas han sido resueltos solamente en forma temporal con soluciones que, hasta ahora, no consideran la evolución del fenómeno.

El tramo delimitado por las estaciones *Guelatao* y *Los Reyes* de la *Línea A* del metro es, en su mayor parte, de tipo superficial, tiene una trayectoria NE-SW y en general, de acuerdo con el mapa de zonificación geotécnica del Distrito Federal (GDF, 2004), la línea férrea se desplanta de manera alternada sobre las zonas geotécnicas II y III. La zona II (de transición), está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre de espesor variable entre decenas de centímetros y pocos metros. La zona III (de Lago), se caracteriza por presentar potentes estratos de arcilla con alto contenido de agua, baja resistencia y alta compresibilidad.

El problema de los asentamientos diferenciales sobre la calzada *General Ignacio Zaragoza* y en la estructura del metro se manifiesta cada vez con mayor frecuencia y se debe fundamentalmente al tipo de suelo de la zona y al proceso de hundimiento regional que afecta a toda la zona lacustre del valle de México. Han aparecido agrietamientos, los cuales son evidentes al transitar por dicha vialidad que se encuentra paralela a la línea férrea, donde se observa la ondulación de la superficie de rodamiento, obligando al conductor a disminuir la velocidad. En ciertos puntos de esta vialidad se observa que el muro deflector que delimita la vía del tren con la calzada, y que inicialmente tenía una altura de proyecto de aproximadamente 1.0m, ahora tiene solamente 30cm de altura. Estos efectos indican las condiciones a las que está sometido el cajón del metro.

Aunado a la presencia de potentes estratos compresibles sujetos a la consolidación por la extracción del agua del subsuelo, la proximidad del *cerro del Marqués* y de la *sierra de Santa Catarina* con la *Línea A* del metro, influyen fuertemente en el comportamiento del cajón. En el trazo geométrico de la *Línea A*, se pueden apreciar grietas que cruzan por todo el ancho de la *calzada General Ignacio Zaragoza*, con una orientación predominante Norte-Sur.

Con base en lo anterior, resulta evidente la importancia de estudiar con detalle la distribución estratigráfica y las características geotécnicas a lo largo de la *Línea A* del metro, en la zona delimitada por las estaciones *Guelatao* y *Los Reyes*. En este trabajo se usa la geoestadística para la caracterización del subsuelo, y la definición de la estratigrafía para el análisis del comportamiento mecánico y desarrollo de soluciones que permitan la compatibilidad de la estructura del metro con el comportamiento del suelo.

Asimismo, actualmente existen herramientas computacionales que permiten recolectar, ordenar e interpretar la información existente con gran eficiencia, como son los Sistemas de Información Geográfica (*SIG's*), estos sistemas facilitan la organización e interacción de la información disponible (geología, topografía, sondeos, pozos de agua, fotografías aéreas digitales, etc.), para una interpretación global de la naturaleza de los depósitos de suelo y la configuración de las formaciones geológicas. Dichas herramientas se apoyan en los Sistemas de Percepción Remota (*SPR*) y Sistemas de Posicionamiento Global (*GPS*) para la visualización simultánea de varias capas de información.

I.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es describir las condiciones geotécnicas de la zona próxima al *cerro del Marqués*, sobre la que se ubica la *Línea A* del metro, en el tramo *Guelatao - Los Reyes*, mediante la interpretación de información física, geográfica y de sondeos geotécnicos con la ayuda de herramientas computacionales. Con base en el estudio de las condiciones del subsuelo se analiza y evalúa el comportamiento del cajón del metro mediante un modelo simplificado y se examinan algunas alternativas de solución a los problemas de asentamientos diferenciales y deformaciones que se presentan en el subsuelo.

I.3 Alcances

El trabajo tiene los siguientes alcances:

1. Recopilación y estudio de la información existente (geotécnica, geológica, geohidrológica, histórica, cartográfica, topográfica, instalaciones subterráneas municipales y privadas, y estudios previos sobre el problema).
2. Revisión e interpretación de la información geotécnica disponible proveniente de exploraciones geotécnicas realizadas en la zona.
3. Levantamiento planimétrico de grietas, daños y anomalías geotécnicas detectadas en el corredor de estudio, mediante el empleo de un equipo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
4. Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica particular para este estudio, que integre mediante capas temáticas la información básica disponible en formato digital.
5. Desarrollo de un modelo geotécnico de la configuración estratigráfica tradicional del subsuelo y perfiles estratigráficos longitudinales estimados con geoestadística en el tramo de estudio.
6. Evaluación de los movimientos totales y diferenciales con base en la información de levantamientos topográficos realizados sobre la línea del metro.
7. Identificación de las causas que inducen movimientos diferenciales en el cajón del metro.
8. Participación en el desarrollo de un modelo numérico simplificado para el análisis del comportamiento del cajón del metro, simulando las deformaciones del suelo y en la interpretación de los resultados obtenidos.
9. Revisión de algunas medidas propuestas para la mitigación de daños

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

Para conocer y comprender la genética natural de los depósitos de suelo, rellenos aluviales, afloramientos de rocas, así como la estratigrafía del subsuelo en la zona próxima al *cerro del Marqués* y en un tramo de la *Av. General Ignacio Zaragoza* y *Generalísimo Morelos*, en el tramo delimitado por la *Av. Crisóstomo Bonilla* y la calle *Gustavo Baz Prada*, es necesario definir dos marcos de referencia: el geográfico y el físico. En la Tabla II.1 se presenta la información considerada en cada uno de estos marcos.

Tabla II.1 Elementos considerados para enmarcar y fundamentar el modelo geotécnico en la zona (Méndez, 2005).

MARCO GEOGRÁFICO	MARCO FÍSICO
<ul style="list-style-type: none"> - Información histórica - Cartografía - Topografía - Imágenes de satélite - Fotografías aéreas 	<ul style="list-style-type: none"> - Geología - Geomorfología - Geofísica - Hidrografía - Zonificación geotécnica - Sondeos geotécnicos

A continuación, se describen los elementos considerados dentro del *Marco Geográfico* y el *Marco Físico* empleados para la caracterización geotécnica de la zona.

II.1 Marco geográfico

El marco geográfico es utilizado como el soporte clásico de información acerca de la forma y dimensiones del entorno general de un territorio a través del idioma espacial, el cual se encarga de describir los rasgos u objetos geográficos (ríos, laderas, calderas, conos, vías de comunicación, otros) mediante la representación de puntos, líneas y áreas, empleando diferentes símbolos y colores que facilitan su interpretación (Méndez, 2005). También, incluye imágenes de satélite y fotografías aéreas digitales; las cuales, son documentos o recursos tecnológicos relativamente novedosos, usados ampliamente hoy en día como método preliminar de reconocimiento y adquisición de datos de áreas extensas sin necesidad de ir al campo, es decir, complementan y enriquecen las tareas de gabinete de los especialistas.

II.1.1 Ubicación geográfica

La cuenca de México se localiza en la parte sur de la Meseta Central del Altiplano Mexicano sobre el Eje Neovolcánico Transversal. Esta cuenca es una de las más grandes de la región y se ubica entre los paralelos $19^{\circ} 01' 18''$ y $20^{\circ} 09' 12''$ de latitud norte, entre los meridianos $98^{\circ} 31' 58''$ y $99^{\circ} 30' 52''$ de longitud al oeste de Greenwich, y comprende una superficie aproximada de $9,600 \text{ km}^2$, Fig. II.1.

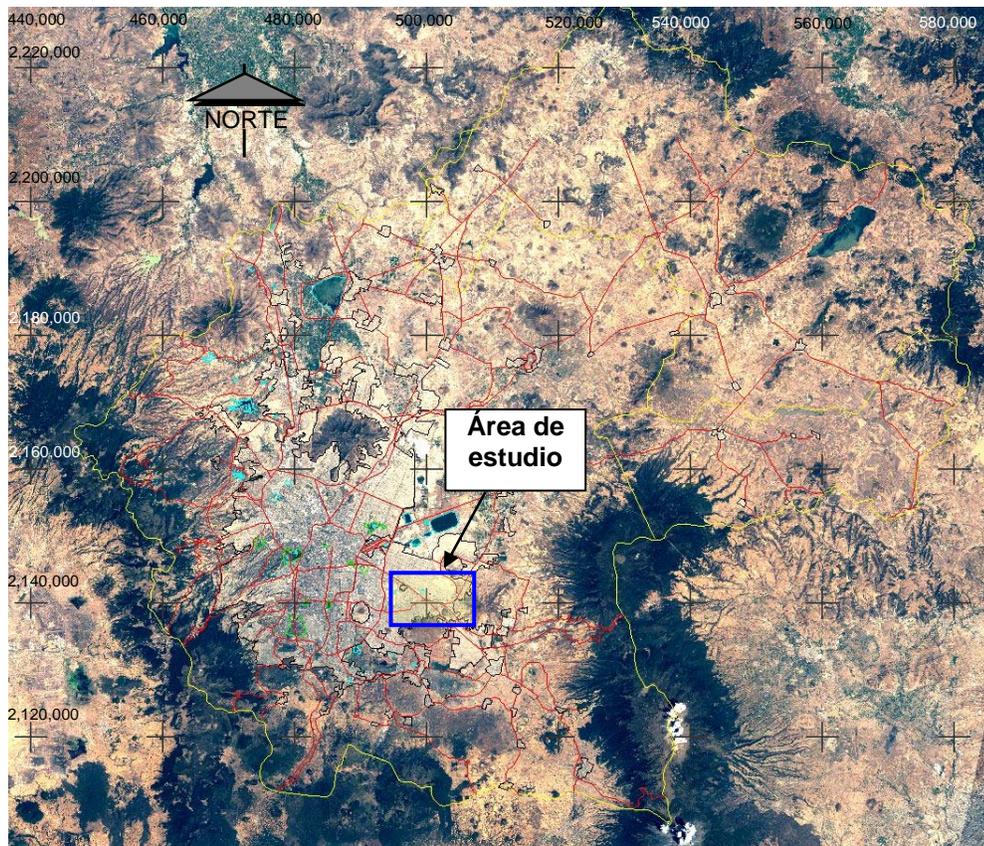


Figura II.1 Localización del área de estudio en la cuenca de México.

Tienen jurisdicción en la cuenca, el Distrito Federal y los Estados de: México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla, está limitada al norte por las sierras de Tezontalpan, Tepotzotlan y Pachuca; al sur por la sierra de Chichinautzin; al oriente las sierras Nevadas, Río Frío y Calpulalpan; y al poniente la sierra de las Cruces, sierra de Monte Alto y de Monte Bajo. La cuenca está constituida por tres zonas típicas: la zona plana, que corresponde a los fondos de los antiguos lagos, la zona de lomeríos y la zona montañosa.

La zona en estudio se localiza en la parte sur-oriente de la cuenca de México, el área está limitada por las coordenadas geográficas 19°20'28" a 19°24'08" de latitud norte y 98°57'42" a 99°03'28" de longitud oeste, cubriendo una extensión aproximada de 63 km², Fig. II.2, dentro del área se encuentra un tramo de la *Línea A* del metro.

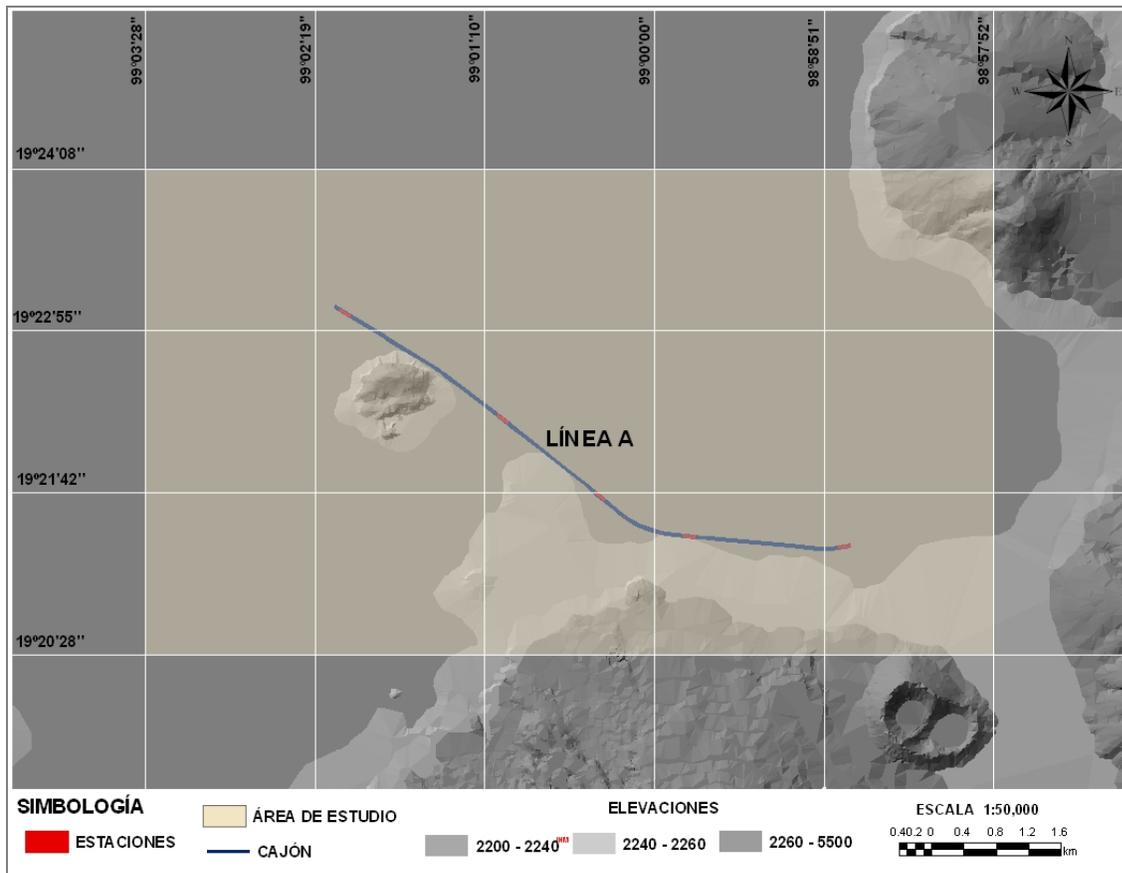


Figura II.2 Límites del área de estudio.

El tramo de la *Línea A* en estudio, es colineal a la calzada *General Ignacio Zaragoza y Generalísimo Morelos*; parte de la vía se ubica en la delegación Iztapalapa en el Distrito Federal y parte en el municipio de *Los Reyes, La Paz*, en el Estado de México, Fig. II.3. El área de estudio colinda al norte con el municipio de Netzahualcoyotl, Chimalhuacán y Chicoloapan, al oriente con Tlahuac, e Ixtapaluca, al sur con las delegaciones Tlahuac, Xochimilco y el municipio de Chalco y al poniente con las delegaciones Coyoacan, Benito Juárez e Iztacalco.

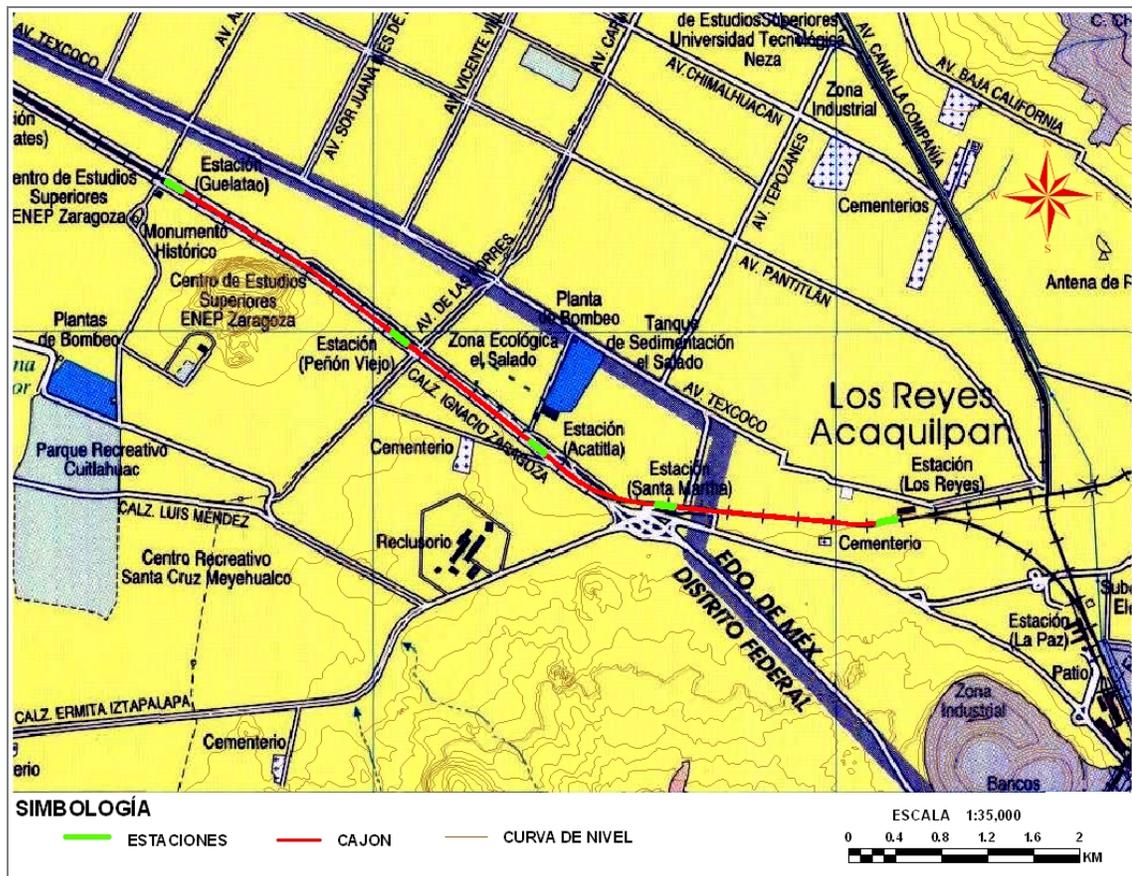


Figura II.3 Ubicación de la zona y del tramo en estudio (INEGI, 2003).

II.1.2 Información histórica

Uno de los aspectos más significativos tomados en cuenta en los análisis presentados en este trabajo, es la información contenida en litografías, mapas históricos y mosaicos de fotografías aéreas antiguas. Estos documentos dan cuenta de los aportes prehispánicos y de la evolución de la ciudad española a través de la cartografía urbana virreinal y dejan ver las transformaciones que tuvieron lugar durante los siglos XIX y XX, Fig. II.4.



Camino a Chalco, 1891



Camino a Chalco, 2005

Figura II.4 Vistas oblicuas de la zona en estudio.

Estos documentos tienen un alto significado geotécnico y geológico como: ubicación de cauces de antiguos ríos y barrancas, trazo y cruces de antiguos canales; configuración y extensión de ex-lagos y lagunas (encharcamientos temporales); bordos o diques; calzadas; etc. Su estudio puede contribuir en el análisis de la historia de cargas en determinados predios, ayudando a comprender muchas de las causas del mal comportamiento de algunas estructuras y de sus problemas posibles, Figs. II.5 a II.7. Esta información permite también detectar cambios en los escenarios del marco geográfico a través de las características, condiciones y rasgos generales del subsuelo, mediante la superposición con documentos actuales (Méndez, 2005). Asimismo ayuda a confirmar, ampliar, explicar, definir, complementar características y fisonomías del entorno natural y del escenario urbano cubiertos por la urbanización y olvidados en la memoria de los hombres. Permite además comprobar alguna tendencia o simplemente, verificar la lógica respecto a alguna densidad o patrón de ciertos resultados, a través de los parámetros, variables, características, plasmados por el cartógrafo. Contribuye a la obtención de una visión del conjunto de todo el territorio, necesaria para la comprensión de la naturaleza de los depósitos de suelo, rellenos arqueológicos y formaciones geológicas que se alojan en la zona.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, el área en estudio, Fig. II.5, a pesar de encontrarse a escasos 14 kilómetros de la capital, era una zona rural conformada por ejidos, cuyos habitantes formaban una gran comunidad de chinamperos (que en su mayoría eran indígenas nahuas), su actividad económica se basaba en la agricultura, por ser el suelo propicio ya que era cenagoso.

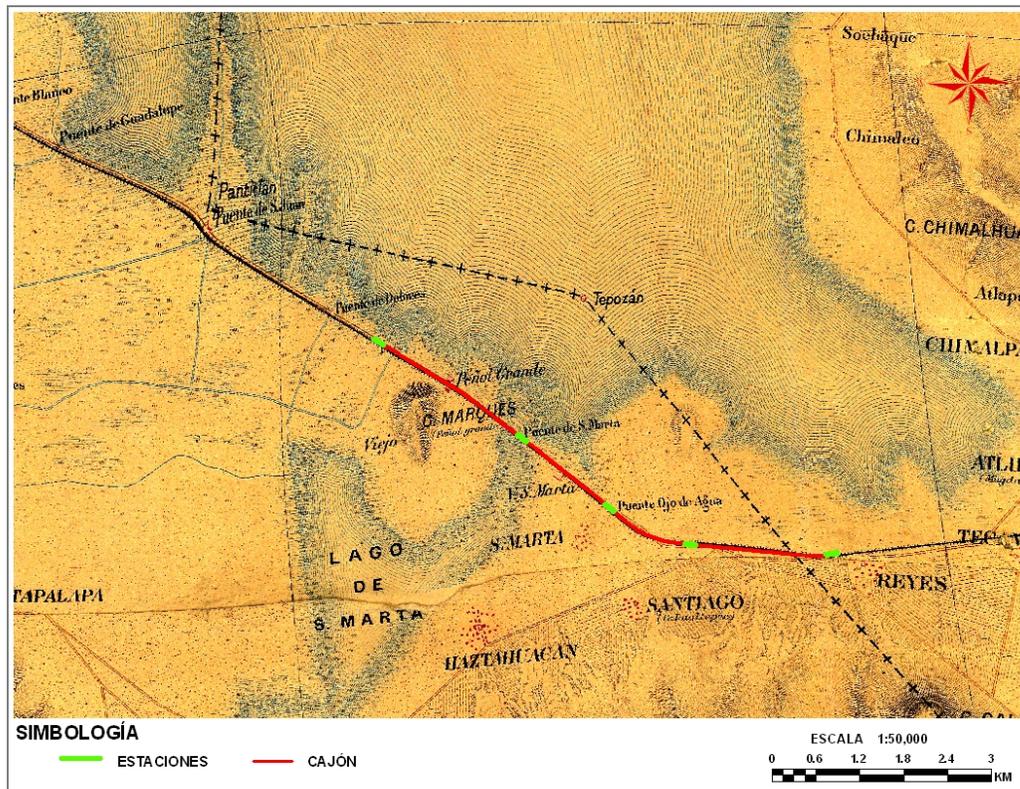


Figura II.5 Zona en estudio (Carta Corográfica de Fernández Leal, 1899).

Durante esa época existía un canal que comunicaba el lago de Texcoco y el lago de Santa Marta. El tramo en estudio conformaba uno de los accesos principales a la ciudad, de viajeros procedentes de Puebla o Veracruz, el camino pasaba a un lado del *cerro del Marqués*. Existieron las haciendas de *La Soledad*, *La Purísima* y de *San Nicolás Tolentino de Buenavista* y hacia el *cerro del Marqués* las haciendas de *El Peñón* y *El Arenal*; había además varios ranchos en distintos lugares: *La Viga*, *El Tesoro*, *Tres Puentes*, *Asunción* y *Santa María* entre otros. Se explotaban algunas canteras: *Culhuacán*, *el Peñón Viejo* y la parte sur del *cerro del Marqués*. El derecho de vía del tramo de estudio pertenecía al ferrocarril Interoceánico, el cual partía de la estación San Lázaro con destino al puerto de Veracruz o Puebla, Fig. II.6.

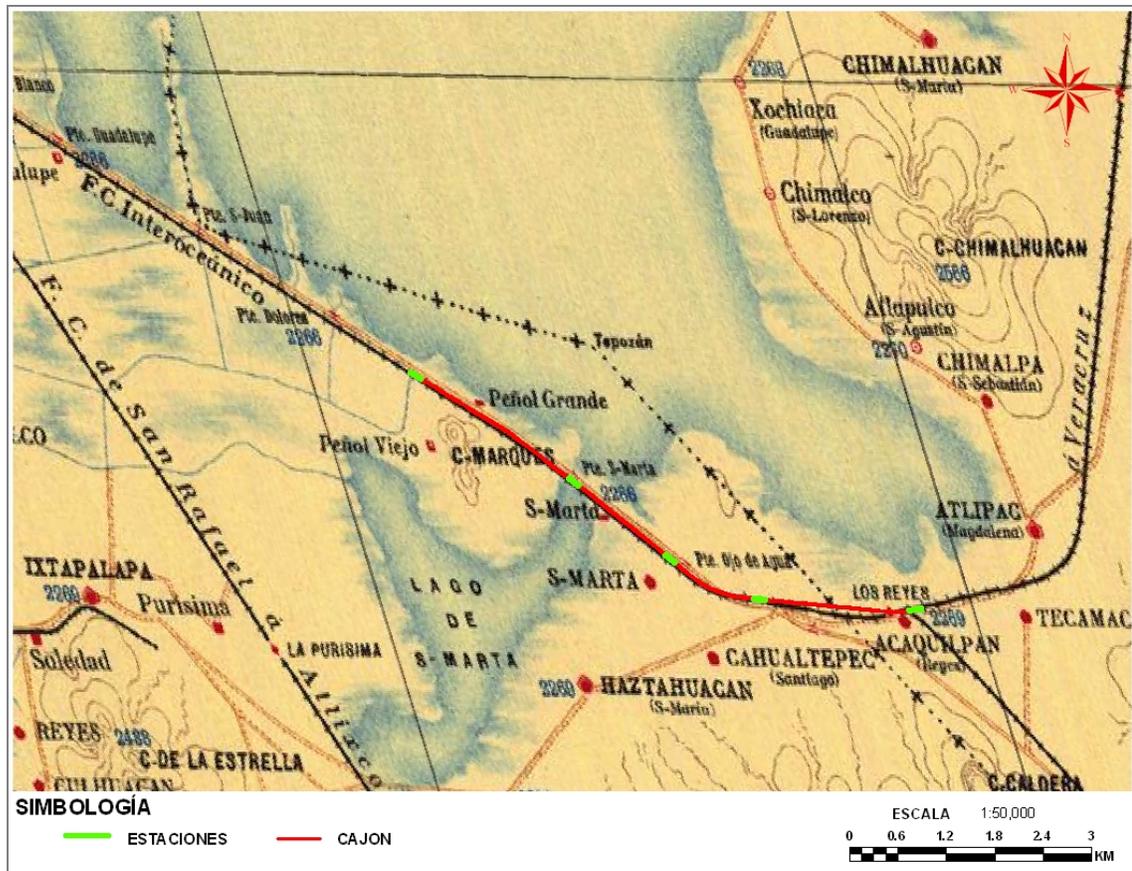


Figura II.6 Zona en estudio
(Carta Corográfica de la Comisión Geográfica de Guerra y Fomento, 1909).

Hacia 1920, Fig. II.7, la población aproximada en la zona era de 20 mil habitantes. Posteriormente, con la revolución mexicana, se dio paso a la figura del ejido. Para principios de los años treinta el reparto de tierras había concluido con el desmembramiento de la mayoría de las haciendas existentes y se inició la expansión de la mancha urbana con las delegaciones vecinas. En 1955 fue entubado el *Canal de la Viga*, que pasó a ser un drenaje cubierto. Las últimas chinampas de Culhuacán y Mexicaltzingo, que colindaban con el canal, fueron desapareciendo paulatinamente.

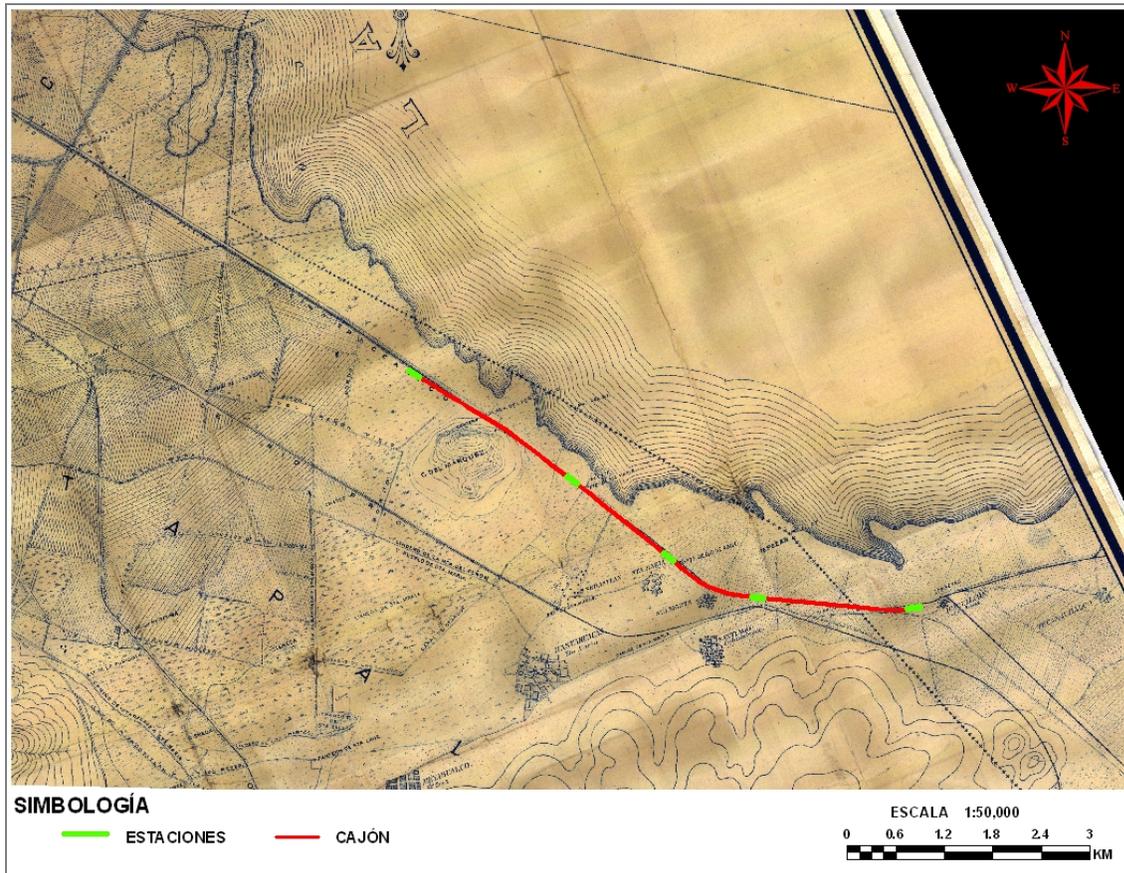


Figura II.7 Zona en estudio
(Mapa cartográfico de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1927).

Los asentamientos urbanos comenzaron en 1940, con la incorporación de los ocho barrios tradicionales de Iztapalapa al área urbana de la ciudad de México (*La Asunción, Santa Bárbara, San Ignacio, San José, San Lucas, San Miguel, San Pedro y San Pablo*), cada uno de ellos con su propia organización tradicional religiosa. Las iglesias de *San Lucas Evangelista, San Marcos Mexicaltzingo, San Juan Evangelista, la capilla del Calvario*, y la de *Santa Marta Acatitla*, fueron edificadas por los españoles sobre basamentos de templos prehispánicos (Teocalli).

El fenómeno de la desecación hizo mella en la zona, y para la década de los 50's, Fig. II.8, los campos fértiles se convirtieron en amplias tierras erosionadas. El lago de Santa Marta desapareció quedando sólo algunas lagunas temporales; esto ocasionó que el modo de vida de los nativos cambiara radicalmente, al no contar con infraestructura para el riego de los cultivos.

En la década de 1950 comienza la migración de personas de escasos recursos, provenientes del interior de la República hacia la capital. Al ser Iztapalapa una zona que tenía grandes terrenos derivados de la desecación, los migrantes comenzaron a asentarse en ellos, dando comienzo a una zona de asentamientos irregulares y colonias populares (GDF, 1996).

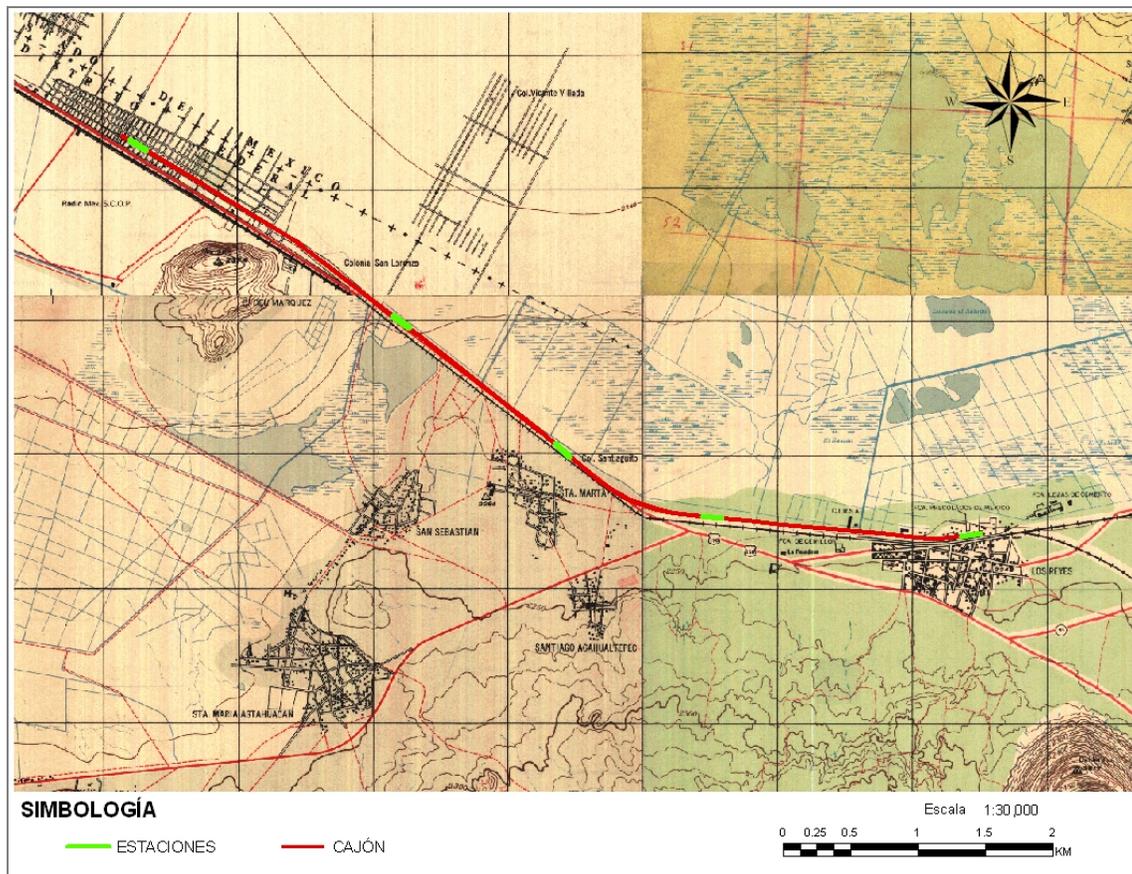


Figura II.8 Zona en estudio
(Mapa cartográfico de la Comisión Cartográfica Militar, 1950).

A partir de la década de 1960 y 1970, se observa un importante crecimiento urbano con la construcción de nuevas colonias como: *Sector Popular*, *Escuadrón 201* y *Héroes de Churubusco*, *Los Cipreses*, además de la ampliación de la zona industrial de *Santa Isabel*, ubicada entre la calzada Iztapalapa y la calzada Tulyehualco.

En el área de estudio, el mayor crecimiento urbano se da en la década de 1980 con la creación y ampliación de colonias como; *El Triunfo*, *Nueva Rosita*, *Paseos de Churubusco*, *Dr. Alfonso Ortiz Tirado*, *Guadalupe del Moral*, *Unidad Margarita Maza de Juárez*, *Vicentina*, *La Regadera*, *Constitución de 1917*, *Unidad Habitacional Vicente Guerrero*, *Flores Magón*, *El Molino*, *El Manto* y *Los Ángeles*. Sobre la calzada México Tulyehualco surgen colonias como: *Minerva*, *Barrio de Santa María Tomatlán*, *Campestre Estrella*, *Lomas Estrella*, *Unidad Benito Juárez*, *Granjas Estrella*, *Esther Zuno de Echeverría*, *Año de Juárez*, *Lomas San Lorenzo Tezonco*, *La Esperanza* y *El Triángulo*.

En 1990, Iztapalapa se convirtió en la delegación más poblada del Distrito Federal y en la localidad con mayor número de habitantes de la zona metropolitana de la ciudad de México. Debido al crecimiento desmesurado de la mancha urbana, Iztapalapa comienza a presentar incapacidad para satisfacer la demanda de servicios públicos (*agua potable*).

II.1.3 Cartografía

Los documentos cartográficos proporcionan información acerca de la forma y dimensiones del entorno general de un territorio dado; es decir, describen los rasgos u objetos geográficos mediante una representación de puntos y líneas que conforman áreas y se emplean diferentes colores y símbolos para facilitar su interpretación (conformados en un idioma clásico o universal). Estos documentos proporcionan un soporte de información y comunicación útil para enmarcar los estudios realizados por los especialistas de las distintas áreas o disciplinas de las Ciencias de la Tierra. De acuerdo con la nomenclatura cartográfica del INEGI, el tramo *Guelatao–Los Reyes* de la *Línea A* en estudio, se localiza en la carta ciudad de México (E14-A39 en escala 1:50000), Fig. II.9. La carta topográfica ciudad de México se presenta en la Fig. II.10.

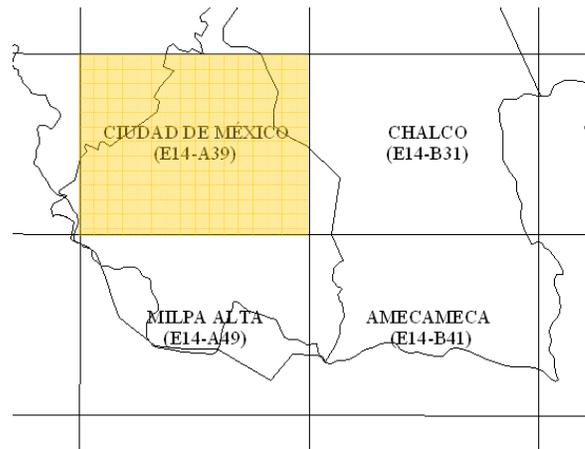


Figura II.9 Nomenclatura cartográfica del INEGI.



Figura II.10 Carta topográfica de la ciudad de México (E14 A 39), Esc. 1:50000 (INEGI, 2003).

Cada carta topográfica contiene información relacionada con la traza urbana de las localidades a nivel de calles, manzanas, plazas y parques, también contiene otros elementos como toponimia de las localidades o áreas urbanas. Las cartas topográficas en escala 1:10000 tienen la ventaja de mostrar la información urbana detallada, Fig. II.11.

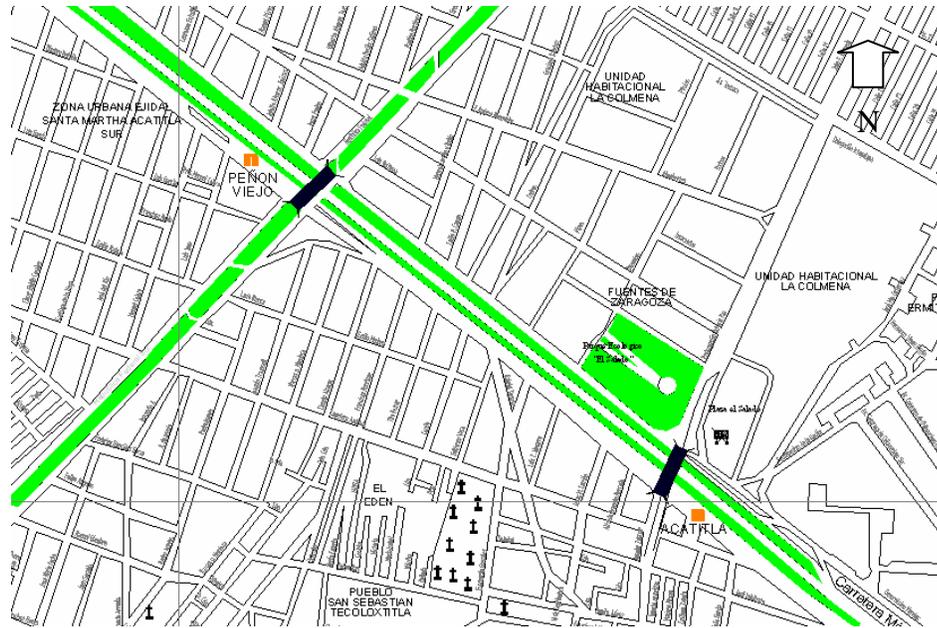


Figura II.11 Carta topográfica, Esc. original 1:10,000 (INEGI, 2003).

II.1.4 Topografía

La información topográfica proporciona numerosos datos sobre la superficie física del terreno, útiles para elaborar cartas o mapas orográficos y geomorfológicos; ayuda a la interpretación de la geología estructural, etc., a través de las formas y dimensiones del relieve con base en la planimetría y altimetría. Esas formas y dimensiones del relieve se manifiestan como: laderas, ríos, volcanes, calderas, conos, fallas, grietas, líneas o superficies de contacto, discontinuidades, valles, cuencas, etc.

La información topográfica es básica para llevar a cabo la interpretación y el análisis de las características y rasgos generales del relieve (abrupto, medio, suave y plano), ayudando a definir la extensión en longitud y ancho de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas mediante la proyección horizontal en un plano.

La información topográfica empleada en este trabajo proviene del INEGI, en formato digital, las curvas de nivel se encuentran a cada 10, 20 y 100m, estas curvas fueron revisadas, depuradas y personalizadas de acuerdo con las necesidades del presente trabajo para generar los Modelos Digitales de Terreno y sus derivados. En la Fig. II.12 se muestra la configuración topográfica en el tramo de estudio de la *Línea A*.

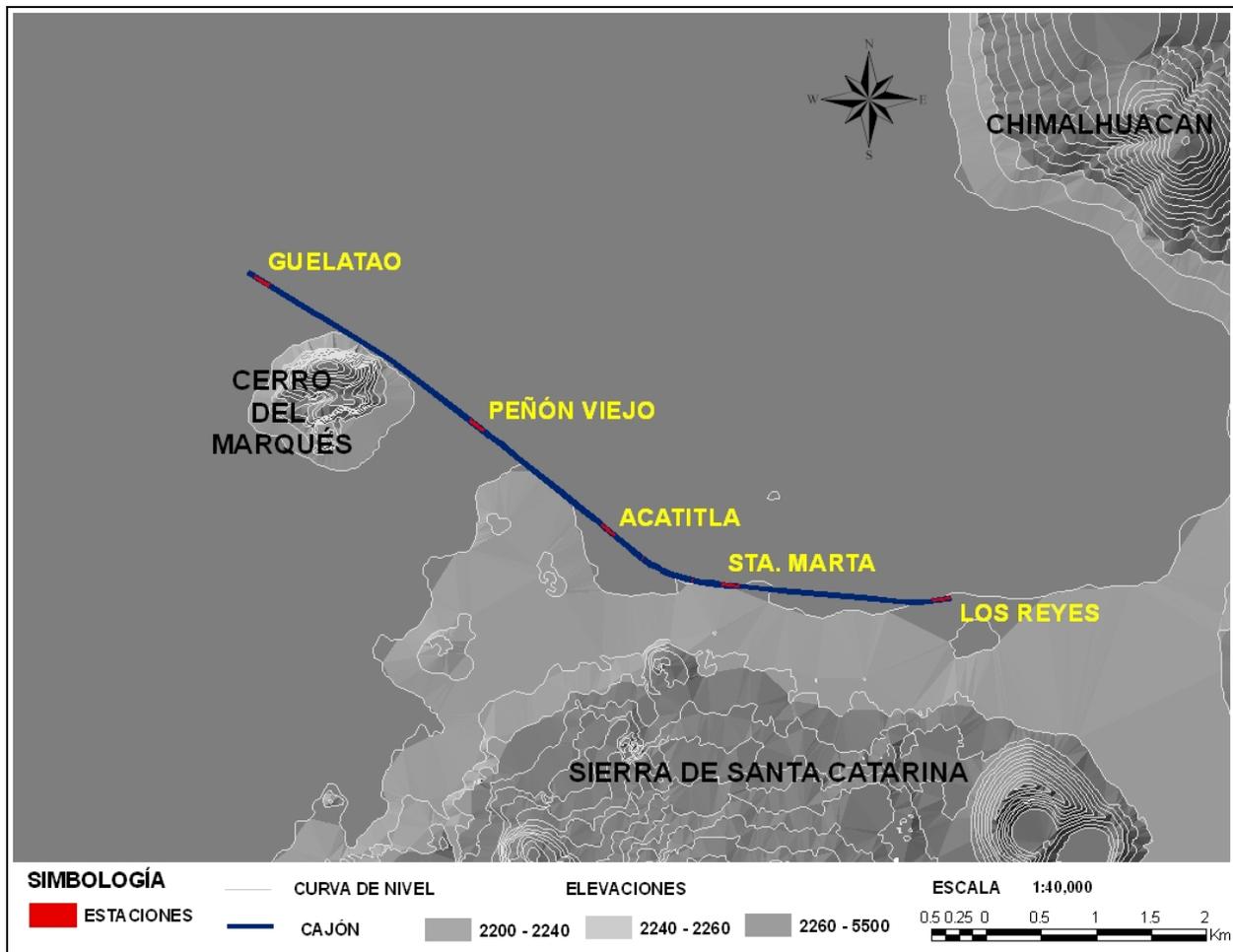


Figura II.12 Orografía y topografía de la zona en estudio.

En forma general, la superficie del tramo en estudio presenta una configuración sensiblemente plana, que corresponde a un 78% del área total limitada por las coordenadas geográficas, Fig. II.2, a una altura media de 2240 msnm, mientras que el 22% lo representan las áreas montañosas que ese encuentran entre las altitudes de 2240 y 2750 msnm, correspondiente a las zonas denominadas de pie de monte, aluviales y configuraciones abruptas del *cerro del Marqués* y partes altas de la *sierra de Santa Catarina*.

Las elevaciones más importantes de la zona de estudio son: el *cerro del Marqués*, el *cerro de la Estrella*, el *cerro de Tlapacoya* (el elefante), dentro de las características y rasgos generales del relieve montañoso se encuentran el *cerro de Chimalhuacán*, el *Pino* y la *sierra de Santa Catarina*, Tabla II.2.

La topografía sugiere que el tramo entre las estaciones *Guelatao - Peñón Viejo*, particularmente entre los cadenamientos 16+840 y 17+500, está sometido a la influencia del *cerro del Marqués*. El tramo de *Peñón Viejo a Los Reyes* está afectado por la presencia de la *sierra de Santa Catarina*, principalmente en los tramos correspondientes a los cadenamientos 18+900 a 19+540 y 21+080 a 21+580.

Tabla II.2 Elevaciones principales dentro de la zona.

Nombre	Elevación (msnm)
El cerro del Marqués	2370
El cerro de la estrella	2460
Volcán Guadalupe	2734
Volcán Tecuautzi	2590
Volcán Mazatepec	2410
Volcán Tetecon	2450
Volcán Xaltecec	2536
Volcán Yuhualixqui	2410
La caldera	2480
El Pino	2680
El cerro de Tlapacoya (el elefante)	2460
El cerro de Chimalhuacán	2520

La topografía tiene una notable influencia sobre las numerosas variables que intervienen en la dinámica de los procesos endógenos y exógenos los cuales, dan origen y modelan a través del tiempo al relieve. Por tal motivo, se ha generalizado el empleo del Modelo Digital del Terreno (MDT) en la práctica ingenieril, el cual ayuda a interpretar la configuración del terreno en tercera dimensión caracterizando su forma y sus alturas, Fig. II.13.

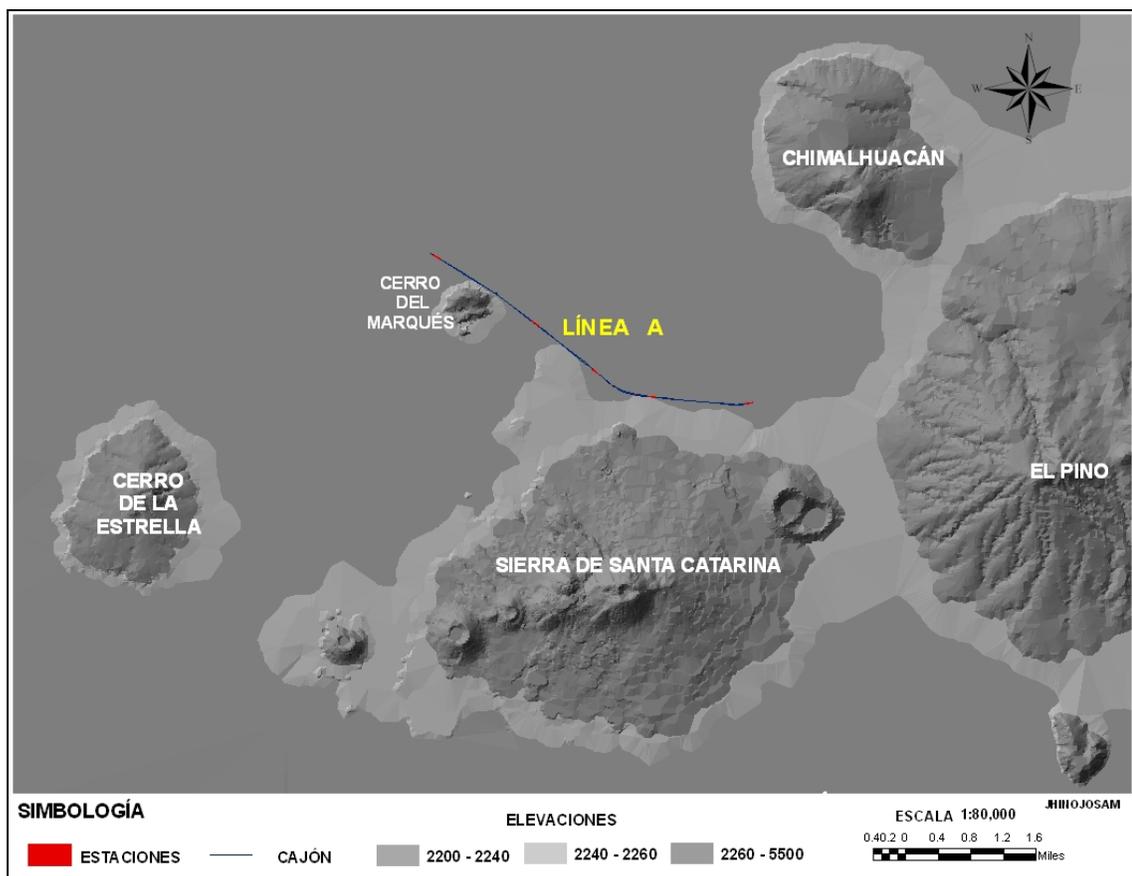


Figura II.13 Modelo digital del terreno de la zona de estudio.

La *sierra de Santa Catarina* está constituida por una serie de elevaciones que se extienden en dirección suroeste-noreste, comprendida por los volcanes; de Tecuautzin, Yuhualixqui, Xaltecec, Tetecon, Guadalupe, La Caldera, (Lugo-Hubp *et al.*, 1994), cuyas elevaciones se presentan en la Tabla II.2. La *sierra de Santa Catarina*, se encuentra expuesta a un grave deterioro ecológico, sus bosques han sido arrasados.

En temporada de lluvias, las cumbres de la *sierra de Santa Catarina* se cubren de una capa de vegetación que les da un aspecto saludable. Sin embargo, entre los meses de octubre a mayo, cuando las lluvias en la cuenca de México son escasas, es posible apreciar que está gravemente deforestada. Por si esto fuera poco, se encuentra expuesta a la explotación de sus yacimientos de tezontle, basalto y arena para fines de construcción.

II.1.5 Imágenes satelitales y fotografías aéreas

Una imagen de satélite es un recurso tecnológico relativamente novedoso y usado ampliamente hoy en día por los especialistas dedicados a las distintas áreas de las Ciencias de la Tierra, como un método de reconocimiento global. Estas imágenes complementan y enriquecen las tareas de gabinete y campo encaminadas a conocer a las características geométricas y rasgos físicos de los elementos naturales y artificiales de la superficie terrestre; así como su interrelación con otros objetos, es decir, ayudan a obtener con celeridad un conocimiento preliminar acerca del entorno o medio físico-geográfico, logrando con ello obtener una síntesis adecuada de un territorio dado mediante un simple análisis visual, Fig. II.1.

En formato digital, una imagen de satélite puede concebirse como una matriz de números que refieren un valor de reflectancia; una vez transformados, estos valores permiten generar una imagen. Cada número es adjudicado a una celda (o elemento de escena, píxel), cuyas dimensiones en el terreno definen la resolución espacial de la imagen. Así, el valor de cada celda en una imagen de satélite representa la cantidad de radiación que llega al sensor, desde los objetos presentes en la superficie terrestre, Fig. II.14. En forma simplificada, se puede suponer que ésta se encuentra cubierta por tres elementos fundamentales: vegetación, suelo, agua y sus combinaciones.

El procesamiento de imágenes consiste en manejar los valores de reflectancia en dos etapas relacionadas entre sí: pre-procesamiento y clasificación multispectral; la primera implica las correcciones radiométricas y geométricas de la imagen. La segunda implica la segmentación del paisaje con base en la respuesta espectral de su cobertura.

Esta extracción de información temática es comúnmente el objetivo central cuando se analizan imágenes de satélite para estudios del ambiente. Los criterios para el análisis visual de una imagen son: tono, color, textura (gruesa, mediana y fina) sombras, patrón espacial, contorno, formas de la imagen, etc.



Figura II.14 Imagen satelital de la cuenca de México
(Laboratorio de SIG y PR, Instituto de Geografía, UNAM, 2004).

La fotografía aérea digital, es un documento objetivo, gráfico, fiel y de amplia cobertura sobre el terreno que permite ampliar los horizontes de observación del medio físico y satisfacer la curiosidad humana por comprender mejor el mundo que lo rodea y responder a las preguntas formuladas en torno al ambiente. Al igual que las imágenes de satélite, mediante este sistema se generan y actualizan las cartas topográficas en diversas escalas. Estas fotografías se utilizan también para la realización de cartografía temática y estudios geográficos diversos.

El Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería, UNAM, cuenta con un mosaico fotográfico que corresponde a la carta de la ciudad de México, lo que permite visualizar el contexto real, del área de estudio, Fig. II.15.

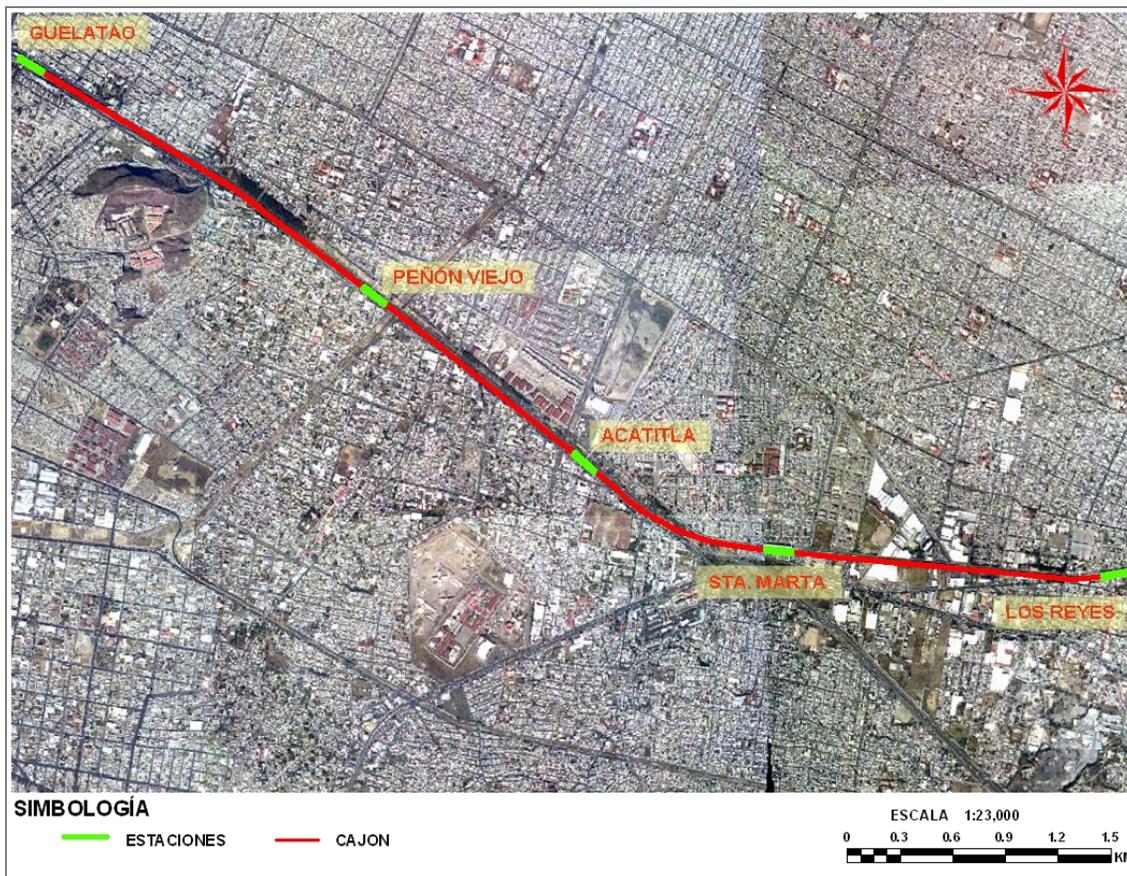


Figura II.15 Mosaico fotográfico digital de la zona en estudio (Laboratorio de Geoinformática, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2006).

II.2 Marco físico

El marco físico proporciona una visión amplia del conocimiento sobre las características y rasgos de la estructura física de la zona en estudio y su función es la de ayudar a facilitar la obtención de una mejor comprensión de la naturaleza y genética de la zona en estudio. Este ayuda a fundamentar el modelo geotécnico a través de la Geología, Geomorfología, Geofísica, e Hidrografía y que en todo momento cuenta con el apoyo de uno o más de los elementos que conforman el Marco Geográfico.

Asimismo, si se hacen interactuar los elementos de ambos marcos con el propósito de acentuar y visualizar ciertos procesos que revelen condiciones o simplemente indicar eventos ocurridos de interés geotécnico. Este análisis de la información combinada de los dos marcos ayuda a complementar las investigaciones encaminadas a describir la distribución espacial de los materiales del subsuelo como son; los rellenos, depósitos de suelo, afloramientos superficiales de roca, formaciones geológicas previamente documentadas de la corteza terrestre; y por ultimo, definir el espesor de los estratos u horizontes típicos. Estas alternativas se plasman en diferentes documentos cartográficos o láminas; de manera explícita y descriptiva para fines geotécnicos.

II.2.1 Geología

Dentro del área estudiada sobresalen diversas formaciones geológicas aisladas, es decir, formaciones volcánicas de lavas basálticas y andesíticas, aluviales y lacustres pertenecientes al periodo del cuaternario, Tabla II.3. En estas zonas se distinguen volcanes cineríticos, como el *cerro de la Estrella*, el *cerro del Marqués* con superficies de piroclastos de relieve volcánico efusivo; así como las coladas de lava de la cadena de conos volcánicos de la *sierra de Santa Catarina*, el *cerro de Chimalhuacán*, el *cerro del Pino*, en la zona suroeste y un relieve acumulativo lacustre en la mayor parte de la zona.

Tabla II.3 Formación y descripción de la unidades geológicas (Mooser, 1996).

Formación	Descripción Geológica
Qal	Depósitos aluviales del cuaternario
Qic	Cono de lavas, Vulcanitas del cuaternario inferior
Qid	Domo, Vulcanitas del cuaternario inferior
Qiv	Vulcanitas del cuaternario inferior
Qivc	Depósitos lacustres del cuaternario
Qv	Vulcanistas del cuaternario superior
Qvc	Cono, Vulcanitas del cuaternario superior
Qvd	Domo, Vulcanitas del cuaternario superior

La mayor parte de la *Línea A* se ubica en la formación de depósitos lacustres (QI); estos depósitos pertenecen al periodo del cuaternario, su configuración es resultado del característico relieve acumulativo (Mooser, 1996). Esta formación está constituida principalmente por arcillas y limos con algunas intercalaciones de gravas o arenas y con escasos horizontes de tobas. En el tramo de estudio se presenta en los cadenamientos siguientes: 15+920 a 16+760, 17+700 a 18+800, 19+800 a 21+000, Fig. II.16. En la porción noroeste, al pie de la *sierra de Santa Catarina*, aparecen acumulaciones en sentido frontal, producto de la acción de las fuertes lluvias de temporal que descienden de las partes altas. Sin embargo, en su porción occidental estos materiales han sido alterados por la urbanización y en algunas partes han quedado irreconocibles, como la parte sur del *cerro del Marqués*.

Por su morfología, composición petrológica, la *sierra de Santa Catarina* es considerada contemporánea de la *sierra Chichinautzin*. En la historia geológica de la cuenca de México, la zona estudiada representa la etapa de actividad volcánica más joven (fin del Pleistoceno y Holoceno).

La formación aluvial (Qal), pertenece al periodo del cuaternario con menor extensión que la superficie lacustre, se encuentra en las laderas de reciente formación de la *sierra de Santa Catarina*, esta formación representa un relieve acumulativo aluvial equivalente a las condiciones de un proceso fluvial, que se refiere a las formas de erosión superficial, originadas en las desembocaduras de los pequeños cauces. Estos depósitos se caracterizan en perfil, por la alternancia de capas correspondientes a fases de acumulaciones de piroclastos, residuos rocosos, material arenoso y limos en ocasiones ínterestratificados con lavas. En el tramo de estudio se presentan en los

cadenamientos siguientes: 18+900 a 19+540, 21+080 a 21+580 y 22+900 hasta la estación *La Paz*.



Figura II.16 Geología de la zona (Mooser, 1996).

La superficie que representa al grupo morfogénico de la *sierra de Santa Catarina*, (Mooser, 1996) resulta de la intensa actividad volcánica, la cual se desarrolla durante el periodo geológico del cuaternario; está formada por un conjunto de conos volcánicos del cuaternario, Yuhualixqui (2420 msnm), Tetecón (2480 msnm), Xaltepec (2500 msnm), Tecuauhtzin (2640 msnm), Guadalupe (2820 msnm) y La Caldera (2400 msnm), ocupa una superficie aproximada de 75 km², rodeada por la planicie lacustre.

La mayor parte de las laderas de la sierra está constituida por corrientes espesas de roca ígnea de composición basáltica y andesítica, así como de fragmentos de roca, tobas y brechas volcánicas (Qv) las cuales han sido expulsadas por una explosión violenta, a través de los conductos centrales de los conos cineríticos y domos (Qvc, y Qvd); los cuales representan una pequeña porción constituida por derrames basálticos.

Los aparatos monogénicos que forman a la sierra, se desarrollan a través del eje de fracturamiento en dirección suroeste-noroeste, y aun con mayor intensidad sobre la parte más elevada.

En este lugar se aprecia un conjunto de conos volcánicos sepultados por la emisión de lava del volcán Guadalupe, la cual se desarrolla en dirección suroeste, sobre la que descansa un pequeño cono aun más reciente. Algunos de los aparatos volcánicos más recientes se presentan con cráteres abiertos en forma de herradura, debido al desprendimiento de masas, generado durante el fenómeno volcánico explosivo o a la erosión. Tal es el caso del volcán Yuhualixqui, el Tetecón y del cono de ceniza del volcán Xaltepec, erosionado por el norte y cubierto por cenizas en la parte suroeste.

La *sierra de Santa Catarina* está constituida por rocas volcánicas que consisten en derrames de lava y tefra. En cuanto a sus estructuras disyuntivas, es evidente el alineamiento de los volcanes, de oeste a este con ligera desviación al norte y se aprecia una falla de orientación N75-80°E que controla la *sierra de Santa Catarina* y otra N45°E sobre la que se orienta el volcán Guadalupe, (Cserna *et al* ,1987).

De los recorridos de campo realizados en este trabajo, se logró establecer la sucesión estratigráfica del *cerro del Marqués*, la cual está constituida por rocas piroclásticas que se encuentran intercaladas con derrames basálticos. Los piroclastos encontrados son de dimensiones variadas ya que se encuentran desde bloques, aglomerados, brechas, arenas y lapillis, que en términos generales y como principal característica, presentan un bajo grado de compactación, lo cual los hace totalmente deleznable. Los basaltos son vesiculares y de tonalidades rojizas y presentan espesores muy variables, más gruesos cerca de la fuente de emisión y más delgados retirándose del cerro.

El *cerro del Marqués*, litológicamente se encuentra constituido por secuencias de flujos lávicos con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada, formada por cenizas cristalinas y vítreas, lapillis y escorias, (Vázquez y Palomera, 1989). Su formación es similar a la de los cerros: *La Estrella*, *El Pino*, *Chimalhuacán*, *Chiconautla*, y otros aislados, como los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba.

En la zona los derrames lávicos están compuestos de andesita-basáltica de olivino y andesita de anfíbol y generalmente tienen buena estructura fluidal con vesículas alineadas en la dirección de flujo y otros con lajamiento regular.

Adicionalmente, se integró una capa de fallas normales inferidas, con base en claros lineamientos de conos cineríticos monogenéticos de las formaciones cuaternarias. Los conos cineríticos alineados más evidentes son el *cerro de la Estrella*, el *cerro del Marqués* y el *cerro de Chimalhuacán*, correlacionando la geología superficial, Fig. II.17, las líneas rojas son fallas neógenas y las verdes fallas paleógenas.

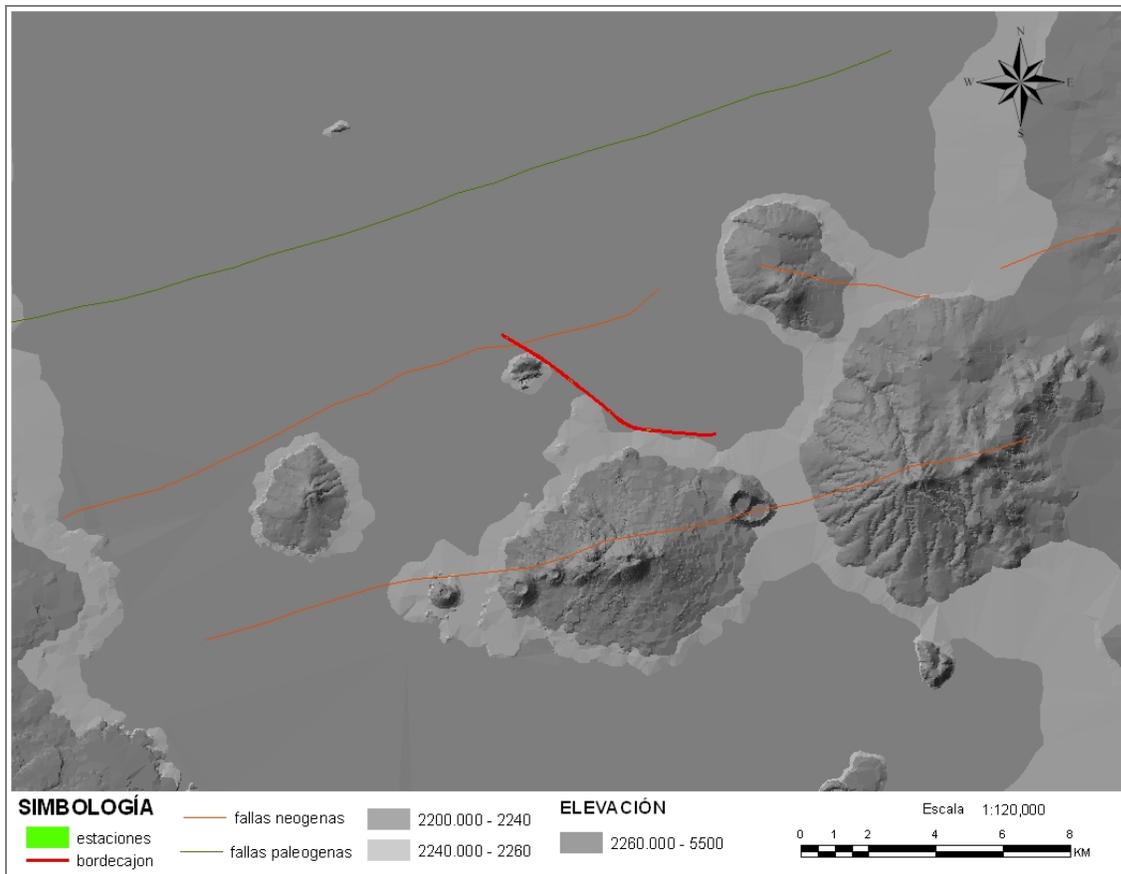


Figura II.17 Fallas geológicas en zona de estudio (Hernández – Lozano, Vázquez – Sánchez y Jaimes – Palomera, 1989).

II.2.2 Geomorfología

La geomorfología es una ciencia esencialmente genética y evolutiva, aunque también dinámica, cuyo objetivo es el de comprender cómo se han originado y cómo han evolucionado, hasta el presente, los distintos elementos y propiedades del relieve (Gutiérrez-Valdés, 1989). Los mapas geomorfológicos son documentos científicos que sirven como fuente de información cartográfica básica para los estudios de recursos naturales y ambientales, es decir, poseen una dimensión de aplicabilidad para solucionar problemas específicos. El propósito de ese tipo de representación cartográfica del terreno es realizar una síntesis de las unidades del relieve, de acuerdo con su origen, edad, evolución y sus procesos modeladores (endógenos y exógenos). La información principal de partida es tanto la geológica, como la topográfica, (Lugo-Hubp, 1991).

Desde el punto de vista geomorfológico, la zona presenta una superficie relativamente plana situada a una elevación de 2,240 msnm, interrumpida por las siguientes elevaciones volcánicas: el *cerro del Marqués* y al este, la *sierra de Santa Catarina*. El mapa Geomorfológico de la Cuenca de México, elaborado por Zamorano en 1997, se presenta en la Fig. II.18.

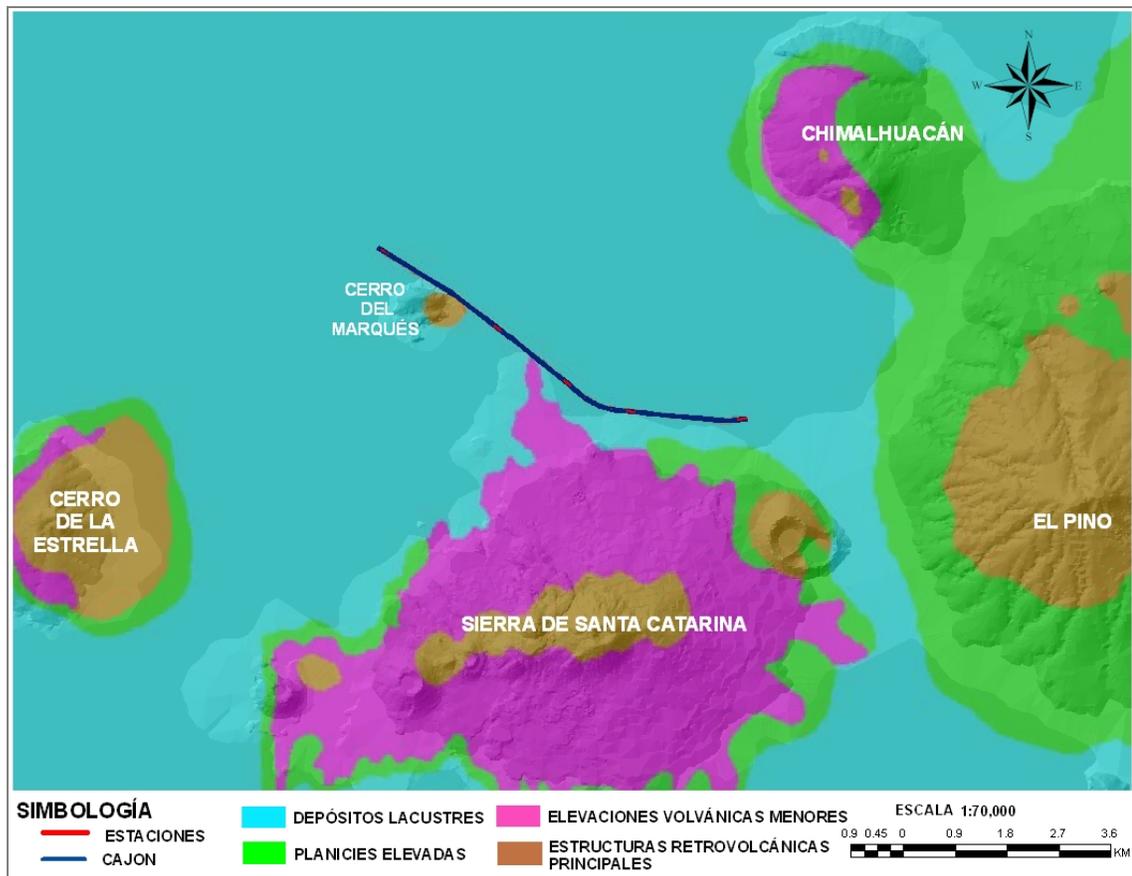


Figura II.18 Geomorfología de la zona en estudio (Zamorano, 1997).

Adicionalmente, y con la finalidad de establecer de forma más puntual las características geomorfológicas presentes en la zona de estudio y de sus inmediaciones, se elaboró el plano altimétrico de la Fig. II.19.

El plano altimétrico muestra las formas del relieve correspondientes en su mayoría a superficies planas situadas a una elevación de 2,240 msnm, interrumpidas por la alineación de las elevaciones volcánicas del *cerro del Marqués*, el *cerro de La Estrella* y el *cerro de Chimalhuacán*, así como las alineaciones de los conos cineríticos de la *sierra de Santa Catarina*.

El *cerro del Marqués* es un volcán cinerítico situado en la parte norte de la delegación de Iztapalapa, tiene una elevación máxima de 2,370 msnm, su cima tiene 132 m sobre el nivel de la planicie, de las observaciones de campo realizadas, se apreció que litológicamente está constituido por lavas y piroclastos ambos de composición básica, los piroclastos se observan afectados por numerosas grietas originadas por la combinación de movimientos tectónicos y explotación del agua subterránea. Su topografía es típica de un cono cinerítico de laderas cortas muy inclinadas y no presenta modelado fluvial, se encuentra incluida en la unidad de laderas de lava de volcanes menores.

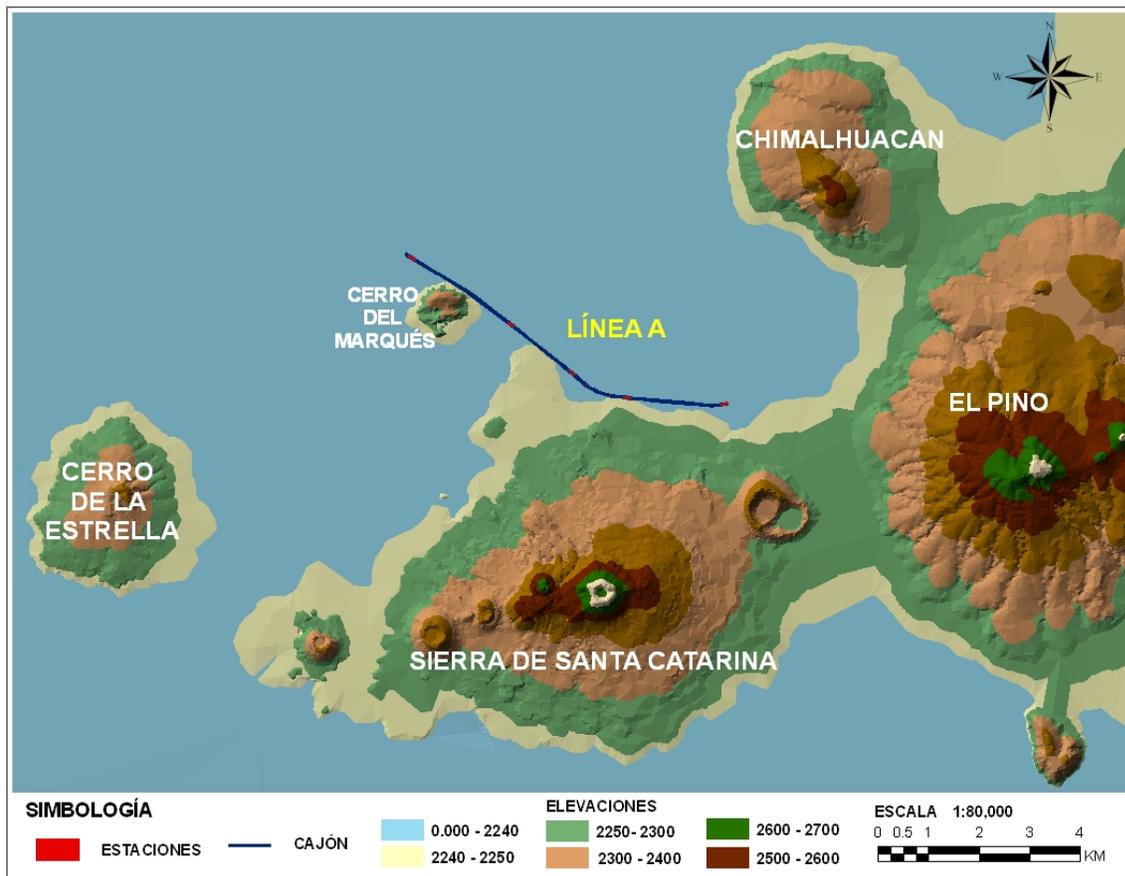


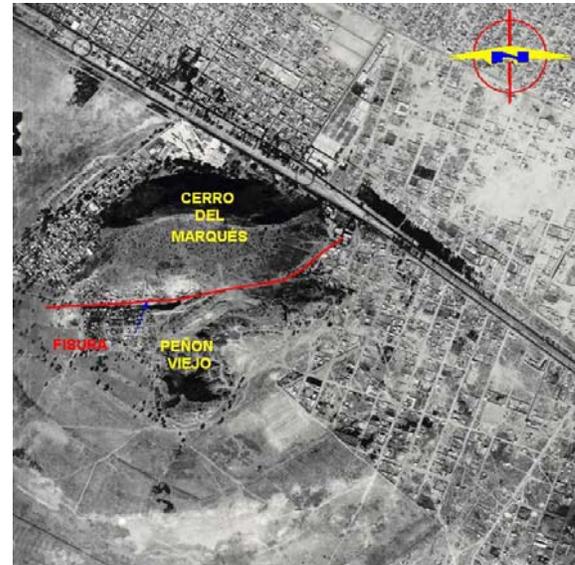
Figura II.19 Plano altimétrico de la zona de estudio y sus alrededores.

Los procesos geomórficos preponderantes en el *cerro del Marqués*, son los endógenos y en menor cantidad los exógenos, ya que los primeros fueron los responsables de su edificación como una estructura volcánica. Los rasgos del relieve corresponden a aquellas formas consideradas como constructivas, originadas básicamente por procesos endógenos. Este tipo de relieves incluye montañas dómicas, planicies y mesetas, montañas en bloque, plegadas y complejas, así como todas las formas de origen volcánico. Los agentes de intemperismo predominantes en la zona del *cerro del Marqués*, son los de tipo físico y los causados por el hombre.

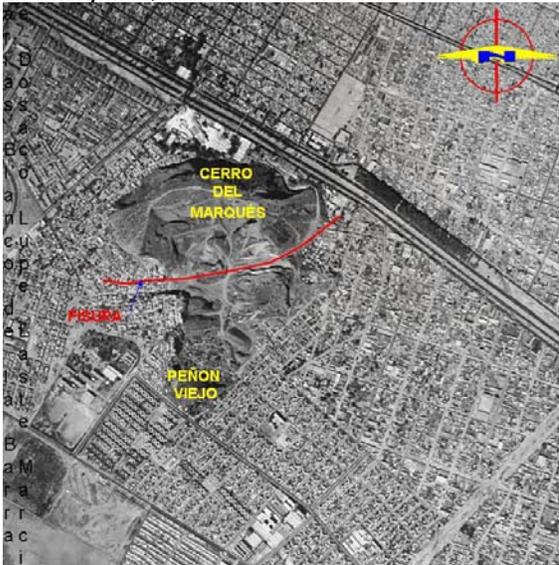
Históricamente la estructura del *cerro del Marqués* ha sufrido severos cambios en su relieve y forma original en un 70% hasta su conformación actual, ya que a partir de 1950 se inició su explotación y aprovechamiento como banco de material, de donde extrajeron una gran cantidad de gravas, arenas y tezontle, materiales que fueron utilizados para la construcción de las edificaciones de sus inmediaciones, incluso fueron construidas sobre esta misma estructura volcánica conforme la fueron degradando. Su degradación quedó plasmada en las fotografías aéreas que fueron tomadas en los años 1963, 1970, 1987 y 2002, las cuales se muestran en la Fig. II.20.



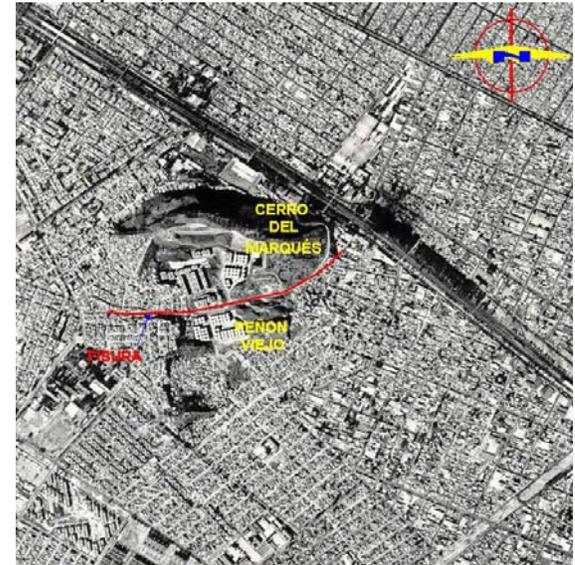
a) Fotografía aérea del *cerro del Marqués*, tomada en el año de 1963.



b) Fotografía aérea del *cerro del Marqués*, tomada en el año de 1970.



c) Fotografía aérea del *cerro del Marqués*, tomada en el año de 1987.



d) Fotografía aérea del *cerro del Marqués*, tomada en el año 2002.

Figura II.20 Evolución morfológica del *cerro del Marqués*.

La Fig. II.20a representa la expresión morfológica más completa que se conoce del *cerro del Marqués*, la cual corresponde a una fotografía aérea tomada en el año de 1963, su estructura volcánica es de carácter "fisural", caracterizada por presentar una alineación en la porción central que divide los flancos norte y sur (*cerro del Marqués* y el *Peñón Viejo* respectivamente), y por donde se infiere que fue emitido el material volcánico que lo edificó.

En cuanto al relieve de sus flancos, el lado norte se encuentra totalmente intacto, mientras que el sur presenta una degradación del 40% de su aspecto original. La urbanización en la zona es incipiente, ya que se observan únicamente asentamientos irregulares en su flanco norte; en la actualidad se conoce esta zona como la colonia el *Paraíso*. Adicionalmente, el área denominada en la actualidad como el “*Hoyo*”, flanco sur, correspondía a una pequeña elevación topográfica (*Peñón Viejo*). Cabe recalcar que las colonias *Paraíso sur*, *Obregón*, *Morelos*, *Santa Martha Acatitla Sur* y *U. H. Ejército Oriente (zona peñón)* no existían. En la Fig. II.20b, se aprecia con más claridad la estructura “*fisura*” descrita anteriormente, así como los elementos que la constituyen.

En lo concerniente a la expresión morfológica del relieve que presentaba durante los años 70’s, Fig. II.20b, se observa en su flanco norte, ligeros desgajamientos de laderas, mientras que el sur continuaba su degradación, por la explotación de sus materiales, mientras que en la zona denominada en la actualidad como *el Hoyo*, se aprecia una degradación del 50% de su aspecto original. En cuanto a la urbanización en la zona, la colonia el *Paraíso* se extendía hacia el sur, *Santa Marta Acatitla* lado Sur al oriente y la colonia *Morelos* no existía hasta ese tiempo.

De acuerdo a la imagen de la Fig. II.20c, que corresponde a la expresión morfológica del *cerro del Marqués* a finales de los años 80’s, se aprecia la mayor explotación de los materiales registrada; el flanco sur (*Peñón Viejo*) fue casi degradado totalmente, mientras que el lado norte (*cerro del Marqués*) presenta una intensa explotación, principalmente en la zona fisural hacia la porción más elevada, lo que ocasionó que quedaran al descubierto los piroclastos y derrames lávicos que lo constituían.

En cuanto a la morfología del “*Hoyo*”, ya estaba configurada como tal, sin embargo, se aprecian algunos vestigios de piroclastos hacia su porción central. La urbanización de la zona continuó en ascenso hacia ambos lados de la estructura, ya que continuaban creciendo las colonias *el Paraíso*, *Morelos* y *Santa Marta Acatitla Sur*.

Finalmente, en la Fig. II.20d se aprecia la expresión morfológica más reciente que presenta el *cerro del Marqués* (2002). En ella se observan algunos vestigios de lo que fue su flanco sur, mientras que el norte presenta degradación de más del 50% y sobre la cual se edificaron tres unidades habitacionales de tres y cuatro niveles; esta zona es considerada como de alto riesgo, debido a la inestabilidad que presentan las laderas, al quedar descubiertas. La urbanización se intensificó hasta extenderse en las partes altas del promontorio volcánico y gran parte de la zona minada.

La *sierra de Santa Catarina* está localizada en la parte sur de la cuenca de México, de Oeste-Este, entre las coordenadas 99°04’00” y 98°57’30” de longitud Oeste y 19°21’00” a 19°17’00” de latitud Norte, y comprende una superficie de 77 km². Es un complejo volcánico que representa un periodo de vulcanismo de tipo monogenético que tuvo como consecuencia dar origen a pequeños volcanes, durante el Pleistoceno Tardío. La *sierra de Santa Catarina* incluye vulcanismo de tipo efusivo y explosivo que se caracterizó principalmente por la construcción de algunos domos y conos de escoria acompañados de flujos de lavas, y cenizas. Las lavas que constituyen la *sierra de Santa Catarina*, son de composición andesítica y andesítico-basáltico con variaciones en el contenido de sílice y minerales hidratados como hornblenda y biotita.

La alineación de los volcanes define una falla con dirección preferencial EW, a través de la cual ocurre el ascenso del magma. Tiene una longitud de 12km y una anchura de 6km, Fig. II.21. La sierra define el parte aguas que divide a los lagos de *Chalco-Xochimilco* al sur y el lago de *Texcoco* al norte. Los volcanes están conformados por derrames de lava y depósitos piroclásticos.

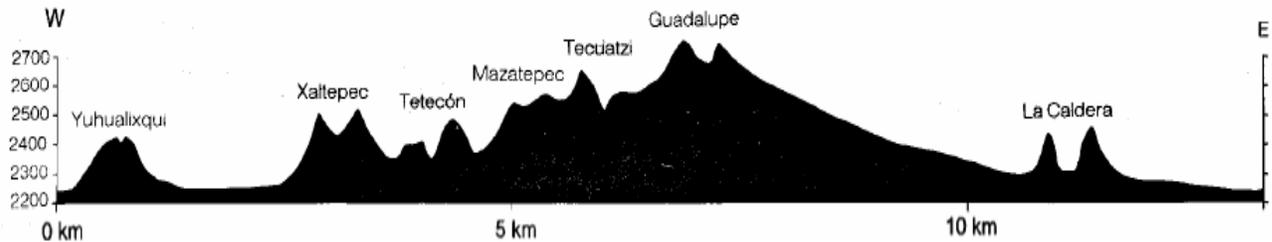


Figura II.21 Perfil longitudinal de la *sierra de Santa Catarina* (Lugo-Hubp *et al.*, 1994).

El volcán *Yuhualixqui* está constituido por escoria, ceniza, flujos piroclásticos y depósitos de caída que fueron emitidos hacia el noroeste; tiene un diámetro mayor de 1440m y un diámetro menor de 1158m con un valor de elipsoidad de 0.90 por lo que el volcán tiene una forma casi circular, con un cráter de 290m de diámetro, la pendiente varía de 0° a 30° , la altitud media es de 2420m, tiene una altura relativa de 160m. El cono tiene una dirección de $N29^{\circ}E$. El drenaje es radial e intermitente. La extracción de material para la construcción ha modificado casi en su totalidad la morfología original del volcán.

El volcán *Xaltepec* es un cono de escoria, conformado por derrames de lava, ceniza y de material piroclástico, los cuales se extienden hacia el noroeste y suroeste. Se encuentran sobreyaciendo a los depósitos del volcán *Yuhualixqui*. La diferencia entre el diámetro mayor 1450m y el diámetro menor de 1200m es de 0.827 de elipsoidad, tiene una altura relativa de 230m y pendientes que oscilan entre los 4° y 33° , presenta un colapso con dirección $S82^{\circ}W$. El drenaje es de primer orden, de poca longitud y profundidad. En la parte oriental de este cono existe una estructura de forma cóncava con crestas redondeadas que representa un fenómeno natural de deslizamiento de detritos, la pendiente de este depósito es de 32° a 35° .

El volcán *Tetecón* está constituido por escoria, ceniza, flujos, piroclásticos y derrames de lava, los cuales se extienden hacia el norte y el sur. Tiene una forma semicircular donde el eje de su diámetro mayor tiene una orientación casi norte-sur, en su parte accidental tiene un domo adventicio, tiene una altura relativa de 200m y su pendiente varía de 6° a 31° , el diámetro del cráter es de 300m, en el cual hay colapso por una dirección de $N63^{\circ}W$, el drenaje es radial, intermitente y poco integrado.

El volcán *Mazatepec* es una estructura con valor de elipsoidad de 0.47 tiene dos cráteres; uno de ellos es cerrado y el otro presenta un colapso con orientación $N42^{\circ}E$, su altura es de 170m, la pendiente varía de 30° a 35° . Está constituido por escoria, ceniza, flujos piroclásticos y derrames de lava, que rodean el cono hacia el norte y sur. La parte noroccidental de este volcán se encuentra parcialmente destruida debido a la actividad antrópica.

El volcán *Tecuautzi* tiene una estructura ligeramente elíptica, por su eje mayor orientado N20°E. Está constituido por una alternancia de depósitos piroclásticos intercalados por derrames de lava. Se distinguen dos diferentes derrames de lava de poca extensión, los cuales fueron emitidos hacia el NW y NE. Ambos derrames se encuentran obstruidos por un domo situado al norte de la *sierra de Santa Catarina* y cubre una pequeña porción de los derrames del *Mazatepec*. Tiene una pendiente que llega a los 38° y una altura relativa de 210m. Al sur de *Tecuautzi* se encuentra un domo que emitió derrames de lava en dirección suroeste.

El volcán *Guadalupe* es la estructura volcánica semicircular de mayor dimensión de la *sierra de Santa Catarina*, tiene una altura de 290m y una pendiente que varía de los 19° a 32°. Presenta un cráter principal que está colapsado en dirección S73°W. Los derrames de lava y escoria emitidos por el volcán *Guadalupe* muestran una distribución hacia el norte, oriente y sur, llegando a cubrir los depósitos de los volcanes *Tecuautzi* y la *Caldera*. En la ladera oriental del volcán *Guadalupe* se ubica un cono advertido, del cual emanaron lavas hacia el oriente. El drenaje es de forma radial de primer orden, poco profundo. La parte oriental del volcán presenta un deslizamiento de detritos constituidos principalmente por escoria que intemperiza a color rojo.

El volcán la *Caldera* es una estructura de pequeñas dimensiones, su altura relativa es de aproximadamente 150m; tiene dos cráteres los cuales son independientes y se encuentran cerrados, su eje mayor tiene una orientación de N68°W. El drenaje es abundante y de primer orden, se presenta en forma radial, de corta longitud y profundidad. Los flujos piroclásticos de la *Caldera* son cubiertos por escoria y derrames de lava emitidos por el volcán *Guadalupe*.

Los conos cineríticos en general se encuentran poco disectados por la red fluvial, caracterizada por un desarrollo incipiente; predominan las corrientes de orden bajo, de tipo paralelo y radial, de poca longitud y profundidad debido a la permeabilidad del material volcánico. En las zonas donde afloran lavas y domos hay escurrimientos que aprovechan la presencia de fracturas. La morfología de la sierra no presenta relieves modelados por los procesos exógenos, la estructura original de los volcanes ha sido modificada en mayor parte por factores antrópicos. La actividad de numerosas minas a cielo abierto, caminos y veredas para transportar el material, ha modificado el aspecto original de la sierra, produciendo una fuerte dinámica gravitacional y fluvial. La principal alteración del relieve en la zona es producida por la extracción de material de los conos volcánicos.

La *sierra de Santa Catarina* en los últimos años ha presentado un crecimiento urbano desmedido debido a la mala o inexistente planeación, sin considerar las condiciones naturales del terreno. Como consecuencia de este crecimiento, la mancha urbana ocupa zonas de barrancas, áreas de pendiente abrupta, zonas vulnerables a hundimientos de terreno, deslizamientos y desprendimientos de tierra y/o roca.

II.2.3 Hidrografía

En la formación del suelo, la hidrografía juega un papel importante debido a que generan abanicos aluviales en la desembocadura de una corriente montañosa, en una superficie plana o con pendiente moderada. El relieve que rodea la planicie de la cuenca de México, impide que los escurrimientos superficiales que descienden de parte altas fluyan fuera de la cuenca originando así una cuenca endorreica (cerrada), lo que determinó la existencia de lagos como Texcoco, el de Tenochtitlan, el lago de Santa Marta, que en tiempos históricos, Fig. II.5, temporalmente estuvieron fusionados en uno sólo. El primero contenía agua salobre mientras que el segundo era de agua dulce, la mayor parte del área de Iztapalapa formo parte del Lago de Texcoco y una mínima parte era inundada con agua dulce. Para evitar que se mezclaran estos dos tipos de agua y para evitar inundaciones, los aztecas separaron ambos lagos mediante el Albarradón de Nezahualcoyotl. Estas condiciones hídricas prevalecieron desde su origen hasta fines del siglo XVIII, época en que los lagos de Tenochtitlan y de Texcoco fueron prácticamente drenados de manera artificial, y así se inició el desecado de esos lagos, presentándose cambios en el sistema hidrográfico.

Dentro de los principales drenes artificiales destacan los siguientes canales: Chalco, Nacional y el de Río Churubusco; el primero, es un canal a cielo abierto que forma el límite natural entre las delegaciones Iztapalapa y Xochimilco, se inicia en la delegación Tlahuac y desemboca en el Canal Nacional, recibe parte del agua residual y pluvial de Tlahuac y Xochimilco, así como de las colonias que forman la porción sur de Iztapalapa. El canal Nacional también es un tajo a cielo abierto que fluye por el poniente de la Delegación Iztapalapa; dentro de esta área tiene un recorrido de unos 4km y desemboca al Río Churubusco que a diferencia de los dos anteriores, fue entubado aprovechando el antiguo cauce del mismo nombre, que confluye con el Río de los Remedios. Este canal es de suma importancia no sólo para Iztapalapa sino para las delegaciones Tlalplan, Ixtacalco, Benito Juárez y Coyoacan, pues es el conducto por el cual desalojan el agua residual y pluvial que se genera en dichas zonas.

Los escurrimientos naturales que descienden en el área son de régimen torrencial con avenidas de poca duración, no tienen aprovechamiento alguno y al llegar a la parte baja son canalizados a través de canales entubados. La densidad del avenamiento natural que desciende de las elevaciones es baja, pues los materiales tienen una permeabilidad elevada que permite una importante infiltración de la precipitación; este fenómeno controla la generación de flujo superficial sobre todo en la *sierra de Santa Catarina*, Fig. II.22.

Cuando el agua de los escurrimientos superficiales no puede infiltrarse satisfactoriamente en el suelo, se desplaza sobre la superficie, generando un proceso de transportación de materiales granulares y finos, ocasionando problemas de inundaciones y acumulación de sedimentos por azolve que posteriormente obstruye el drenaje. Los cauces naturales que descienden de los cerros *del Pino* y *Chimalhuacán* se infiltran al llegar en la planicie; actualmente se conducen hacia el canal de la Compañía por ser el drenaje más cercano.

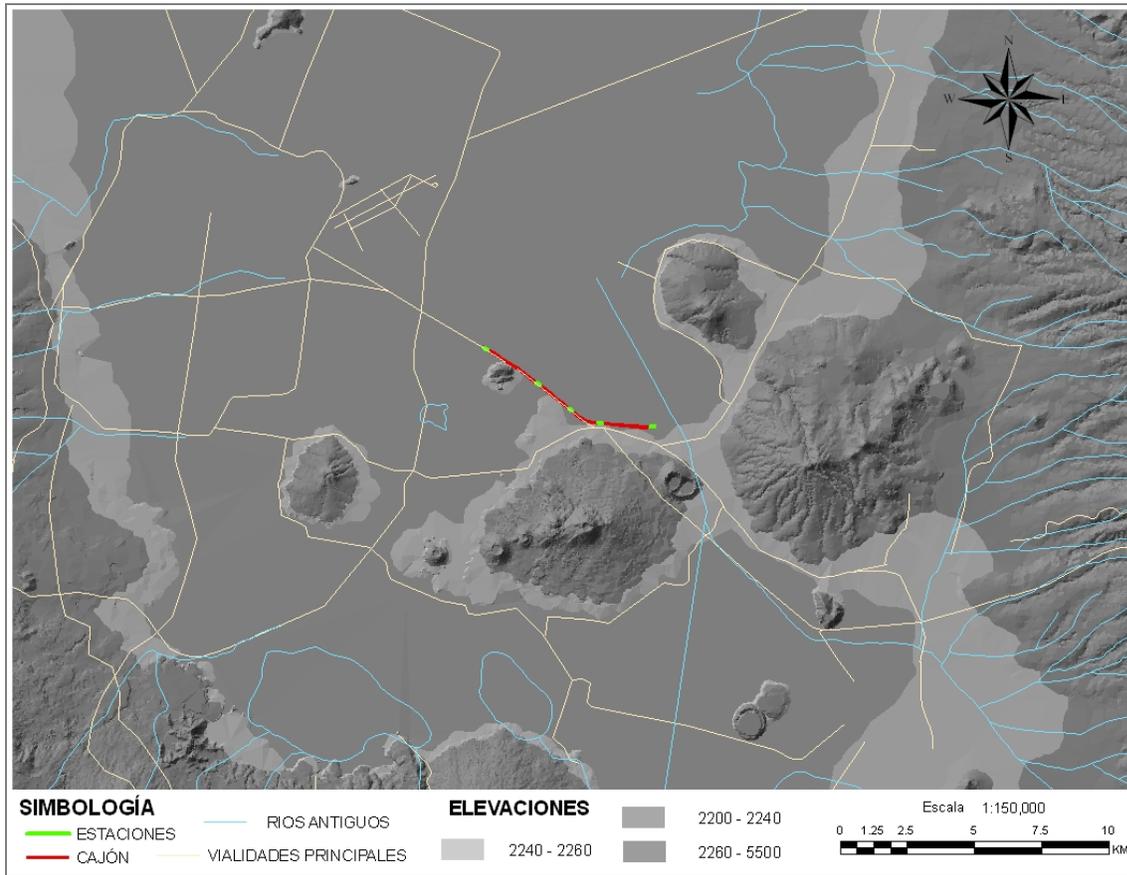


Figura II.22 Hidrografía de la zona en estudio (INEGI, 2003).

Con el conocimiento de estas condiciones que se presentan en el suelo, como son el tipo de terreno por el que se desplazan los acarrees y los sitios de depositación, se obtiene un concepto adecuado acerca de la forma, distribución, textura y composición de los estratos, los cuales determinan el comportamiento del subsuelo sobre el que se desplanta el tramo de la *Línea A* y se representa en el modelo estratigráfico, (*Capítulo III*).

II.2.4 Geotecnia

II.2.4.1 Zonificación geotécnica

El área de estudio se caracterizó por la intensa actividad volcánica debido a la presencia de múltiples volcanes apagados. Los estudios que se han efectuado hasta ahora sobre el subsuelo del valle de México (Marsal, 1952; Marsal y Mazari, 1959) han permitido afinar la zonificación la ciudad de México en tres zonas considerando la estratigrafía y las propiedades del subsuelo. Desde esa época se le asignaron a tres zonas: *Lomas*, *Transición* y *Lago*, actualmente estos términos se cambiaron por los de zonas I, II y III en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. El mapa de zonificación geotécnica sirve de ayuda a las normas sobre seguridad estructural de las edificaciones. A continuación se explica en forma breve la zonificación geotécnica de acuerdo con el mapa publicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones en el Distrito Federal vigentes (GDF, 2004).

ZONA I, Lomas; Formada 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, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados. La zona de Lomas incluye las faldas de la *sierra de Santa Catarina* las partes altas del *cerro del Marqués*, el *cerro de la Estrella*, el *cerro Chimalhuacán*, la *sierra de Guadalupe* y la *sierra de las Cruces*, conformados por suelos areno-limosos (tobas) compactos, de alta capacidad de carga, baja deformabilidad, y algunas zonas incluyen los derrames de basalto como el pedregal.

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 limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros. En esta zona es donde ocurren los cambios más notables en la estratigrafía.

ZONA III, Lago; Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, 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, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50m.

El tramo en estudio se encuentra alternando en las dos zonas, Fig. II.23, en la zona III Lacustre; en los cadenamientos 15+940 a 16+910 y 17+050 a 20+840; en la zona II de transición; en los cadenamientos 16+910 a 17+050 y 20+840 a 23+160, referidos a su trazo geométrico.

Cabe recomendar que para una próxima actualización de la zonificación geotécnica se consideren los sondeos utilizados en el presente trabajo, pues ayudarán a afinar las fronteras en las tres zonas, a partir de la estratigrafía y las propiedades del subsuelo del modelo geotécnico.

II.2.4.2 Zonificación sísmica

De acuerdo con el mapa de zonificación sísmica publicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004), el Distrito Federal se divide en tres zonas: zonas I, II y III. Adicionalmente, la zona III se divide en cuatro subzonas (III_a, III_b, III_c y III_d). El coeficiente sísmico para las edificaciones clasificadas de grupo B es de 0.16 en la zona I, 0.32 en la zona II, 0.40 en las zonas III_a y III_c, 0.45 en la III_b y 0.30 en la zona III_d. En estructuras del grupo A se incrementa en un 50 por ciento.

El tramo de la *Línea A*, que se estudia en este trabajo, se ubica en las subzonas; III_a del 15+940 a 16+910 y 17+050 a 17+520; en III_b de 17+520 a 18+590; en III_c de 18+950 a 20+070; en III_d de 20+070 a 20+840, y en la zona II de 16+910 a 17+050 y 20+840 a 23+160, Fig. II.24.

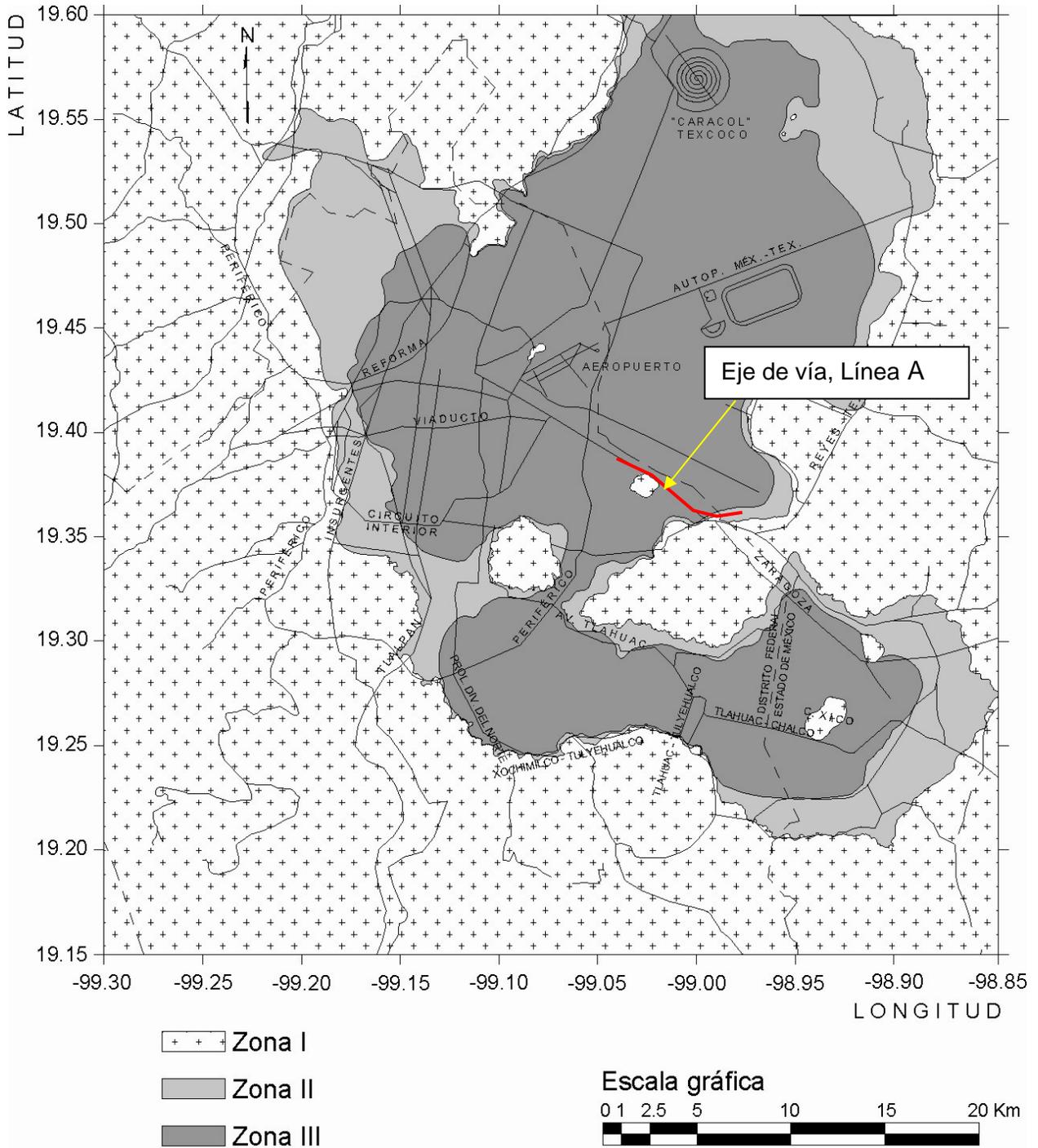


Figura II.23 Zonificación geotécnica del Distrito Federal (GDF, 2004).

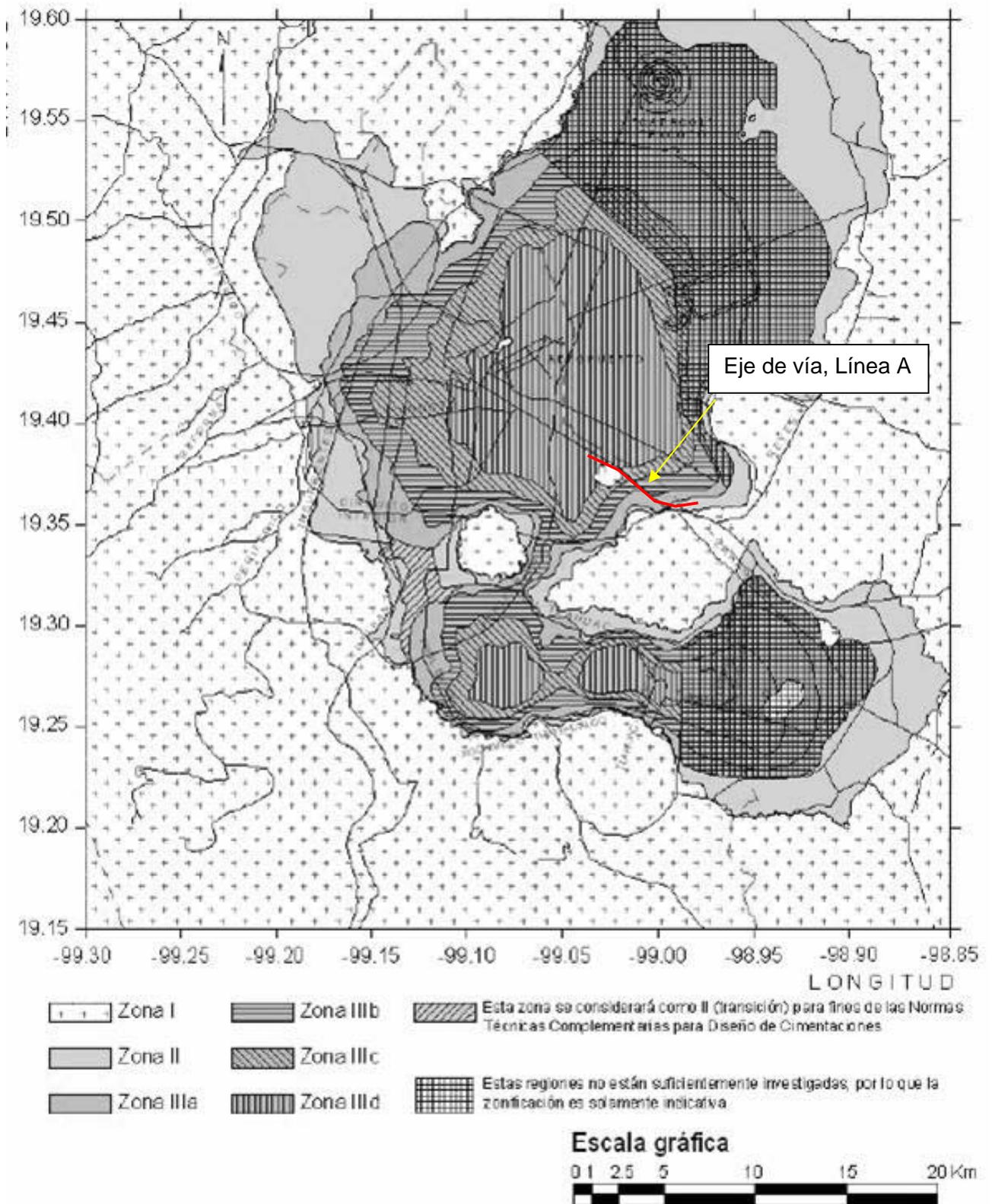


Figura II.24 Zonificación sísmica del Distrito Federal (GDF, 2004).

II.2.4.3 Sondeos geotécnicos

Para definir la estratigrafía del subsuelo a lo largo de la *Línea A* del metro férreo, en el tramo *Guelatao-Los Reyes*, fue necesario incorporar la información geotécnica, proveniente del proyecto original de 1987, de estudios previos realizados por las compañías; Integración de Procesos de Ingeniería, S.A de C.V. (IPISA, 2002) y LAC Mecánica de Suelos y Cimentaciones S.A. de C.V. (LAC, 2005), así como, de los sondeos contenidos en la base de datos del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG (Laboratorio de Geoinformática, Instituto de Ingeniería, UNAM).

En la Fig. II.25 se presenta la ubicación y distribución en planta de los sondeos geotécnicos incorporados en el Sistema de Información Geográfica de la zona, el sistema cuenta con 197 sondeos de tipo cono eléctrico (CPT), penetración estándar (SPT) y mixto.

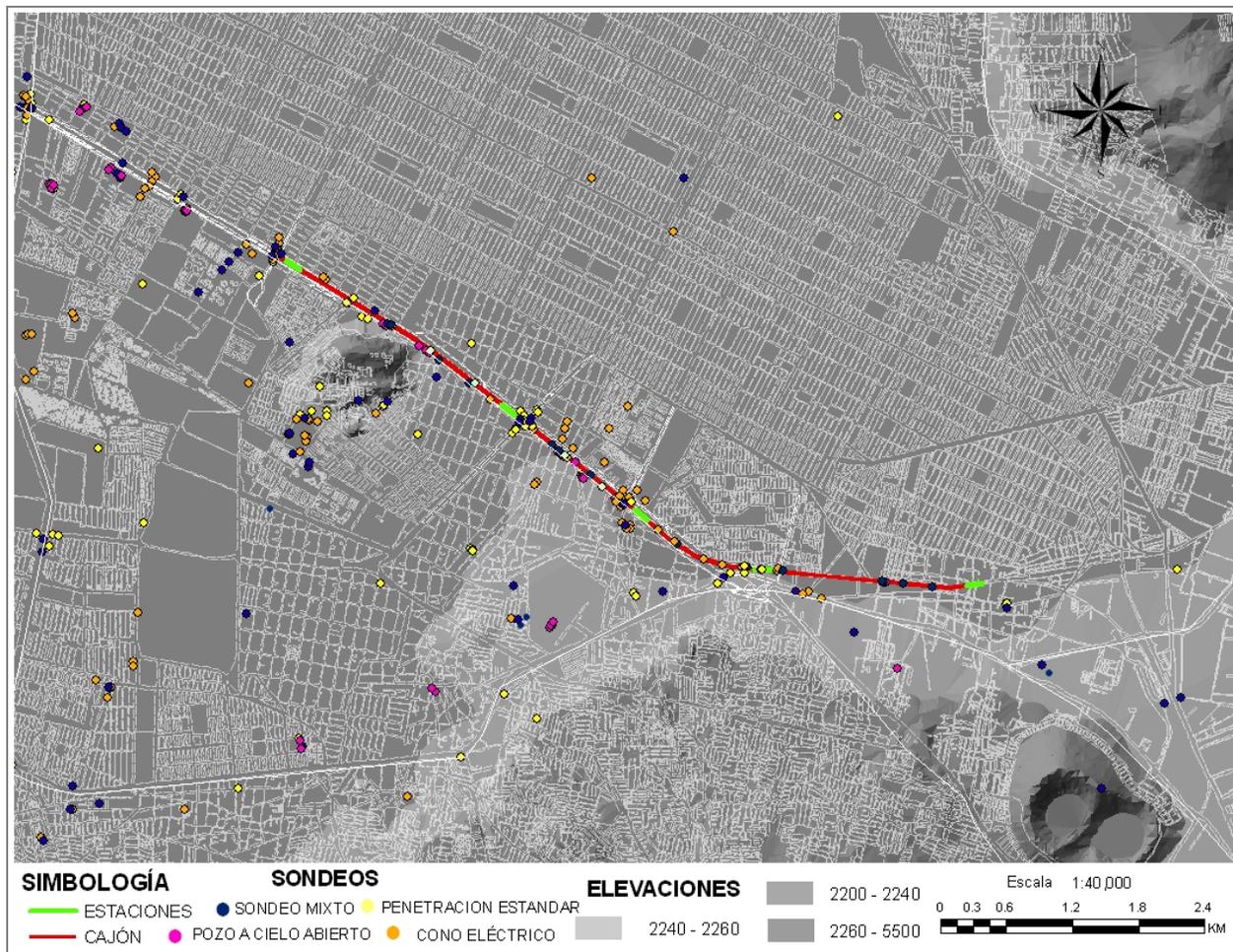


Figura II.25 Distribución espacial de sondeos geotécnicos en la zona.

II.2.4.4 Hundimiento regional

El hundimiento regional de la cuenca de México fue estudiado a fines del siglo pasado por Téllez Pizarro en 1899. Roberto Gayol en 1925, informa a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos de México que la ciudad de México se está hundiendo y que la causa probable es la perturbación "que en el fondo de la cuenca de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo". Fundamenta su afirmación con nivelaciones realizadas en la zona céntrica de la ciudad y el lago de Texcoco. En esa época se debatía que la diferencia de niveles entre la ciudad y el lago se debía al azolvamiento de este último.

José A. Cuevas entre los años 1920 y 1930 (citado por Zeevaert, 1973), fue el continuador de las ideas de R. Gayol y propone a Nabor Carrillo estudiar la influencia de la explotación de pozos para agua sobre el hundimiento.

Fue hasta 1947, cuando el Dr. Nabor Carrillo, estableció la relación teórica entre el hundimiento y la consolidación de las arcillas inducida por la extracción de agua empleando técnicas de la naciente mecánica de suelos y señaló como su causa la consolidación de las arcillas debido al incremento de esfuerzos efectivos provocado por la disminución de la presión del agua intersticial del subsuelo.

Sus investigaciones estimularon a Raúl Sandoval, Fernando Hiriart, Raúl J. Marsal, y Marcos Mazari a realizar un estudio sistemático del subsuelo, mediante la correlación de bancos y las primeras mediciones piezométricas entre 1947 y 1952 permitiendo así, aclarar experimentalmente el fenómeno del hundimiento y su repercusión en el comportamiento de las cimentaciones. A esta información se agregan las investigaciones de Leonardo Zeevaert y la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (CHCVM, SRH), que de 1953 a 1987 realizó nivelaciones y mediciones piezométricas periódicas.

El fenómeno del hundimiento regional se explica de la siguiente manera (Santoyo E. y Ovando E., 2000); el bombeo produce una disminución de la presión de agua dentro del acuífero, el cual generalmente tiene dos grandes características: 1) está constituido por materiales muy permeables como arenas, limos arenosos o gravas, y 2) está confinado por arcillas de baja permeabilidad. Al disminuir la presión del agua en el acuífero, también ocurre una disminución gradual de la presión del agua que se encuentra en los poros o intersticios estructurales de los materiales arcillosos. Dependiendo del espesor y de la permeabilidad de la arcilla, un cambio súbito en la presión del agua en el acuífero produce cambios diferidos en la presión del agua de los poros de los materiales poco permeables que pueden tardar incluso décadas en alcanzar un nuevo estado de equilibrio. Junto con esta alteración, se establece un flujo descendente de agua, desde la arcilla hasta el acuífero. Cuando las arcillas están saturadas, como ocurre con buena aproximación para el caso de la ciudad de México, el volumen de agua que expulsan es proporcional al hundimiento que se observa en la superficie. Los cambios de presión que experimenta el agua de los poros de la arcilla incrementan los esfuerzos que actúan efectivamente sobre la fase sólida del suelo. De ahí que ocurra la compresión de éste y por ello el proceso de bombeo equivale a sobrecargar efectivamente al suelo, como respuesta a la disminución de las presiones de poro.

El fenómeno de deformación vertical tiene dos componentes que se desarrollan simultáneamente: a) la consolidación primaria o salida del agua intersticial, la cual predomina y es muy activa por unos años, y b) la deformación secundaria, que actúa durante muchas décadas.

Actualmente al no existir el equilibrio entre la extracción y recarga de los manto acuíferos, todas las acciones realizadas en torno al hundimiento regional de la ciudad de México son meros paliativos. Por el momento no se ve clara la situación o las posibles soluciones, ya que no se puede dejar de usar el agua de los pozos, pero por otra parte, si se sigue extrayendo el líquido seguirá el hundimiento de la ciudad.

El problema de hundimientos en la ciudad de México es diferenciado. En algunos lugares de la cuenca lacustre como Xochimilco, Chalco y la zona norte del aeropuerto de la ciudad de México, el hundimiento es rápido a razón de 30 a 40 cm/año, mientras que hay sitios como el Centro Histórico donde la velocidad varía entre 7 y 12 cm/año. Lo anterior provoca daños evidentes en la infraestructura urbana, lo que afecta el patrimonio cultural y arquitectónico de la ciudad.

En el caso particular de Iztapalapa, la consecuencia de la extracción de agua es principalmente el agrietamiento en la periferia (aproximadamente 50km de transición abrupta). Para este fenómeno no se puede realizar mucho, una de las alternativas inmediatas es el relleno de estas grietas ya que no se puede prescindir del vital líquido acumulándose deformaciones, aunque la otra alternativa es tratar de generar acciones para redistribuir las fuerzas internas de la masa arcillosa con el fin de evitar la aparición de agrietamientos.

Por ello, si bien el hundimiento regional es un fenómeno antiguo, su estudio y análisis siguen siendo temas de actualidad, pues a pesar de los grandes esfuerzos realizados no ha sido posible controlarlo, obligando a implementar soluciones urgentes para preservar estructuras dañadas, replantear estrategias para frenarlo o mitigar sus efectos futuros.

a) Bancos de nivel

Con el apoyo de diferentes instituciones entre las que destaca el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), se reconstruyó la historia de los hundimientos más recientes en la zona, (1998-2005). En Fig. II.26, muestra la distribución espacial de los 127 bancos de nivel donde se tiene cotas o mediciones puntuales, y en la Tabla II.4 su ubicación en coordenadas UTM y la velocidad de hundimiento para cada sitio. La configuración de la zona central de los antiguos lagos de la zona en estudio (Santa Marta y un área pequeña del sur de Texcoco), sintetiza las manifestaciones del fenómeno de hundimiento regional a través del tiempo como es la emersión de estructuras volcánicas como; el *cerro del Marqués* y la *sierra de Santa Catarina* así como las curvas verticales a lo largo de algunas vialidades principales, (*calzada I. Zaragoza*). El cambio gradual de suelo blando a suelo duro hacia los cerros, identifica las áreas de mayor hundimiento.

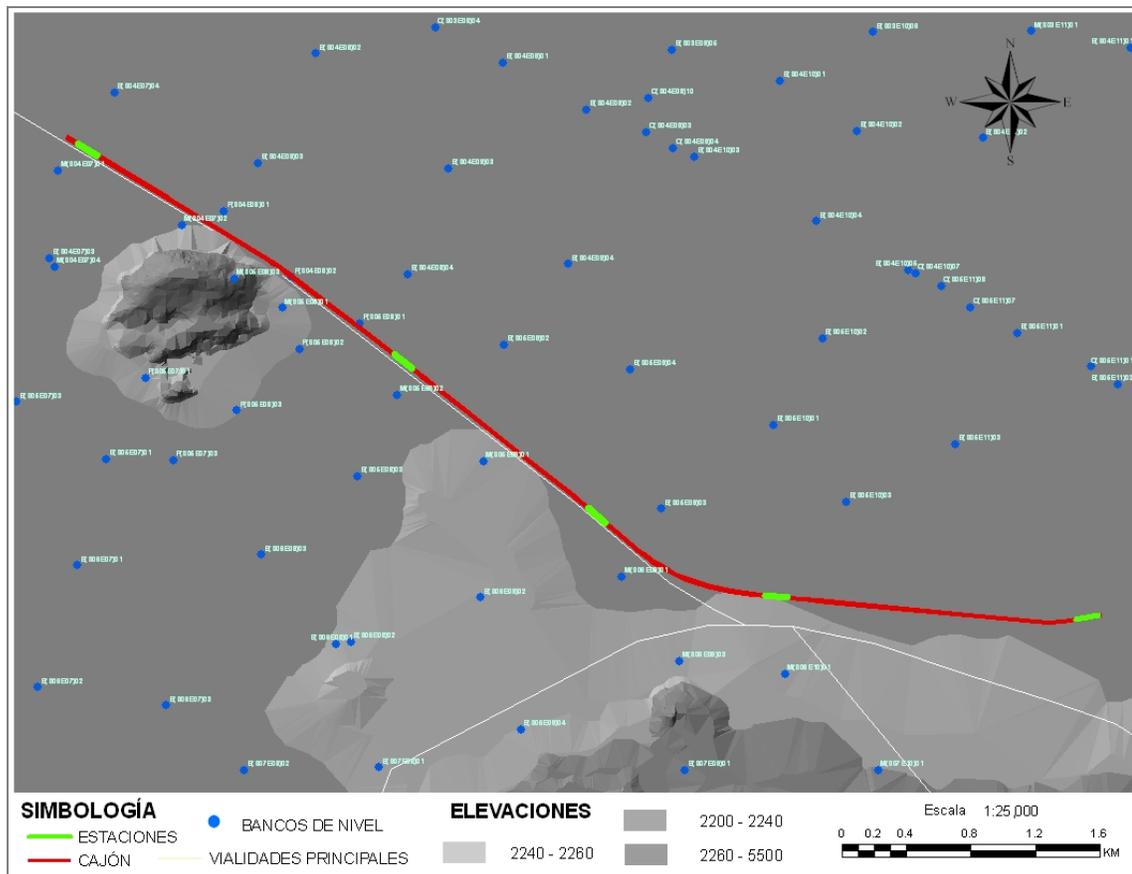


Figura II.26 Ubicación y distribución espacial de bancos de nivel (SACM, 2005).

Tabla II.4 Coordenadas de los bancos de nivel en la zona de estudio.

NÚMERO CONSECUTIVO	NOMBRE DEL BANCO	UTM (X) m	UTM (Y) m	Hundimiento	Velocidad
				t1=2002 t2=2005 m	t1=2002 t2=2005 cm/año
1	B(S02E06)03	494759.78	2145993.75	2.07	29.537
2	B(S02E07)03	495526.54	2146243.69	2.21	31.630
3	B(S02E07)04	496433.34	2145791.25	2.34	33.414
4	B(S02E07)05	495465.19	2145658.75	2.32	33.126
5	B(S02E08)02	497132.26	2146277.94	2.28	32.609
6	B(S02E08)03	497940.85	2145843.72	2.35	33.501
7	B(S02E09)02	498619.51	2146252.88	2.14	30.503
8	B(S02E09)03	499942.71	2146152.73	1.81	25.816
9	B(S02E09)04	499201.82	2145954.76	2.05	29.341
10	B(S02E09)05	499553.06	2145529.62	2.08	29.684
11	B(S02E10)04	500792.81	2145706.08	1.21	17.264
12	B(S03E06)04	495020.50	2145089.00	2.03	28.950
13	B(S03E07)01	496201.88	2145303.75	2.15	30.710
14	B(S03E07)02	496801.38	2145016.75	2.27	32.446
15	B(S03E07)03	495902.38	2144637.25	2.04	29.189
16	B(S03E07)04	496817.28	2144504.00	2.19	31.329
17	B(S03E07)05	495208.85	2144374.21	1.86	26.620

NÚMERO CONSECUTIVO	NOMBRE DEL BANCO	UTM (X)	UTM (Y)	Hundimiento	Velocidad
				t1=2002 t2=2005	t1=2002 t2=2005
		m	m	m	cm/año
18	B(S03E08)01	497281.28	2145353.95	2.24	31.993
19	B(S03E08)02	498184.10	2144888.62	2.55	36.500
20	B(S03E08)03	497447.69	2144737.50	2.44	34.829
21	B(S03E08)04	498176.69	2144368.75	2.57	36.721
22	B(S03E09)01	498711.69	2145450.29	2.43	34.656
23	B(S03E09)02	499354.56	2145138.61	2.43	34.769
24	B(S03E09)03	499934.32	2144841.74	1.91	27.236
25	B(S03E09)04	499042.31	2144458.75	2.58	36.807
26	B(S03E09)05	499892.39	2144072.09	2.19	31.299
27	B(S03E10)02	500536.23	2145265.08	1.65	23.524
28	B(S03E10)04	500572.97	2144507.08	1.89	26.970
29	B(S03E10)06	501156.05	2144227.62	1.76	25.153
30	B(S04E06)03	494732.16	2142959.25	0.87	12.474
31	B(S04E07)03	496027.25	2142766.75	1.82	26.027
32	B(S04E07)04	496414.69	2143798.05	1.98	28.233
33	B(S04E08)02	497736.44	2144025.21	2.50	35.671
34	B(S04E08)03	497379.13	2143321.70	2.15	30.731
35	B(S04E08)04	498245.41	2142664.75	1.89	26.946
36	B(S04E09)01	498823.50	2143995.50	2.54	36.297
37	B(S04E09)02	499433.04	2143679.80	2.27	32.390
38	B(S04E09)03	498498.53	2143355.25	2.28	32.557
39	B(S04E09)04	499320.91	2142738.75	2.45	35.071
40	B(S04E10)01	500569.53	2143904.13	2.04	29.159
41	B(S04E10)02	501025.69	2143616.12	1.66	23.773
42	B(S04E10)03	500047.20	2143389.57	2.03	28.933
43	B(S04E10)04	500807.07	2143000.90	1.92	27.476
44	B(S04E10)05	501379.14	2142710.18	1.90	27.201
45	B(S04E11)01	502790.06	2144115.29	0.13	1.801
46	B(S04E11)02	501869.03	2143548.06	1.43	20.417
47	B(S05E06)02	494847.38	2140741.91	0.47	6.713
48	B(S05E06)04	495308.45	2142275.04	0.82	11.700
49	B(S05E06)05	495012.19	2142156.48	1.07	15.257
50	B(S05E07)01	496387.26	2141514.96	1.80	25.657
51	B(S05E07)02	495101.34	2141469.48	1.09	15.557
52	B(S05E07)03	497863.45	2141892.66	1.50	21.441
53	B(S05E08)03	497932.06	2141413.59	1.10	15.707
54	B(S05E09)02	498837.91	2142228.50	2.00	28.513
55	B(S05E09)03	499810.59	2141214.50	2.03	28.941
56	B(S05E09)04	499618.39	2142077.98	2.65	37.923
57	B(S05E10)01	500552.83	2141763.57	2.40	34.299
58	B(S05E10)02	500861.60	2142300.17	2.16	30.823
59	B(S05E10)03	501005.66	2141256.30	0.84	12.046
60	B(S05E11)01	502074.08	2142326.63	1.49	21.220
61	B(S05E11)02	502702.34	2142006.84	1.50	21.386
62	B(S05E11)03	501731.25	2141632.94	1.91	27.311
63	B(S06E06)01	494741.74	2140999.81	0.76	10.887
64	B(S06E06)03	494860.31	2140284.75	0.84	11.953

NÚMERO CONSECUTIVO	NOMBRE DEL BANCO	UTM (X)	UTM (Y)	Hundimiento	Velocidad
				t1=2002 t2=2005	t1=2002 t2=2005
		m	m	m	cm/año
65	B(S06E07)01	496198.85	2140864.61	1.18	16.844
66	B(S06E07)02	495952.89	2140110.45	1.22	17.480
67	B(S06E07)03	496761.81	2140082.04	0.60	8.563
68	B(S06E08)01	497794.29	2140374.10	0.38	5.377
69	B(S06E08)02	497889.84	2140388.98	0.35	4.971
70	B(S06E08)03	497335.03	2140930.86	0.88	12.554
71	B(S06E09)02	498696.48	2140659.72	0.41	5.866
72	B(S06E09)04	498942.00	2139850.00	0.14	1.954
73	B(S07E06)02	494863.61	2139340.26	0.59	8.471
74	B(S07E07)01	495804.65	2139342.66	0.46	6.643
75	B(S07E07)02	496516.30	2139233.88	0.27	3.814
76	B(S07E08)01	498056.23	2139643.49	0.22	3.190
77	B(S07E08)02	497233.95	2139597.18	0.16	2.226
78	C(S02E06)02	495043.72	2145857.75	2.19	31.284
79	C(S02E06)06	494829.06	2145911.00	2.10	30.054
80	C(S02E08)01	498135.81	2145695.30	2.43	34.724
81	C(S02E08)04	497755.70	2146205.43	2.34	33.421
82	C(S02E08)06	496878.37	2146358.90	2.26	32.259
83	C(S02E10)03	500834.37	2145705.98	1.22	17.401
84	C(S02E10)04	500926.45	2145913.62	1.21	17.281
85	C(S03E07)01	495237.00	2144343.00	1.93	27.586
86	C(S03E07)02	495876.38	2145464.50	2.26	32.319
87	C(S03E07)03	496088.88	2145360.25	2.17	31.037
88	C(S03E07)04	496528.94	2145148.75	2.16	30.843
89	C(S03E07)07	496772.78	2145032.25	2.23	31.874
90	C(S03E07)09	496331.78	2145240.18	2.16	30.839
91	C(S03E08)02	497234.94	2144841.50	2.38	33.954
92	C(S03E08)03	497581.38	2144627.75	2.45	34.953
93	C(S03E08)04	498446.31	2144190.50	2.61	37.267
94	C(S03E10)03	500597.06	2145229.23	1.52	21.660
95	C(S04E08)02	496883.16	2143536.00	2.62	37.414
96	C(S04E09)03	499761.46	2143542.32	2.22	31.747
97	C(S04E09)04	499927.85	2143456.98	2.23	31.900
98	C(S04E09)10	499756.12	2143799.34	2.09	29.853
99	C(S04E10)07	501417.38	2142691.91	1.87	26.716
100	C(S05E11)01	502569.08	2142108.42	1.57	22.413
101	C(S05E11)07	501766.34	2142483.22	1.61	23.070
102	C(S05E11)08	501585.51	2142606.84	1.71	24.499
103	M(S02E10)03	501075.22	2146359.71	1.64	23.430
104	M(S02E10)05	501220.01	2145759.39	1.18	16.877
105	M(S03E10)01	501190.13	2145219.31	1.41	20.100
106	M(S03E10)03	501119.78	2144720.00	1.80	25.664
107	M(S03E10)05	501683.83	2144443.83	1.57	22.474
108	M(S03E11)01	502158.88	2144208.78	1.27	18.183
109	M(S04E06)01	495190.97	2143805.21	1.81	25.854
110	M(S04E07)01	496082.52	2143307.77	1.98	28.330
111	M(S04E07)02	496840.03	2142956.21	2.01	28.701

NÚMERO CONSECUTIVO	NOMBRE DEL BANCO	UTM (X) m	UTM (Y) m	Hundimiento	Velocidad
				t1=2002 t2=2005	t1=2002 t2=2005
				m	cm/año
112	M(S04E07)04	496060.51	2142710.37	0.63	8.946
113	M(S04E07)05	495682.28	2143198.79	1.40	19.986
114	M(S05E08)02	498179.47	2141917.75	1.59	22.756
115	M(S05E09)01	498711.25	2141509.75	0.43	6.140
116	M(S06E09)01	499568.24	2140793.98	0.96	13.729
117	M(S06E09)03	499927.69	2140268.63	0.19	2.771
118	M(S06E10)01	500575.97	2140175.75	0.00	0.009
119	P(S04E07)01	496824.81	2142966.18	2.11	30.150
120	P(S04E08)01	497106.62	2143052.90	2.25	32.174
121	P(S04E08)02	497496.81	2142633.70	0.86	12.344
122	P(S05E07)01	496621.66	2142024.80	0.02	0.269
123	P(S05E07)02	495783.20	2141700.69	1.02	14.557
124	P(S05E07)03	496760.96	2141540.28	1.04	14.821
125	P(S05E08)01	497950.82	2142366.86	1.62	23.076
126	P(S05E08)02	497572.40	2142201.48	0.69	9.837
127	P(S05E08)03	497186.09	2141822.11	0.96	13.651

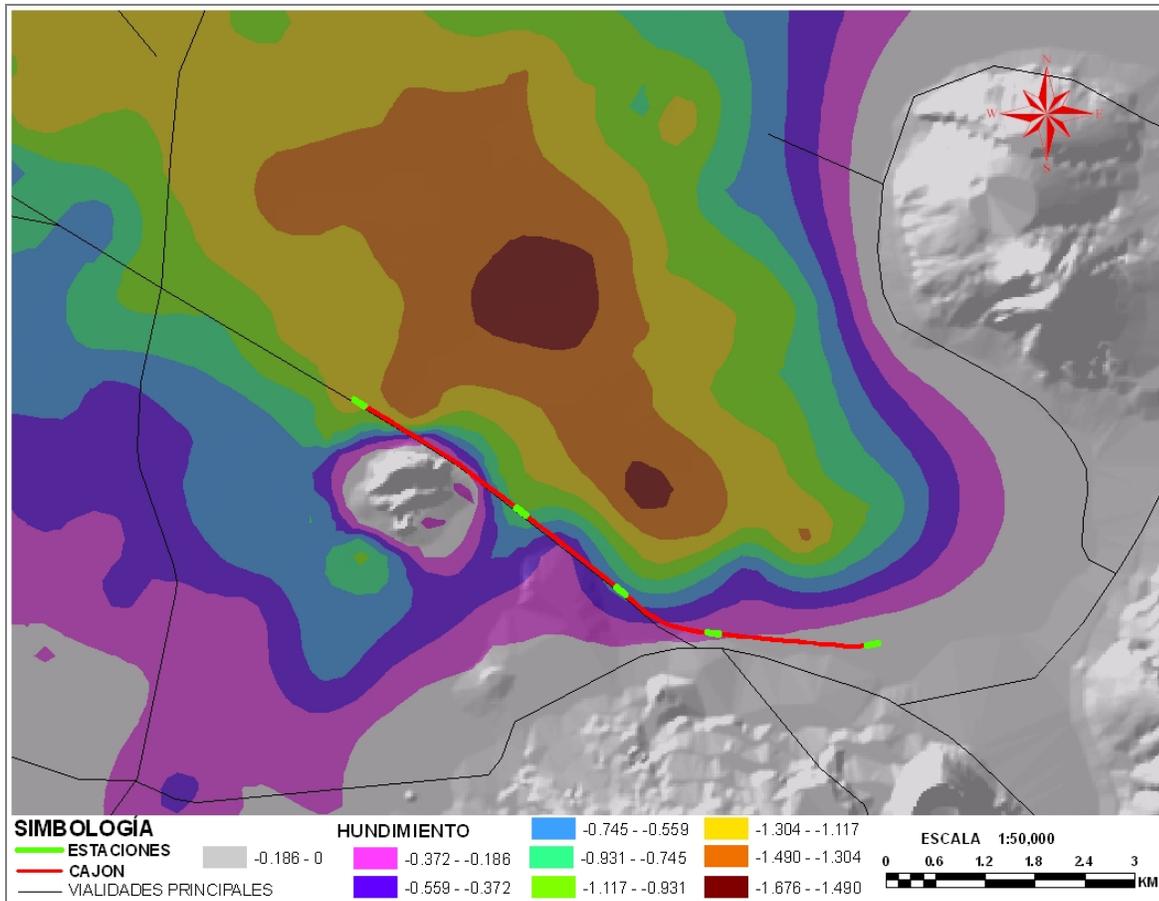


Figura II.27 Distribución espacial del hundimiento para el periodo 1998-2002.

Para definir la distribución espacial del hundimiento regional en la zona se recurre a la metodología de la geoestadística en donde se estiman los valores puntuales sobre una malla de puntos en el área considerada, a partir de estos valores estimados se construye un mapa de contornos de igual elevación. Con base en el mapa de contornos de igual elevación, se elabora el modelo que proporciona la configuración acumulada a través del tiempo del relieve de la superficie para el periodo estimado. Las Figs. II.27 y II.28 muestran el hundimiento acumulado en la zona estudio para el periodo 1998–2002 y 2002-2005 respectivamente. El tramo en estudio desde su puesta en funcionamiento hasta 2002 presenta un hundimiento acumulado aproximado de 5m y hasta 2007 de 7.7m.

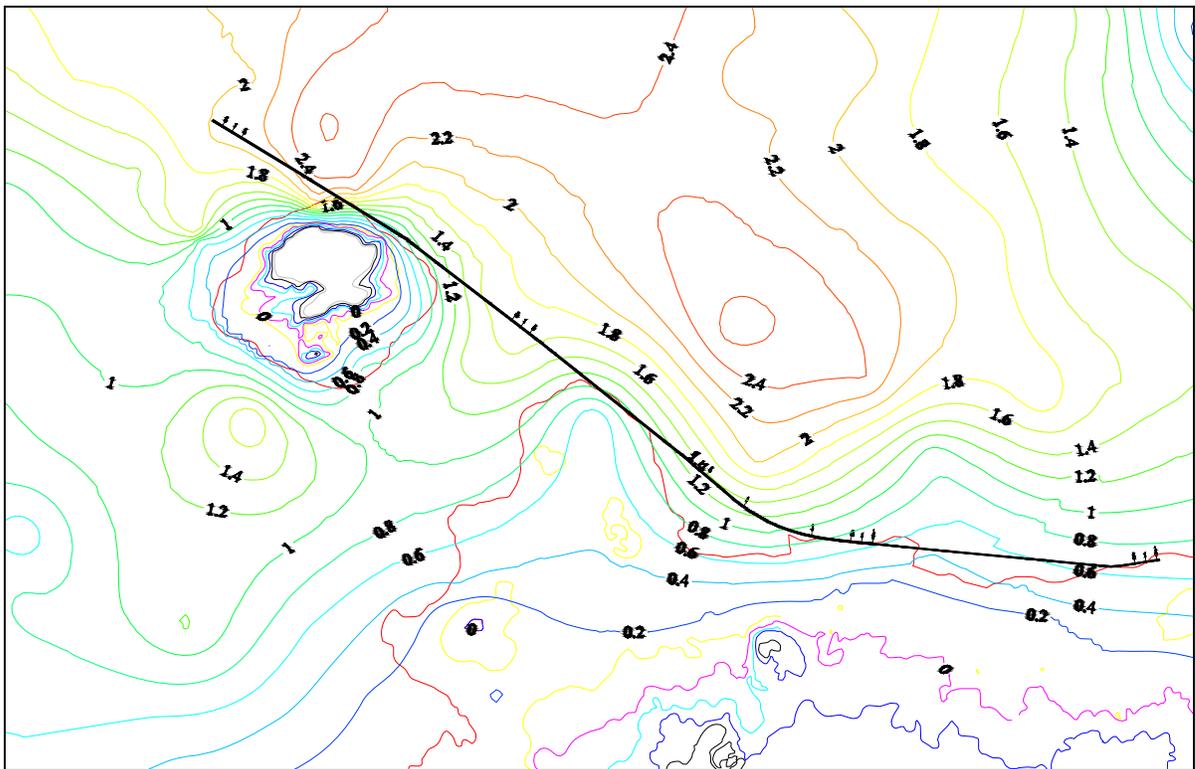


Figura II.28 Distribución espacial del hundimiento en el periodo 2002-2005.

b) Pozos de bombeo

La extracción del agua subterránea en el acuífero granular regional se inició en 1847 por los señores Pane y Molteni, porque se carecía de una red de distribución adecuada para aprovechar los manantiales que existían en esa época. Los pozos, casi siempre artesianos con gastos del orden de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, fueron una magnífica solución al problema del abastecimiento del agua. Por muchos años la condición artesisana fue estable, pero el crecimiento de la ciudad obligó a la apertura de más pozos.

Esta actividad se intensificó en las décadas de 1940 y 1950 causando hundimientos anuales hasta de 0.50 m/año en el centro de la ciudad de México, lo que provocó severos daños a edificios coloniales e infraestructura urbana (Carrillo, 1947; Marsal y Mazari, 1959).

Con el propósito de reducir la velocidad de los hundimientos en el centro de la ciudad, se descentralizó la explotación a la periferia de la ciudad. Como consecuencia de esta descentralización, el problema de hundimientos y agrietamiento del terreno se concentró en las nuevas áreas de explotación del agua subterránea.

El área de estudio vive una incoherencia relacionada con el recurso agua, ya que en tiempos de lluvias sufre grandes inundaciones (*pueblo de San Lorenzo Xicotencatl, Unidad Habitacional Ejército del Oriente*), lo que hace necesario desalojar grandes volúmenes de agua en tiempos relativamente cortos. Mientras que en períodos ordinarios, presentan graves deficiencias en el abasto de agua potable, situación que ocasiona que cada vez sea más difícil distribuir el agua en calidad y cantidad apropiada a toda la población. Además, persisten contrastes entre los beneficiados con el servicio de agua potable, ya que mientras unos disponen de agua en grandes cantidades, otros reciben dotaciones muy reducidas a precios mayores.

Es evidente que la problemática por el agua en la zona, se deriva de su acelerado crecimiento demográfico (INEGI-INE, 2000), ésta se abastece principalmente del agua subterránea que se extrae de un acuífero granular regional aluvio-piroclástico del Terciario y de un acuífero en materiales de origen volcánico del Pleistoceno (Ortega-Guerrero y Farvolden, 1989), produciendo un déficit en el almacenamiento del acuífero debido a la sobreexplotación (alrededor de *cerro del Marqués*).

La falta de agua potable para las diferentes actividades de la población, se logra mediante el aprovechamiento de ciertos pozos perforados a distintas profundidades ubicados principalmente en la planicie (*ampliación Vicente Villada*) y algunos en las faldas del piedemonte (*cerro del Marqués*); esos pozos aprovechan el agua del subsuelo. El caudal de estos pozos es insuficiente, lo que ocasiona la necesidad de importar agua del exterior de la subcuenca. El agua que consume la zona proviene principalmente de las fuentes de abastecimiento externas que se ubican en Milpa Alta, Tláhuac y Xochimilco, cuyos caudales son captados por pozos conectados a diferentes ramales de conducción; el primero es desde Tlatelco-Tecomiltl y San Luis, donde inicia una tubería de 6.59km de longitud y de 20 a 54 pulgadas de diámetro. El ramal de Xochimilco tiene 6.69km de longitud y 36 pulgadas de diámetro, en su confluencia se inicia el Chalco-Xochimilco, que tiene 19.95km de longitud y conduce 2 m³/s, y llega a la planta de la Estrella, de donde se deriva para la población de Iztapalapa.

La segunda fuente, se localiza en Tláhuac donde se ubican los pozos *Santa Catarina*, que descargan al ramal que conduce el agua hasta la planta de rebombeo *La Caldera*, que envía el agua al tanque de igual nombre situado en el cerro *La Caldera*. Ahí mismo se recibe un pequeño volumen de agua que procede del ramal *Mixquic-Santa Catarina*. A nivel interno dentro de los límites de la delegación Iztapalapa, existen 57 pozos profundos de los cuales operan 40, cuyo caudal se almacena en tanques o bien abastece directamente a la red de distribución. La profundidad promedio es de 160m, el más somero es de 70m y el más profundo de 600m.

Los principales campos de extracción del acuífero en la zona se encuentran en los siguientes lugares (Tabla II.5):

- Alrededor del *cerro del Marqués*, donde existen 9 pozos.
- Al sur de *Nezahualcoyotl* (colonia *Ampliación Villa Oriente*) con cinco pozos. Estos pozos cuya profundidad promedio es de 300m, en conjunto extraen un volumen promedio de 0.63 m³/s, que se vierten directamente en la red de distribución.

Tabla II.5 Pozos que se ubican en la zona de estudio.

Número de pozo	Nombre del pozo	Clave
1	Peñón 1	107
2	Peñón 2	108
3	Peñón 3	109
4	Peñón 4	110
5	Peñón 5	111
6	Peñón 6	112
7	Peñón 7	113
8	Peñón 8	114
9	Peñón 9	115
10	Iztapalapa 6	243
11	Neza3	NZ3
12	Neza4	NZ4
13	Neza5	NZ5
14	Neza7	NZ7
15	Neza8	NZ8

Entre 1957 y 1959 se perforaron un total de nueve pozos (Peñón 107 a Peñón 115), a profundidades entre 200 y 250m en el acuífero volcánico del Pleistoceno denominado como Sistema Peñón, Fig. II.29 y a principios de 1960 se inició su operación. Cada pozo extrae un caudal promedio que varía entre 20 y 100 l/s. La extracción promedio anual del Sistema Peñón, para el mismo periodo de tiempo, donde la extracción total varía entre 490 y 600 l/s, con un promedio de 527 l/s (Aguilar *et al.*, 2006). La evolución de la carga hidráulica durante el periodo de 1960 a 1998 es de 35m, en casi 38 años y continúa descendiendo progresivamente con el tiempo, esto representa un promedio de 0.92 m/año para ese periodo. Sin embargo, los abatimientos principales se generaron en el periodo de 1986 a 1998, cuando se registra un decremento de 15m en la carga hidráulica, esto es, un promedio de 1.25 m/año.

Adicionalmente, dado que el caudal crítico calculado por (Aguilar *et al.*, 2006), es de 474 l/s, siendo inferior al valor promedio de extracción del Sistema Peñón de 527 l/s, es evidente que desde el principio de operación de los nuevos pozos, se tuvieron las condiciones para generar la falla de los materiales del subsuelo y generar sistemas de grietas cada vez mayores. Después de 15 a 20 años inició la aparición de grietas de diferentes dimensiones sobre la superficie del terreno, asociadas a la intensa deformación vertical tanto en el acuífero volcánico como en el acuitardo lacustre que le subyace en la antigua zona de lago.

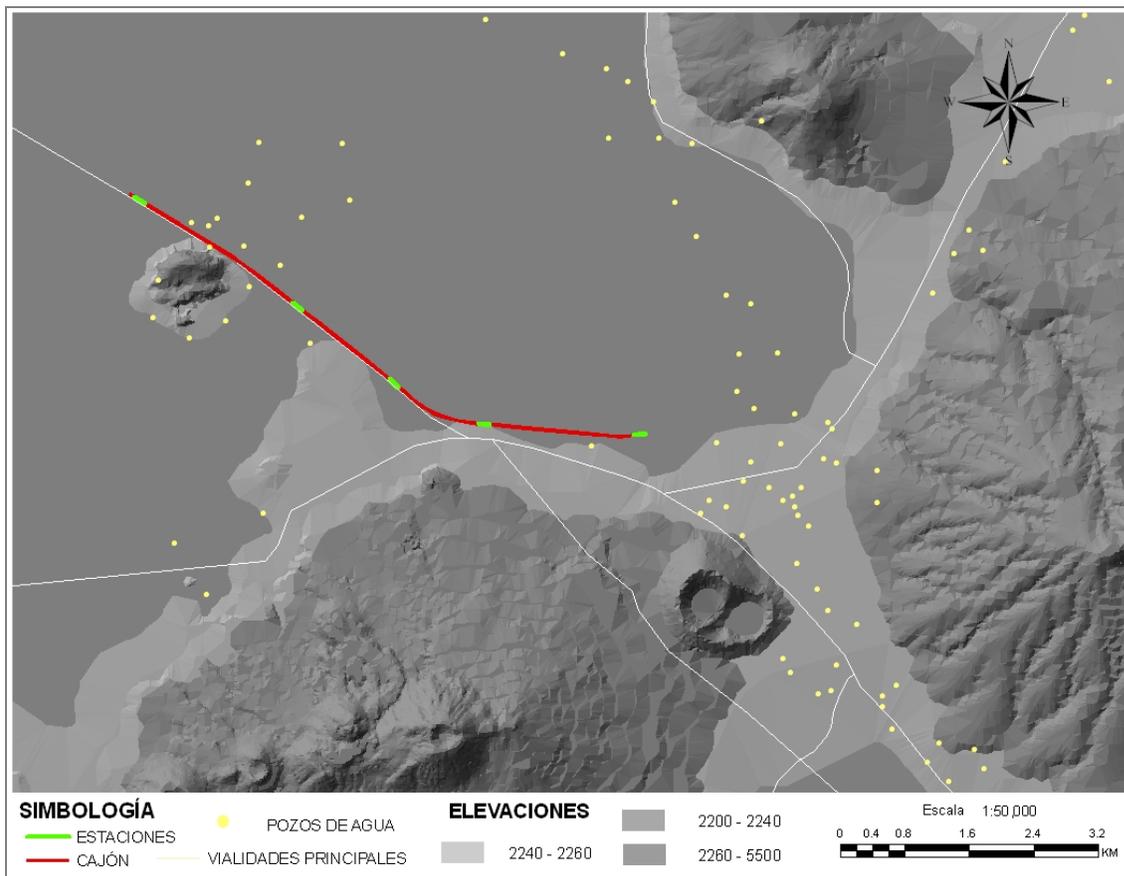


Figura II.29 Distribución espacial de pozos de bombeo en la zona de estudio.

El *cerro del Marqués* constituye un acuífero en rocas volcánicas fracturadas y materiales piroclásticos del Pleistoceno, similar al *cerro de la Estrella* y a la *sierra de Santa Catarina*. En sus alrededores existe un acuitardo en materiales lacustres originados por el depósito de material fino, principalmente, en las antiguas zonas de lagos.

En el área de los pozos Peñón 110 a Peñón 112, el acuitardo lacustre sobreyace a un estrato de arenas y gravas, el cual cubre a un segundo acuitardo formado por sedimentos arcillosos. Toda esta secuencia se encuentra subyacida por el acuífero regional, compuesto en forma local por materiales piroclásticos y rocas basálticas fracturadas. En esta sección también se observa que el acuífero libre aflora donde están ausentes los sedimentos arcillosos, como es el caso de la zona al pie del *cerro del Marqués*.

La sección hidrogeológica, Fig. II.30, muestra la distribución de las unidades hidrogeológicas en el subsuelo a partir de la interpretación de cortes litológicos disponibles; se aprecia que el acuitardo lacustre confina localmente al acuífero en rocas volcánicas y materiales piroclásticos. Entre los pozos Peñón 110 y 111 se ubica un acuífero de gravas y arenas con espesor de 20m entre dos acuitardos, el superior de 40m de espesor y el inferior de 25m; los 116m inferiores corresponden al acuífero volcánico.

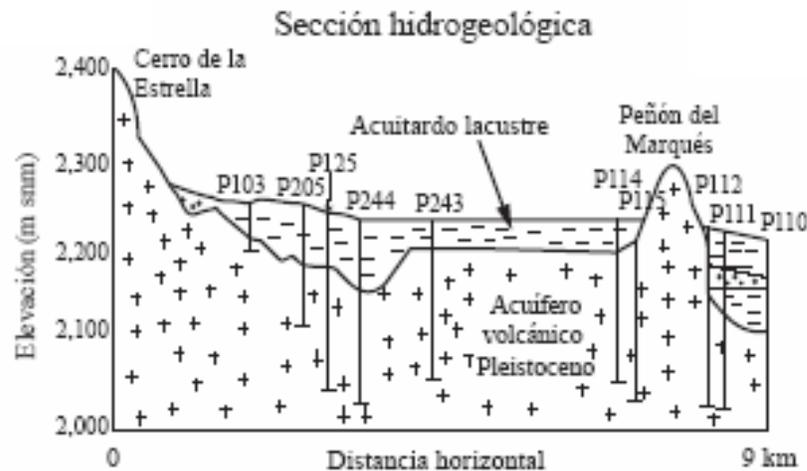


Figura II.30 Sección hidrogeológica de la zona de estudio (Aguilar *et al.*, 2006).

II.2.4.5 Agrietamiento

La aparición de grietas en los suelos arcillosos del valle de México, es un fenómeno que se ha acelerado en las últimas décadas y está íntimamente ligado al hundimiento regional que se presenta en el valle de México a consecuencia del bombeo de agua en los estratos profundos. Al incrementarse el hundimiento de la ciudad de México, aumenta la importancia del agrietamiento, el cual antes se pensaba que solo ocurría en el vaso seco del Lago de Texcoco. Ahora se sabe que se presenta también en todas las zonas de transición abrupta, con su secuela de daños a las construcciones e instalaciones urbanas, llegando incluso a ser causa de angustia e inseguridad en las personas. El problema del agrietamiento constituye un grave factor de riesgo que debe ser evaluado para definir sus medidas protectivas, algunos autores han emprendido su estudio desde su aspecto descriptivo (Auvinet 1981, Cserna *et al.*, 1987, Arias 1989, y Lugo-Hubp *et al.* 1991, 1995), como en su interpretación teórica (Juárez-Badillo, 1961, 1975; Juárez-Badillo y Figueroa-Vega, 1987, 1989; Alberro y Hernández, 1990; Auvinet y Arias, 1991; Juárez-Luna *et al.*, 2002).

El agrietamiento puede tener orígenes diversos; para algunos de ellos ya se han encontrado explicaciones satisfactorias, pero existen casos donde las causas no se han definido adecuadamente. En 1948 Nabor Carrillo planteó las bases para resolver el problema de la formación de grietas en el lago de Texcoco, proponiendo como causa principal el abatimiento de las presiones hidrostáticas en el subsuelo, generado por la extracción de agua. El abatimiento puede llegar a cierto nivel donde aparecen esfuerzos de tensión en la parte superior del estrato arcilloso debido al fenómeno de capilaridad, que correspondientemente generan compresiones en las tres direcciones ortogonales dentro de la estructura sólida del suelo. Cuando la lluvia forma una lámina delgada de agua sobre el estrato, las tensiones en el agua se disipan y, por tanto, las compresiones en la fase sólida disminuyen, pudiendo llegar a convertirse en tensiones bajo circunstancias especiales.

Juárez Badillo, en 1961, modifica las ideas anteriores, eliminando el flujo horizontal en el estrato permeable como causa de las tensiones del agua en la parte superior del estrato, y propone que el motivo sea la evaporación superficial intensa provocada por la acción solar. En estas condiciones, el secado genera crecientes tensiones en el agua y compresiones en el suelo. Cuando se presenta una lluvia, capaz de destruir los meniscos formados en los espacios intersticiales de la superficie del estrato, se transfieren súbitamente los esfuerzos de tensión del agua al suelo, produciéndose así las grietas.

Bishop en 1967 y Skempton en 1969 fueron los primeros en sugerir que los conceptos de mecánica de fractura, podían aplicarse al proceso de falla progresiva de un terraplén de arcilla. Vallejo en 1985 aplica la teoría de la mecánica de fractura lineal elástica para interpretar el mecanismo de falla en muestras de arcilla caolinita endurecida sujeta a condiciones de esfuerzo a compresión y cortante.

Auvinet y Arias en 1991, analizan el fenómeno de agrietamiento aplicando la teoría de la mecánica de fracturas, tomando como criterio de propagación llamado "*factor de intensidad de esfuerzos (K)*", para el caso de una grieta ya existente reactivada por la presión del agua de lluvia infiltrada durante un fuerte aguacero.

Alberro y Hernández en 1990 y Alberro *et al.*, en 2006 presentan un planteamiento elástico general, incluyendo fuerzas de filtración, que implican tres casos: generación de grietas en el lago de Texcoco por evaporación y encharcamiento, agrietamiento por bombeo dentro de una faja infinita de ancho constante y fracturamiento por exceso de presión hidráulica en una cavidad esférica dentro de un medio infinito. Se demuestra que en los tres casos se generan tensiones en la masa del suelo capaces de generar la aparición de grietas. Este aspecto se agudiza en las zonas cercanas a la zona de transición debido a que existe una mayor interacción entre materiales de diferente rigidez y de diferente deformabilidad. Los anteriores trabajos si bien describen planteamientos para el estudio y explicación del agrietamiento en los suelos arcillosos, tienen aún limitantes respecto a las condiciones de esfuerzos analizadas al no definir o en caso dado ignorar, los criterios de generación y propagación de una grieta.

Para identificar el fenómeno de agrietamiento en la zona de estudio, se realizó una intensa campaña sistemática de levantamiento de grietas, en su aspecto descriptivo (ubicación y características geométricas), utilizando un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Fig. II.31. Se comenzó por la parte sur de la calzada *G. Ignacio Zaragoza*, de poniente-oriental entre las colonias *U. H. Ejercito del Oriente*, *el Paraíso*, *Unidad habitacional peñón viejo*, *José María Morelos*, *Cantera del peñón viejo*, *Zona urbana ejidal Santa Marta Acatitla sur*, *el Edén*, *el pueblo de Santa Marta acatitla sur*, *Ampliación los reyes*, *Los reyes Acaquilpan*. Finalizando en la parte norte de la Calzada, de Oriente-Poniente, entre las colonias, *Valle de los reyes*, *Valle de los pinos*, *Unidad habitacional la Floresta*, *Fraccionamiento la Floresta*, *Unidad habitacional Tepozanes*, *Popular Ermita Zaragoza*, *Unidad habitacional la colmena*, *Fuentes de Zaragoza*, *Unidad habitacional Solidaridad*, *Zona urbana ejidal Santa Marta Acatitla norte*, *Colonia de San Lorenzo Xicotencatl*. La información de campo recolectada fue procesada para integrar el mapa de agrietamiento de la zona, Fig. II.32.

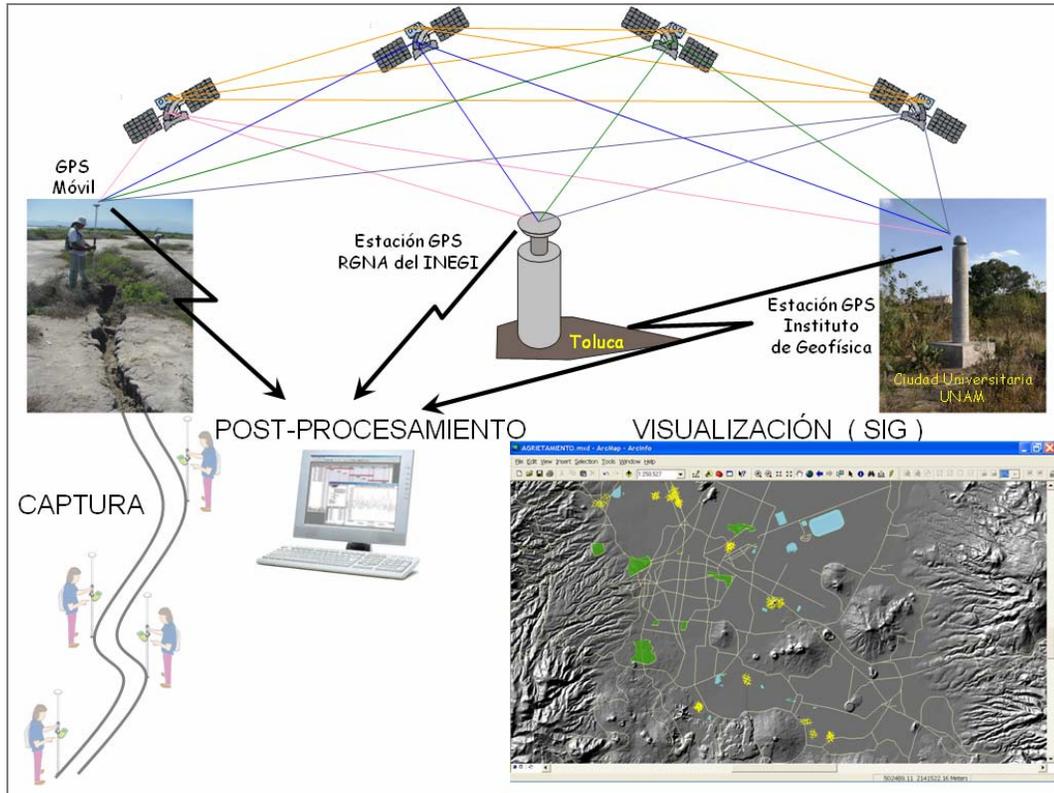


Figura II.31 Captura, procesamiento y visualización de las grietas (Méndez, 2007).

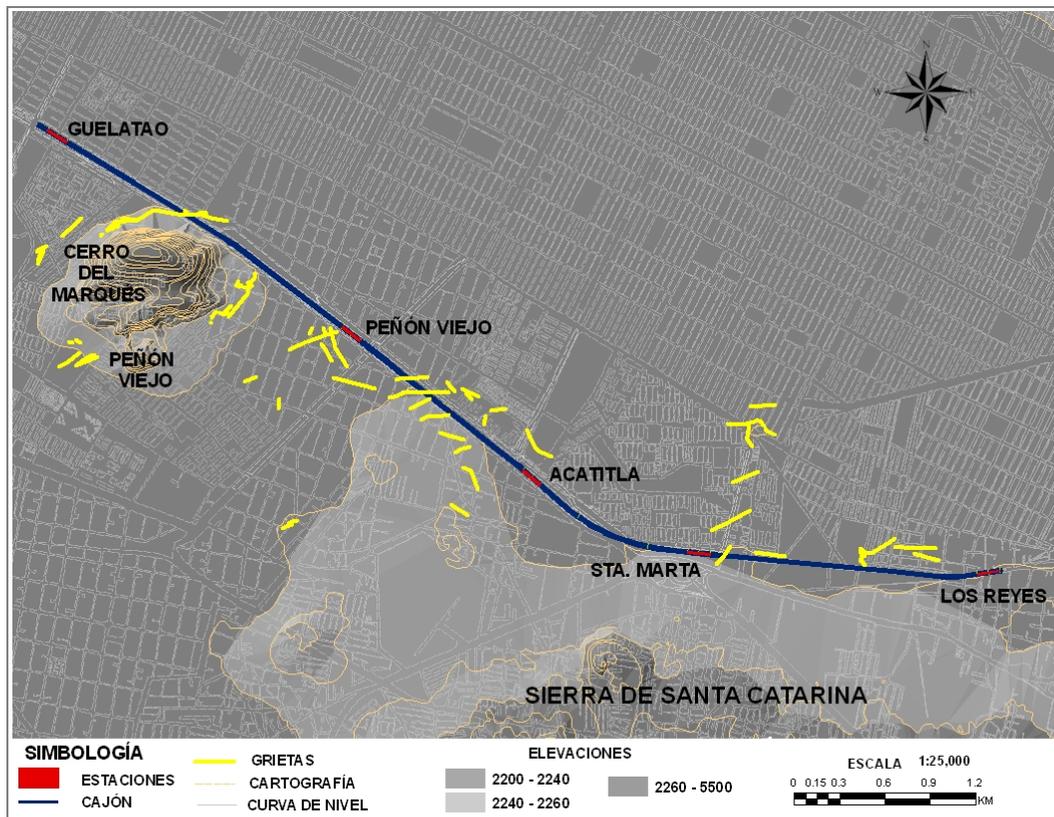


Figura II.32 Distribución espacial de grietas en la zona de estudio (Méndez, 2007).

Clasificación de grietas, (anexo A)

Las grietas localizadas en la zona de interés, se clasificaron de acuerdo con lo siguiente:

- Tipo 1: Grietas correspondientes a hundimientos diferenciales en las zonas de transición abrupta entre materiales firmes y blandos. Estas se caracterizan por presentar escalones.
- Tipo 2: Grietas en suelos blandos de la zona lacustre atribuibles a fracturamiento hidráulico.
- Tipo 3: Grietas atribuibles a la heterogeneidad del subsuelo (fractura de la costra superficial, emersión aparente de estructuras geológicas, tlateles, etc.).

Zonas potenciales de agrietamiento en el Distrito Federal

Prestando especial atención al mecanismo de formación de grietas en las zonas de transición abrupta de suelos firmes a suelos lacustres blandos, y con base en el mapa de zonificación geotécnica del Distrito Federal (GDF, 2004) es posible identificar varias zonas potenciales de generación de grietas de tensión, estas zonas se muestran en la Fig. II.33. Este mapa es muy general ya que en él no se indica el tipo de grietas en cada zona de acuerdo con la clasificación presentada en la Tabla II.6 y se muestran en la Fig. II.32.

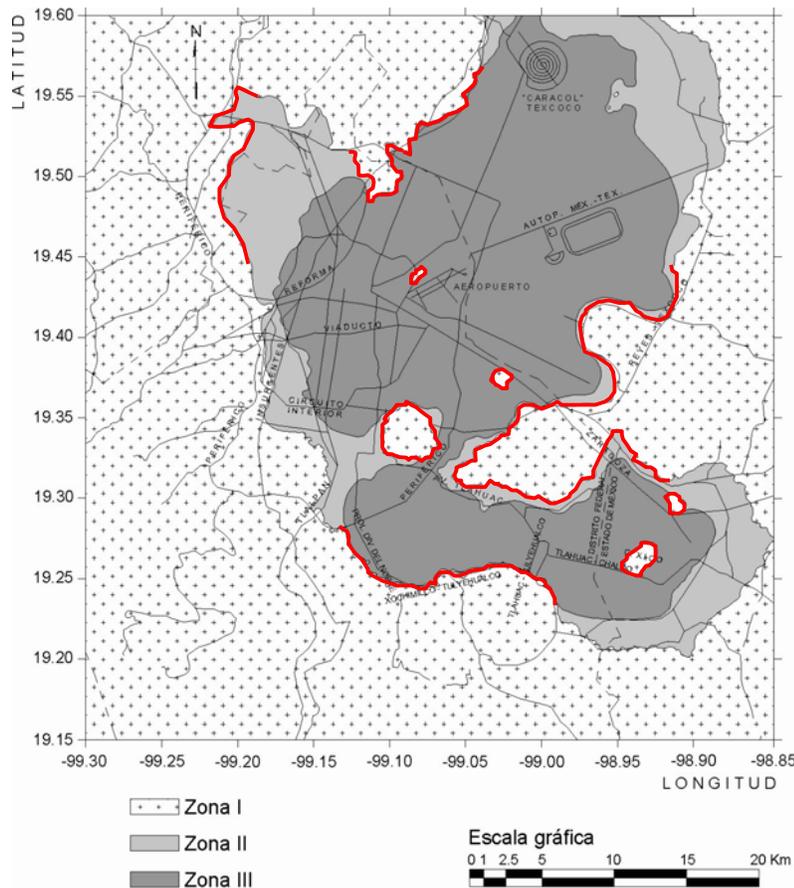


Figura II.33 Zonas de riesgo de agrietamiento por transición abrupta (adaptado de Santoyo *et al.*, 1990).

Entre los cadenamientos 17+020, 18+860, 19+000, 19+050 y 21+320 del trazo geométrico de la *Línea A*, se pueden apreciar grietas que cruzan todo el ancho de la calzada *Ignacio Zaragoza*, Figs. II.34 a II.39, con una orientación predominante nortesur, mientras que en los cadenamientos 17+600, 18+220, 18+300, 19+050 19+220 y 22+250 las grietas se disipan antes de llegar a la avenida.

En el área de estudio, la grieta 13, Figs. II.34 y II.35, de acuerdo con la Tabla II.6, tiene una longitud aproximada de 850m y se extiende alrededor de la ladera nor-poniente del *cerro del Marqués*, comienza desde la calle de *Ahuizotl*, continúa en la calle *Nezahualcoyotl* y *Cacamatzin*, dañando la pared que limita el flanco sur del exdeportivo “*Costa verde*”, Fig. II.34, en ella se enmarca la evolución del agrietamiento del 2002 a 2007. La grieta se extiende dañando estructuralmente al CINEMEX, Fig. II.35a y atraviesa la calzada *Ignacio Zaragoza* dañando fuertemente la estructura del metro, Fig. II.35b y II.35c, se prolonga hasta la colonia de *San Lorenzo Xicotencatl*, dañando el patio y la barda del exdeportivo “*La Cascada*”, Fig. II.35d.



Figura II.34 Ladera Nor-poniente del *cerro del Marqués* (flanco sur del Deportivo “*Costa Verde*”).



Figura II.35 Fotografías de la Grieta 13, colonia *U. H. Ejercito del oriente* y *San Lorenzo Xicotencatl* (km 17+020).

La grieta 42, Fig. II.36, tiene una longitud aproximada de 215m con una orientación NE 85° promedio, se observa a partir de la calle de *Claudio Alcocer*, Fig. II.36a, pasa por la entrada de una casa de materiales para construcción, con un escalón de 0.6m, cruza completamente la calzada *Ignacio Zaragoza* y la estructura del metro, Fig. II.36b y se prolonga a la calle de Emilio Campa en la colonia de *Fuentes de Zaragoza* Fig. II.36c.



Figura II.36 Fotografías de la Grieta 42, colonias el *Eden* y *Fuentes de Zaragoza* (km 18+860).

La grieta identificada con el número 43, Fig. II.37; tiene una longitud aproximada de 345m con una orientación promedio NE 83° , se observa a partir de la calle de *Claudio Alcocer*, Fig. II.37a, y *Francisco Manríquez*, fracturando guarniciones y bardas, Atraviesa completamente la calzada *Ignacio Zaragoza*, Fig. II.37b, y se extiende hasta la calle de *Cedros* en la colonia de *Fuentes de Zaragoza*, Fig. II.37c, presenta un escalón de 0.15m.



Figura II.37 Fotografías de la Grieta 43, colonia el *Eden* y *Fuentes de Zaragoza* (km 19+000).

La grieta 46, Fig. II.38, tiene una longitud aproximada de 270m con una orientación promedio N 70° E, se observa a partir de la calle de *Emilio Madero* y pasa por la calle de *Camilo Arriaga*, tiene un ancho de 2.5m, en la colonia del *Edén*, se extiende hasta entronque de *Guillermo Vaca* y *Gabriel Tepopa*, Fig. II.38a, hasta la calzada *I. Zaragoza*, Fig. II.38b.

a) calle de *Guillermo Vaca*b) calzada *I. Zaragoza*

Figura II.38 Fotografías de la Grieta 46, colonia el *Eden* y *Fuentes de Zaragoza* (km 19+050).

La grieta 56, Fig. II.39, tiene una longitud aproximada de 150m con una orientación promedio NE 40°, se presenta entre la Av. Generalísimo Morelos y Av. *Siervo de la Nación*, daña seriamente la estructura del metro al grado de causar falla estructural.



Av. Generalísimo Morelos

Figura II.39 Fotografías de la Grieta 56, colonia *Unidad habitacional Tepozanes* y la colonia *Ermita Zaragoza* (km 21+320).

Análisis de las características físicas del agrietamiento

Los recorridos de campo permitieron identificar más de setenta grietas existentes en la zona de estudio. Para conocer la dirección preferencial de estas grietas se realizó un análisis estadístico sobre la dirección de cada una de ellas, los resultados se representan mediante un esquema llamado *rosa de direcciones* de la Fig. II.40, en ella se observa una orientación principal predominante al NE70°SW. Asimismo, se identificó un sistema conjugado con dirección NE65°SW. Adicionalmente, se estableció un sistema secundario de agrietamiento, el cual se presenta con direcciones NE10°SW, NE40°SW, NE85°SW y NW35°SE, NW88°SE. El tercer nivel, incluye el agrietamiento restante. En la Tabla II.6 se presenta un resumen de las principales características físicas de las grietas levantadas.

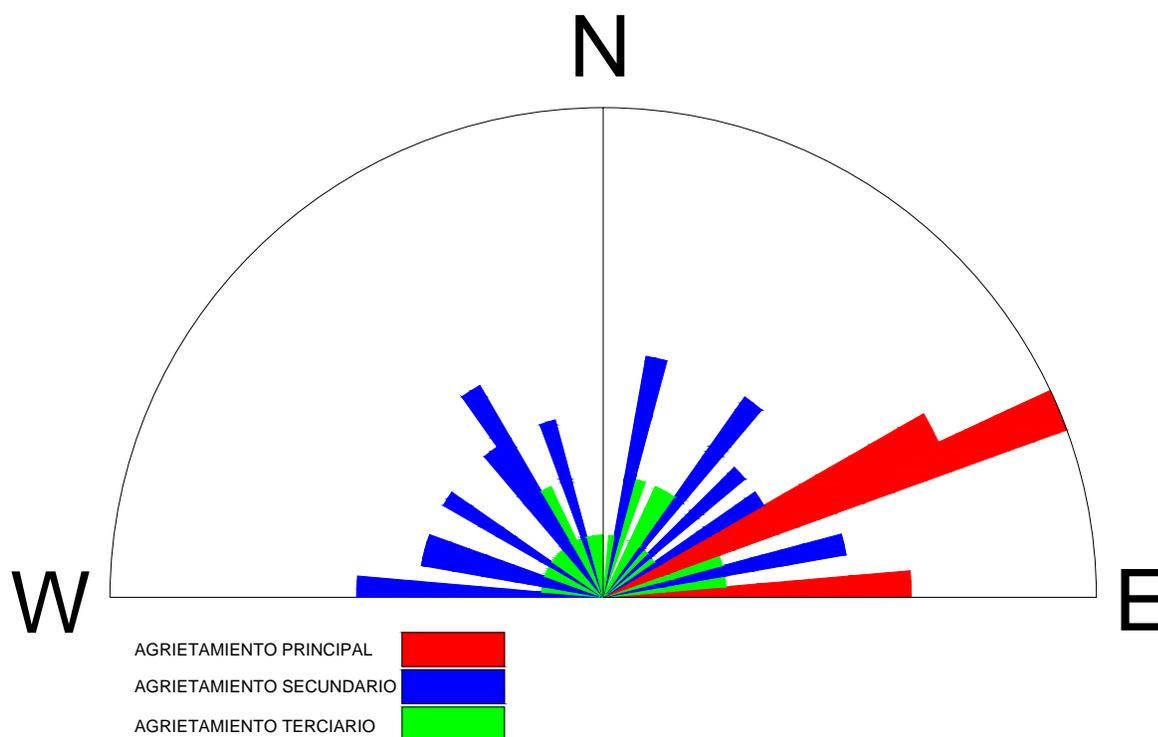


Figura II.40 Diagrama de rosa de direcciones en la zona.

Tabla II.6 Características físicas de las grietas identificadas.

No	Nombre de Calles afectadas	Orientación	Longitud (m)	Clasificación
1	ENEP Zaragoza	NE 65° NE 54°	170	Transición abrupta
2	ENEP Zaragoza, Batalla 5 de mayo	NE 67°	157	Transición abrupta
3	ENEP Zaragoza	NE 50° NE 62° NE 85°	141	Transición abrupta
4	ENEP Zaragoza	NW 71°	31	Transición abrupta
5	ENEP Zaragoza	NW 71°	37	Transición abrupta

No	Nombre de Calles afectadas	Orientación	Longitud (m)	Clasificación
6	Batallón ligero de Toluca	NE 28° NE 17°	96	Transición abrupta
7	Batallón de Toluca	NE 16° NE 37°	102	Transición abrupta
8	Batallón fijo de Veracruz	NE 44° NE 67°	81	Transición abrupta
9	Av. México	NE 49°	180	Transición abrupta
10	Coronado	NE 46°	120	Transición abrupta
11	Ahuizolt	NE 64° NE 33°	88	Transición abrupta
12	Nezahualcoyotl	NE 19°	50	Transición abrupta
13	Nezahualcoyotl, Cacamatzin, Calzada Ignacio Zaragoza, Enna	NE 36° NE 87° NE 56° NW 80° NW 81° NW 87°	855	Transición abrupta
14	Cacamatzin	NW 80°	106	Transición abrupta
15	Calzada Ignacio Zaragoza,	NW 55°	40	Transición abrupta
16	Enna	NE 88°	48	Transición abrupta
17	Av. Manuel Bonilla	NE 69°	30	Transición abrupta
18	Nicolás Bravo	NE 56°	26	Transición abrupta
19	Luís García, Av. Manuel Bonilla	NE 45°	32	Transición abrupta
20	Luís García	NW 86°	6	Transición abrupta
21	Salvador Escalante y Luís García	NE 46° NE 46°	85	Transición abrupta
22	Salvador Escalante	NE 39°	10	Transición abrupta
23	Salvador Escalante y Luís García	NE 66° NE 33°	30	Transición abrupta
24	Luís García, Rosalío, Bustamante, Calzada Ignacio Zaragoza	NE 38° NE 39° NE 14° NE 31°	526	Transición abrupta
25	A. Alarcón, D. Batalla, R. Bustamante	NW 87° NE 65°	56	Transición abrupta
26	Alfonso Alarcón	NE 56°	15	Transición abrupta
27	Diodoro batalla	NE 65°	12	Transición abrupta
28	Diodoro batalla	NE 27°	25	Transición abrupta
29	Diodoro batalla	NE 30°	8	Transición abrupta
30	Salvador Escalante	NW 18° NE 14°	37	Transición abrupta
31	Salvador Escalante, Diodoro batalla	NE 19°	14	Transición abrupta
32	José Peón del valle	NE 69°	90	Fracturamiento hidráulico
33	Cayetano Andrade	NE 14°	65	Fracturamiento hidráulico
34	Francisco Flores, Pedro Aceves	NE 68° NE 76°	71	Heterogeneidad del subsuelo
35	Pedro Aceves, Culiacán	NE 69°	65	Heterogeneidad del subsuelo
36	Joaquin Tlausell,	NW 76°	290	Fracturamiento hidráulico

No	Nombre de Calles afectadas	Orientación	Longitud (m)	Clasificación
	Marcos N. Mendez, Av. Republica Federal del Sur			
37	Luís Jasso, Luís García, Manuel Calero	NW 46° NW 29° NW 34° NW 41°	135	Fracturamiento hidráulico
38	Av. Republica Federal del Sur, Luís García, Luís Jasso, Calzada Ignacio Zaragoza	NW 34° NW 17° NW 4°	368	Fracturamiento hidráulico
39	Santiago de la Vega, José del río, Manuel Calero, Calzada Ignacio Zaragoza	NE 65° NE 71° NE 79°	528	Fracturamiento hidráulico
40	José del Río	NE 30°	49	Fracturamiento hidráulico
41	Manuel Calero,	NE 10° NW 13°	57	Fracturamiento hidráulico
42	Claudio Alcocer, Calzada Ignacio Zaragoza, Emilio Campa	NE89° NE81°	214	Heterogeneidad del subsuelo
43	Claudio Alcocer, F. Manríquez, Calzada Ignacio Zaragoza, Cedros	NE 78° NE 81° NW 87° NE 88°	347	Heterogeneidad del subsuelo
44	Cedros, Pinos	NE 38°	84	Fracturamiento hidráulico
45	Tito Ferrer, Calzada Ignacio Zaragoza,	NE 38°	198	Heterogeneidad del subsuelo
46	Camilo Arriaga, Guillermo vaca, Gabriel Tepopa	NE 63° NE 86° NE 74°	269	Heterogeneidad del subsuelo
47	Pinos	NW 37°	59	Fracturamiento hidráulico
48	Pinos	NW 66°	122	Fracturamiento hidráulico
49	Gabriel Tepopa, Everardo Gonzalez.	NE 72°	171	Heterogeneidad del subsuelo
50	Oyamales, Calzada I. Zaragoza	NE 11°	58	Fracturamiento hidráulico
51	Oyamales	NE 79°	97	Fracturamiento hidráulico
52	Luís T. Navarro, Gabriel Tepopa	NE 69°	112	Heterogeneidad del subsuelo
53	Cayetano Andrade, Jose M. Carrion, Av. Independencia	NW 19° NW 72°	189	Heterogeneidad del subsuelo
54	Benito Juárez	NW 57°	135	Transición abrupta
55	Octavio Paz,	NW 75°	222	Fracturamiento hidráulico

No	Nombre de Calles afectadas	Orientación	Longitud (m)	Clasificación
	Jesús Carrillo	NW 58° NW 44° NW 29° NW 23°		
56	Av. Generalísimo Morelos, Av. Siervo de la Nación	NE 40°	151	Heterogeneidad del subsuelo
57	La roqueta, Zavala, Av. Siervo de la Nación	NE 66° NE 61°	290	Fracturamiento hidráulico
58	Tabachines	NW 81°	203	Fracturamiento hidráulico
59	Joaquín de Guevara, Av. Siervo de la Nación	NE 66°	188	Fracturamiento hidráulico
60	Av. Siervo de la Nación Lorenzo L. M. de Galardin	NW 35°	77	Fracturamiento hidráulico
61	Av. Texcoco, Av. Siervo de la Nación	NE 11°	80	Heterogeneidad del subsuelo
62	Apatzingan Av. Texcoco, Ignacio Allende, José María Morelos y Pavón	NW 87° NE 76° NE 88° NW 60° NW 57°	260	Heterogeneidad del subsuelo
63	Miguel Hidalgo, Ignacio Zaragoza, Ignacio Allende, José María Morelos y Pavón	NE 85°	167	Fracturamiento hidráulico
64	José María Morelos y Pavón, Mariano de Abasolo, Nicolás Bravo	NW 62° NW 35°	77	Heterogeneidad del subsuelo
65	Presa del sordo Av. Generalísimo Morelos,	NW 34° NW 40°	46	Fracturamiento hidráulico
66	Presa del sordo Cedros	NW 37° NW 10°	118	Fracturamiento hidráulico
67	Presa del sordo	NW 27°	45	Fracturamiento hidráulico
68	Presa del sordo, M. Zúñiga, Fresno Roble, Oyamel, Av. Del Pino	NW 32° NW 57° NE 88° NE 56°	235	Fracturamiento hidráulico
69	Av. Del Pino, Guadalupe Victoria, Av. Industrial	NW 88°	276	Fracturamiento hidráulico
70	Av. Industrial Horacio Zúñiga	NW 74°	169	Fracturamiento hidráulico

En la zona se identificaron tres tipos principales de grietas:

- *Fracturamiento hidráulico*; grietas en el acuitardo lacustre con orientación preferencial NE 70° SW y NW 30° - 45° SE con longitudes de 50m a 530m;
- *Transición abrupta*; grietas en materiales volcánicos, paralelas a las curvas topográficas del *Cerro del Marqués*, espaciadas a cada 5m o 10m, con longitudes de 10m a 850m y desplazamientos verticales de hasta 0.7m y horizontales de 0.10m a 2.0m;
- *Heterogeneidad del subsuelo*; grietas con orientación preferencial NE 60-70° SW y con longitudes de 70m a 350m y desplazamientos verticales de hasta 0.3m y ancho horizontal hasta de 2.0m.

En el Anexo A se presentan ejemplos de los tres tipos de grietas encontradas en la zona de estudio.

Deformaciones verticales de la superficie del terreno

En ciertos puntos de la calzada *Ignacio Zaragoza* se observan deformaciones verticales que están asociadas con el fenómeno del hundimiento y agrietamiento que se presenta en el valle de México a consecuencia del bombeo de agua en los estratos profundos. En este trabajo se determinó la posición de 34 puntos cóncavos y convexos correspondientes a las curvas verticales, mediante un GPS geodésico diferencial de doble frecuencia como se muestra en la Fig. II.41, asimismo la ubicación de la única anomalía geotécnica localizada en la zona y en la Tabla II.7 se indican los cadenamientos de dichos puntos.

Tabla II.7 Deformaciones verticales identificadas en la superficie de la calzada *Ignacio Zaragoza*.

No	Cadenamiento	No	Cadenamiento
1	16+570	18	18+100
2	17+020	19	18+195
3	17+180	20	18+530
4	17+230	21	18+860
5	17+240	22	18+880
6	17+280	23	18+925
7	17+290	24	18+980
8	17+340	25	19+035
9	17+360	26	19+080
10	17+385	27	19+140
11	17+475	28	19+530
12	17+485	29	19+640
13	17+495	30	19+725
14	17+590	31	19+740
15	17+790	32	21+330
16	17+950	33	22+250
17	17+985	34	22+400

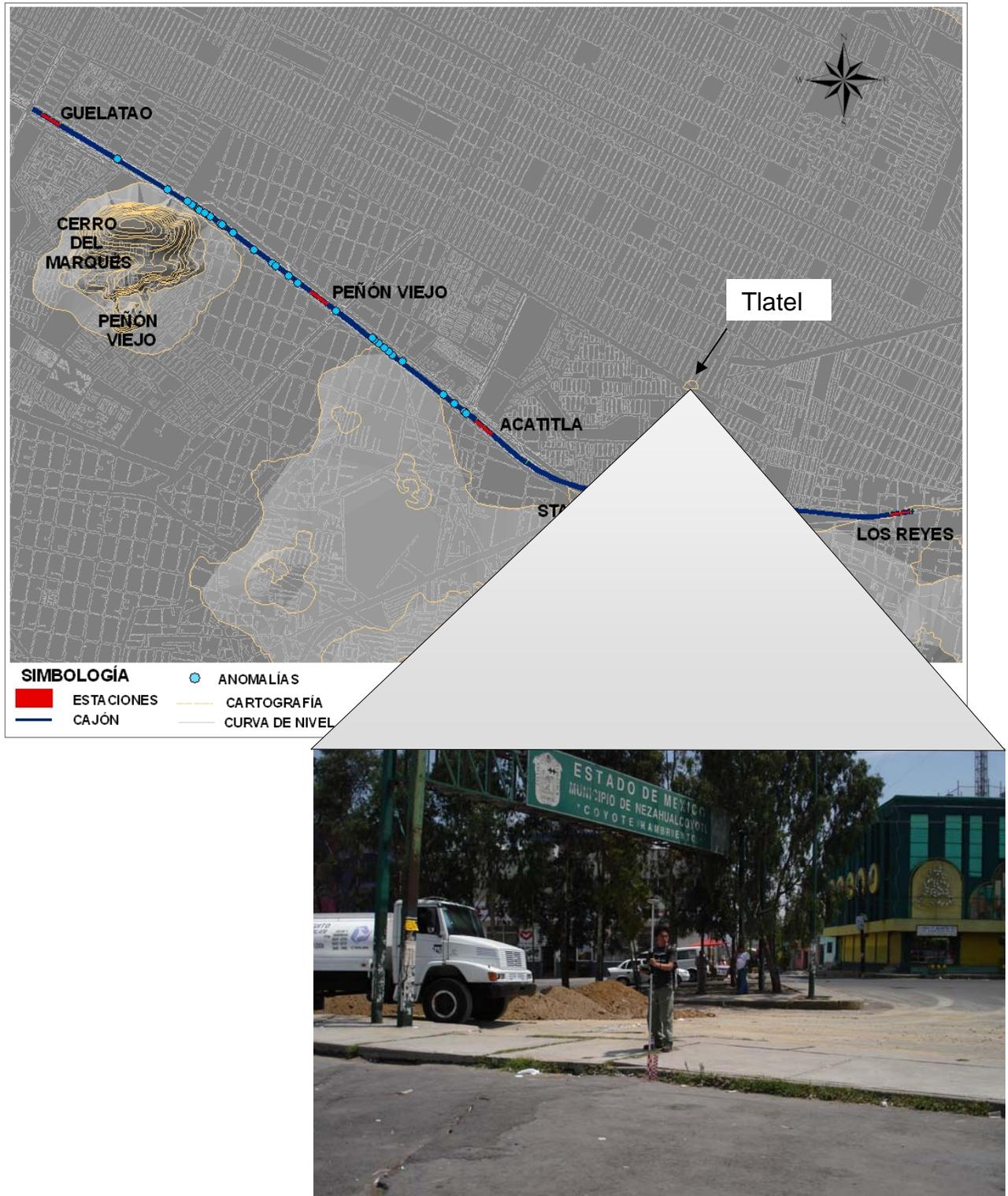


Figura II.41 Distribución espacial de deformaciones verticales de la superficie del terreno (curvas verticales) y anomalía geotécnica en la zona.

II.2.4.6 Inestabilidad de laderas

En México la inestabilidad de laderas es uno de los peligros naturales más destructivos, representa las mayores amenazas para la vida y los bienes materiales de la población. El deslizamiento masa de suelo ocurre cuando se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por acción de la gravedad, tales deslizamientos usualmente suceden en taludes escarpados, y muy raramente se presentan en laderas de poca pendiente, (CENAPRED, 2006). El estado de falla se alcanza cuando el esfuerzo cortante medio aplicado en la superficie potencial de deslizamiento, llega a ser igual a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo o roca. Es principalmente ocasionado por fuerzas gravitacionales, y resultan de una falla por corte a lo largo de la frontera de la masa en movimiento, respecto a la masa estable.

Los deslizamientos pueden ser desencadenados según las características intrínsecas y las debilidades inherentes en las rocas y en los suelos cuando se combinan con uno o más eventos desestabilizadores, tales como lluvias intensas, actividad sísmica, actividad volcánica y, en menor proporción en México, por el deshielo. Los deslizamientos pueden ocurrir como fallas de laderas de cerros, cañadas, barrancas y riberas de ríos, lagunas o vasos de presas; en cortes y terraplenes de carreteras, minas a cielo abierto y bancos de materiales; también suceden deslizamientos o fallas de talud en terraplenes para presas, bordos y otras obras, así como en excavaciones para la construcción.

El *cerro del Marqués* presenta una gran cantidad de laderas de alto riesgo, éste se encuentra colindando al norte con el pueblo de *San Lorenzo Xicotencatl* y los límites del Distrito Federal con el Estado de México; al sur y oriente con la *Unidad Habitacional Ejercito de Oriente* y al poniente con la *ENEP Zaragoza, Cabeza de Juárez* y la *Unidad Deportiva Francisco I. Madero*, tal como se puede apreciar en la Fig. II.42.

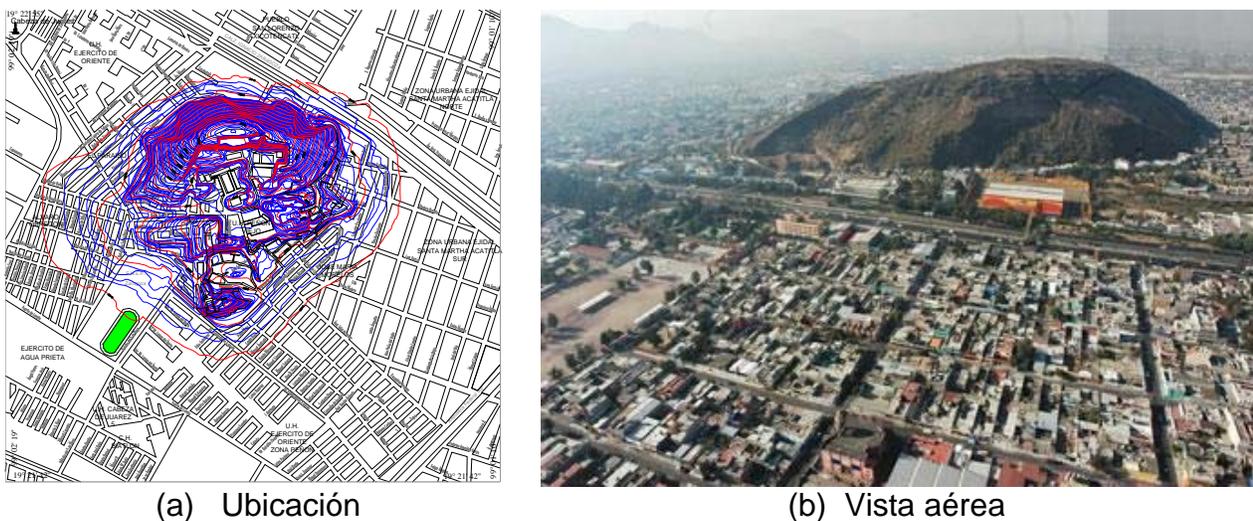


Figura II.42 *Cerro del Marqués*.

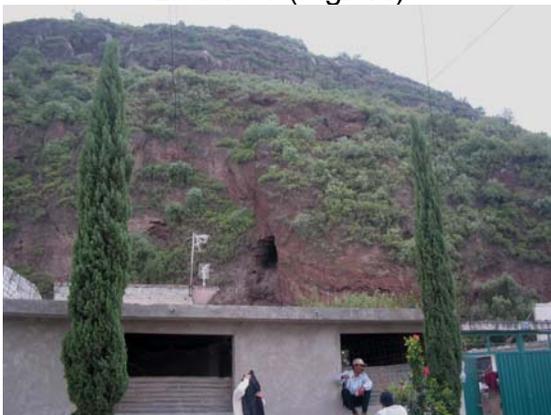
En la Fig. II.44 y II.45 muestran de forma tridimensional la estructura del *cerro del Marqués* vista al noreste y al sur respectivamente a partir de una restitución de curvas de nivel a cada dos metros. Por su naturaleza y características geológicas, se considera como zona inestable, y presenta peligro de desgajamiento de laderas, deslizamientos y agrietamiento, poniendo en riesgo a los habitantes del lugar. En el flanco norte del *cerro del Marqués* se definen seis sitios en donde se pueden presentar desprendimientos en las laderas, debido a la baja cohesión de los materiales presentes y la acción de los agentes de intemperismo y erosión, Fig. II.43.



Ladera 1 (Fig. 44)



Ladera 2 (Fig. 44)



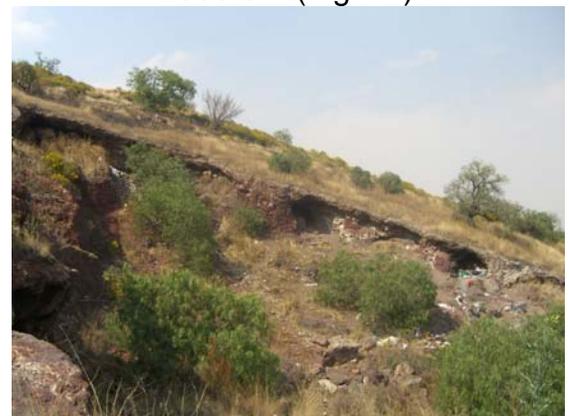
Ladera 3 (Fig. 44)



Ladera 4 (Fig. 44)



Ladera 5 (Fig. 44)



Ladera 6 (Fig. 44)

Figura II.43 Vistas de laderas susceptibles a deslizamiento en el *cerro del Marqués*.

En el flanco norte las laderas que presentan alta inestabilidad se presentan en la Fig. II.44 y su influencia con el trazo geométrico de la *Línea A*.

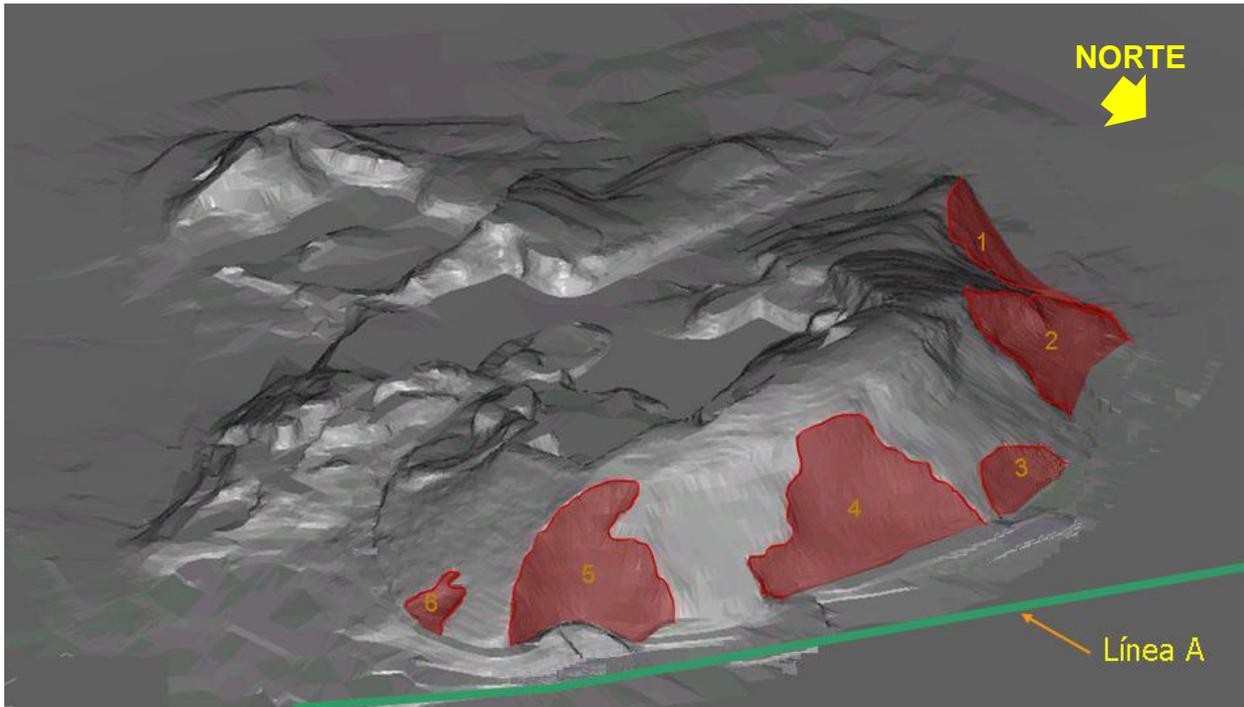


Figura II.44 Inestabilidad de laderas en el flanco norte del *cerro del Marqués*.

En el esquema tridimensional del flanco sur de la Fig. II.45 se identifican tres zonas consideradas de alto riesgo, las cuales se describen a continuación, Fig. II.46.

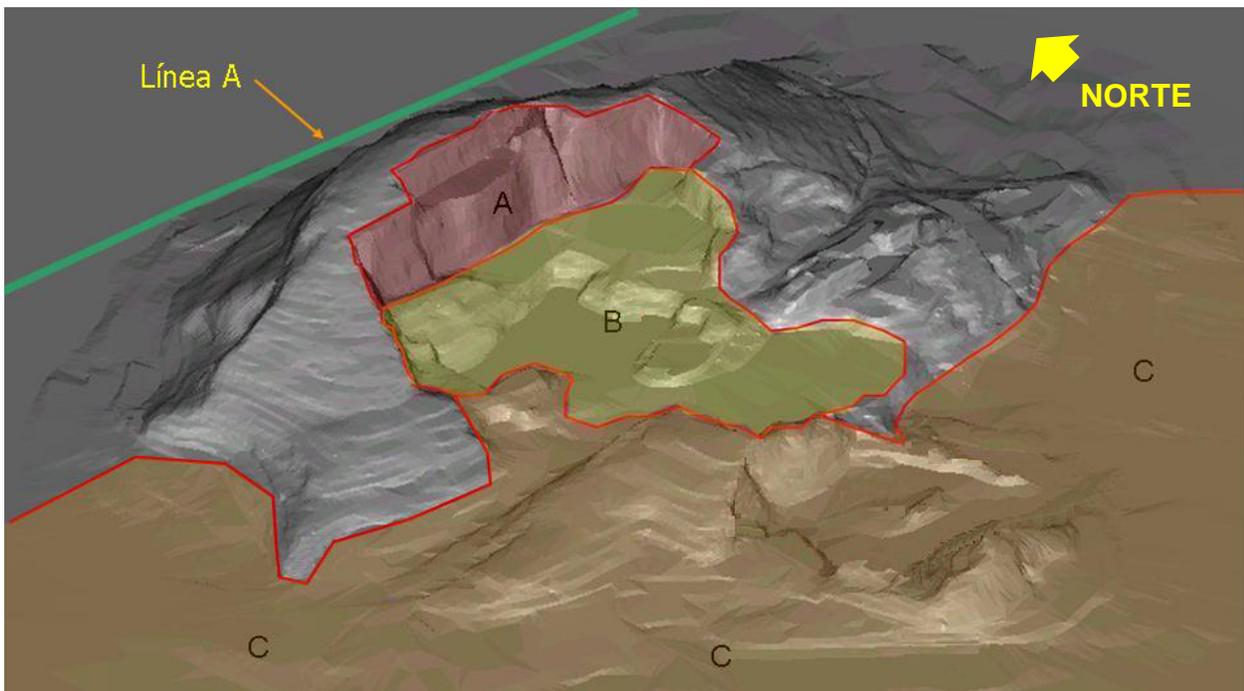
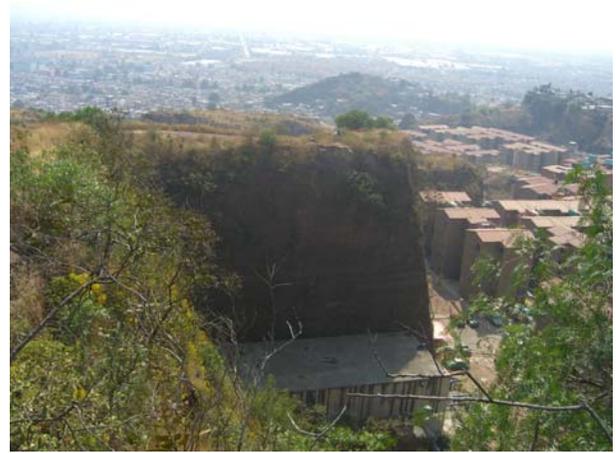


Figura II.45 Zonas de alto riesgo en el flanco sur del *cerro del Marqués*.



Zona A. Presenta desprendimientos en las paredes debido a que quedaron al descubierto la secuencia de piroclástos, afectando directamente las unidades habitacionales.



Zona B. Esta zona sería la principal afectada, el caso de deslizamientos en la zona A, además es zona de agrietamiento.



Zona C. Zona considerada de riesgo por inundación y agrietamiento, debido a que la explotación fue intensa sobrepasando el nivel base del terreno, afectando principalmente las construcciones, vialidades, instalaciones hidráulicas, guarniciones y banquetas.

Figura II.46 Zonas inestables en el *cerro del Marqués* y sus alrededores.

II.2.5 Geofísica

La investigación geofísica es definida como un método para deducir las condiciones del subsuelo a través de la observación de fenómenos físicos, bien sea naturales o artificiales, directa o indirectamente relacionados con la estructura geológica del subsuelo. Originalmente fue desarrollada como un método efectivo para la prospección del petróleo y otros depósitos de minerales. Después de la segunda guerra mundial se empezó a utilizar para estudiar terrenos montañosos (rocosos) para la construcción de represas y túneles. En la década 1970, se empezó a aplicar la geofísica para el estudio de suelos blandos, en el campo de la ingeniería, en áreas aluviales y depósitos sedimentarios. Actualmente es empleada para investigar además de los recursos minerales la estructura geológica superficial de los suelos y tiene aplicaciones específicas en el campo de la ingeniería civil.

Sobre la calzada *Ignacio Zaragoza y Generalísimo Morelos* el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Auvinet *et al.*, 2007), realizó más de trescientas mediciones puntuales de vibración ambiental (microtremores) a lo largo del tramo de estudio, Fig. II.47. Este método ha sido usado ampliamente para determinar los períodos dominantes del terreno en cuencas sedimentarias donde el contraste acústico entre la roca basal y los sedimentos es considerable. En la ciudad de México se ha aplicado ampliamente para realizar la microzonificación sísmica.

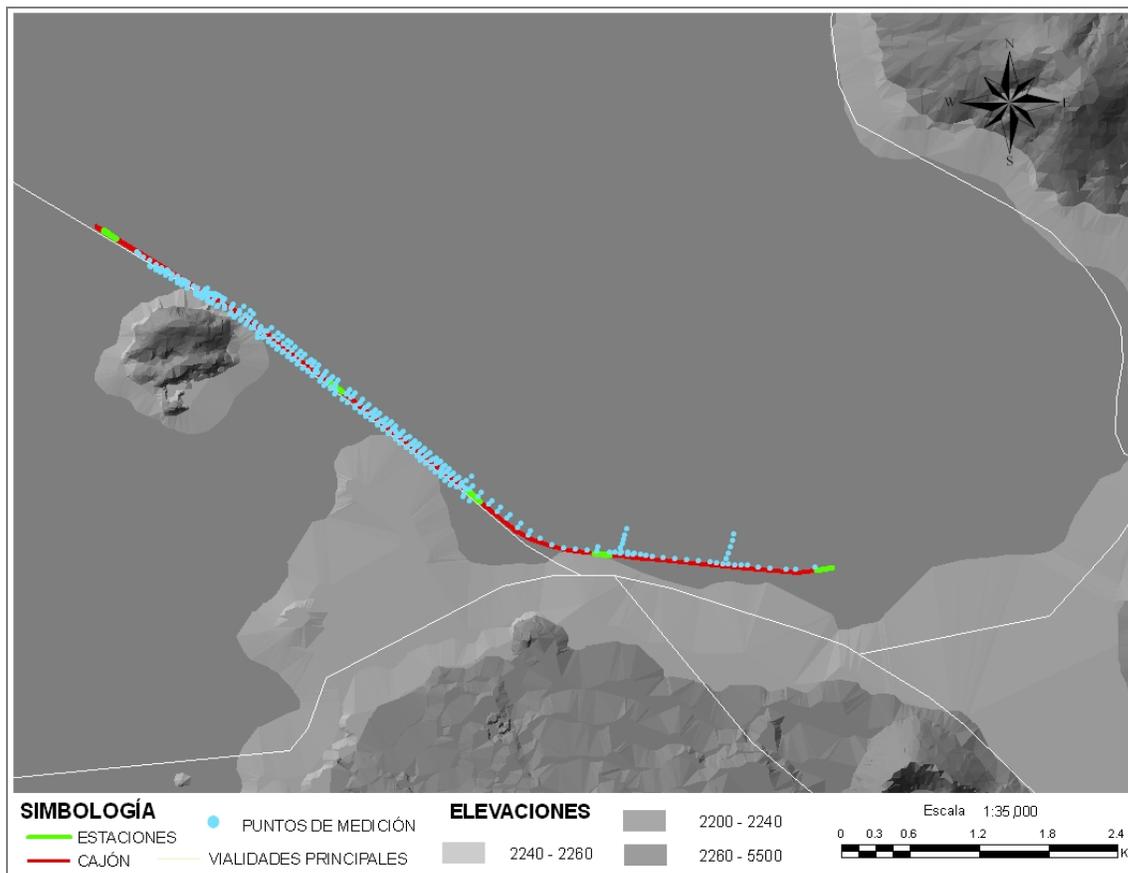


Figura II.47 Distribución espacial de las mediciones de ruido ambiental en el tramo de estudio.

Se usaron microtemblores, para estudiar las discontinuidades de la estructura del subsuelo, considerando que estos periodos se correlacionan claramente con la profundidad de los sedimentos, (Irikura y Kawanaka, 1980). Los microtemblores también se conocen como microtrémidos, microsismos, ruido sísmico de fondo, campo natural, vibración o ruido ambiental, oscilaciones omnipresentes o microtemblores y se definen vibraciones en la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía.

Para las mediciones de vibración ambiental en la superficie del suelo se utilizaron sensores de aceleración en tres componentes ortogonales (una vertical, norte-sur y este-oeste) a lo largo del tramo en estudio. Los equipos utilizados son registradores digitales K2 con sensores FBA2 internos. Tienen un rango dinámico de aproximadamente 114 dB y su escala completa es de 1G. Estas características permiten tener una alta resolución en las señales conservando la fidelidad e integridad de las mismas, que en el caso de vibración ambiental resulta importante. Los equipos fueron orientados, con la componente longitudinal en dirección Norte-Sur, y nivelados en cada punto. Estos equipos fueron programados para iniciar la grabación en forma manual mediante un botón de disparo.

En cada punto se hicieron tres disparos con ventanas de 3 minutos (180 segundos) de registro de ruido ambiental cada una. Las tres componentes fueron registradas a 100 muestras por segundo. Cada punto se marcó con una estaca de madera color amarillo con su identificación correspondiente, o bien, con pintura amarilla o roja en caso de estar ubicado sobre concreto. Cada punto fue ubicado usando un GPS serie 1200.

El análisis de los datos se realiza con base en la técnica de cocientes espectrales H/V (horizontal entre vertical) propuesta por Nakamura en 1989. Esta técnica es adecuada para la determinación de frecuencias naturales, ya sea en terreno libre o en estructuras, es una técnica muy confiable para el análisis de registros de vibración ambiental y consiste en: Transformar los datos de la memoria K2 de la estación de trabajo a formatos adecuados por los programas de análisis, se seleccionan ventanas con 20s de duración, cada una a partir de 3 minutos, registradas en campo. Se calcula su transformada de Fourier y el espectro de amplitud resultante se suaviza. Para continuar se calculan los cocientes espectrales L/V y T/V. Finalmente se obtienen tres promedios de cocientes H/V por cada punto y para cada canal horizontal registrado en campo.

Las primeras mediciones a lo largo del tramo considerado, se midieron a cada 100m hasta el cerro del Marqués, a partir de ahí se midieron a cada 50m, en tres líneas paralelas:

- a) Junto al cajón del metro de la estación *Guelatao* al *cerro del Marqués*, Fig. II.48;
- b) Del *cerro del Marqués* hasta la estación *Acatitla*, en el camellón que divide los carriles de alta velocidad y la lateral de la calzada *I. Zaragoza*, Fig. II.49;
- c) De *Acatitla* -*Santa Marta*, Fig. II.50 y;
- d) De *Santa Marta* - *Los Reyes*, Fig. II.51.

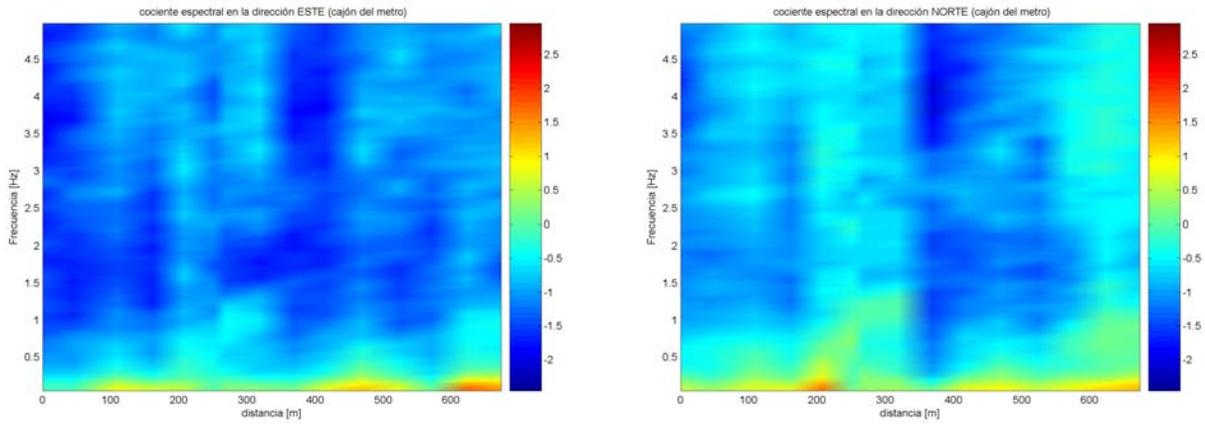


Figura II.48 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE en el cajón (estación *Guelatao* al *cerro del Marqués*).

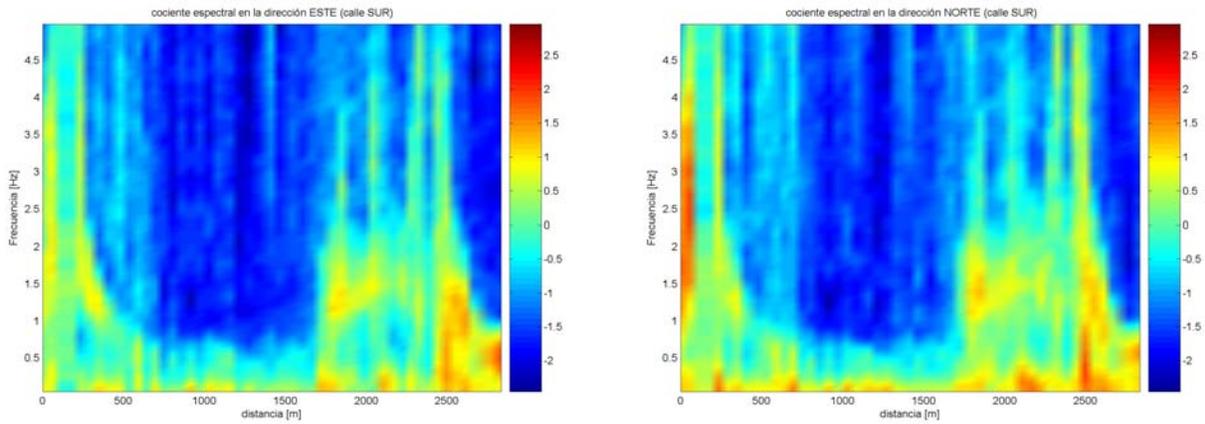


Figura II.49 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE lado sur (*cerro del marqués* a la estación *Acatitla*).

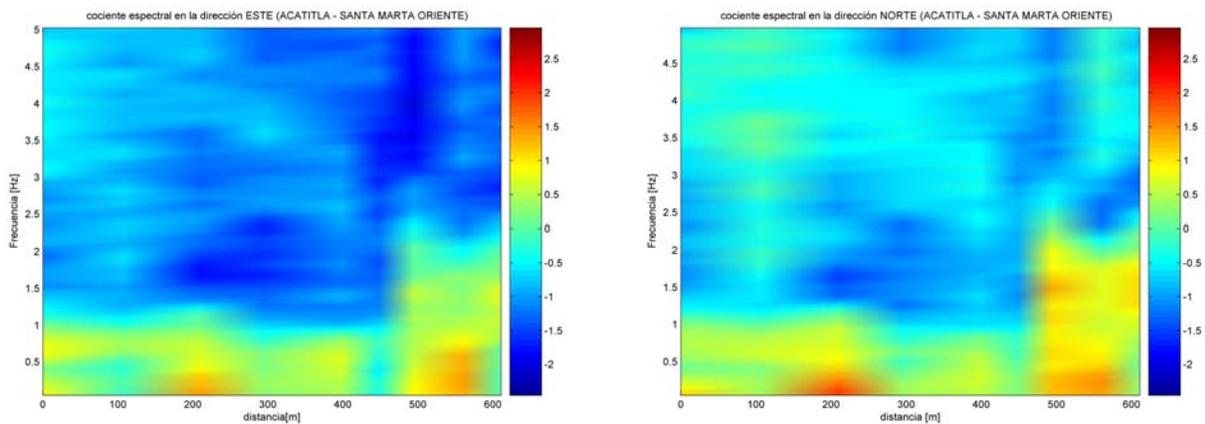


Figura II.50 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE (*Acatitla –Santa Marta*).

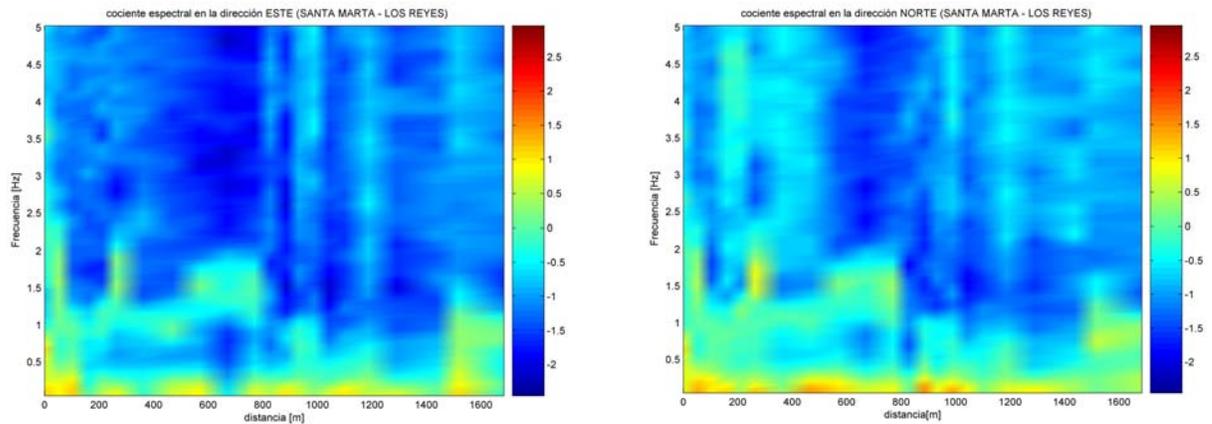


Figura II.51 Coeficientes espectrales en la dirección ESTE y NORTE lado norte (Santa Marta – Los Reyes).

II.2.6 Instalaciones hidráulicas

Al integrar y superponer diferentes capas de información, como son: el cajón, la red de drenaje profundo y la red primaria de agua potable, se identificó un traslape de la red de drenaje profundo con el trazo del tramo en estudio de la *Línea A*, sobre la lateral de la calzada *Ignacio Zaragoza* con dirección a Puebla, a partir del km 15+940 (estación *Guelatao*) hasta el km 16+620, donde cambia de dirección hacia el norte, cruza la calzada *Ignacio Zaragoza* por la calle de *Balvanera* con un diámetro de 5m a una profundidad de 14m, el eje del túnel, continua hasta la Av. Texcoco y después hacia el oriente para terminar en la Laguna de Regulación “*El Salado*”, con un diámetro de 3.10m, Fig. II.52.

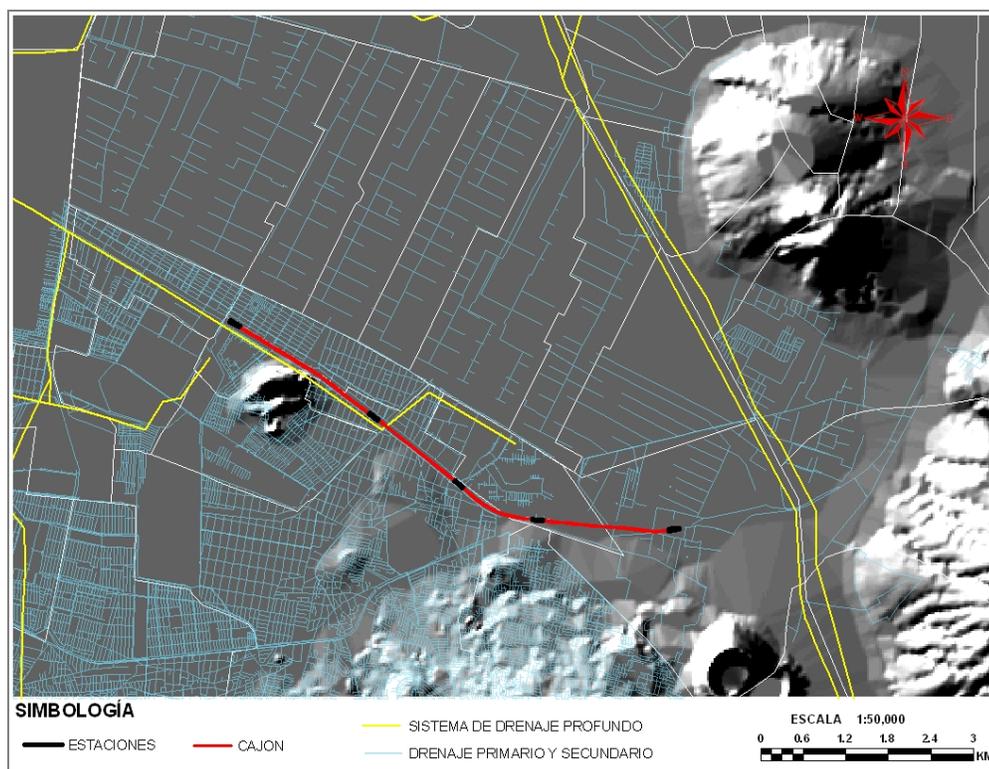


Figura II.52 Instalaciones Hidráulicas en el área de estudio.

Este traslape del drenaje profundo con el trazo de la *Línea A* del metro podría tener implicaciones si se instalan inclusiones. Otro aspecto, se refiere a la probable socavación en el cajón del metro inducida por fugas en la red primaria de agua potable (instalaciones municipales).

II.3 Sistema de información geográfico

Actualmente, se cuenta con novedosas herramientas de análisis espacial, basadas en el uso de la tecnología digital, que presentan un gran potencial para capturar, almacenar, manejar, procesar y recuperar eficientemente grandes volúmenes de información. Estas herramientas quedan inscritas en el contexto general de la Geoinformática, la cual surge de la combinación de diversas ciencias y técnicas tales como la Geografía, el Análisis Espacial, la Cartografía y la Informática. Apoyándose en la Geoinformática, se han desarrollado en particular tres tecnologías importantes, (Méndez, 2005):

La primera se refiere al desarrollo de bancos de datos de naturaleza espacial que permiten integrar y manejar información relacionada con entidades geográficas de un territorio dado. Estos bancos se denominan Sistemas de Información Geográfica o SIG's. Los SIG's están orientados a la administración de grandes volúmenes de información con carácter espacial, referenciada geográficamente bajo un sistema de coordenadas proveniente de una proyección, ayudan a resolver los diversos problemas que se presentan en la integración y manejo de variables de carácter geográfico, tanto cualitativas como cuantitativas, y para la representación gráfica de los fenómenos físicos y sociales involucrados.

La segunda se refiere a la información geográfica generada con la toma de imágenes de satélites artificiales y de radar (Teledetección o Percepción Remota) por medio de sensores que se montan en aeronaves o satélites artificiales. Presenta la ventaja de mostrar, resaltar y relacionar los rasgos generales del terreno con todos sus detalles para poner de manifiesto información de interés respecto a los temas de: Geotecnia, Geología, Geomorfología, etc.

La tercera y última, se refiere a los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS); ésta tecnología proporciona la localización geográfica puntual por medio de la captación de señales satelitales y se emplea para conocer la posición de objetos como grietas, fallas, sitios en tierra. Facilita la determinación en tiempo real de coordenadas y distancias en los trabajos de campo de un geotecnista, un geólogo, etc.

En forma general, un SIG relaciona datos espaciales y de atributo para el soporte de visualización de mapas, con el propósito de permitir la consulta, actualización y análisis de la información incorporada en el sistema, tanto de las características geográficas de un sitio, las del medio natural (roca, suelo, topografía, hidrografía, geología, etc.) como las que han sido modificadas por el hombre (redes de agua potable y alcantarillado, líneas de transmisión etc.), pueden ser ordenadas o clasificadas de acuerdo con el tipo de información que interese analizar.

Estas características geográficas están asociadas a un marco de referencia geográfico universal y pueden ser representadas mediante elementos geométricos (puntos, líneas o áreas diferenciados por colores, símbolos o anotaciones, explicadas por leyendas o textos descriptivos) dando origen a mapas simplificados.

Por lo anterior, un Sistema de Información Geográfica puede definirse en forma simplificada como un sistema computacional que consiste en una base de datos que almacena información espacial y descriptiva así como un manejo ágil, eficiente y rápido de grandes volúmenes de datos que son necesarios para el estudio de un sitio de interés.

La utilidad de los Sistemas de Información Geográfica reside en que permiten la captura, almacenamiento, mantenimiento, análisis y presentación de la información necesaria para el diseño de obras de ingeniería. Las imágenes presentadas en éste trabajo fueron elaboradas con la base de datos e infraestructura del Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM, estas nuevas técnicas muestran la gran utilidad para el estudio y análisis encaminado a definir la caracterización del subsuelo de la zona.

CAPÍTULO III

MODELO ESTRATIGRÁFICO DEL SUBSUELO

Con el propósito de conocer la estratigrafía del subsuelo en la zona de estudio, se elaboró un modelo estratigráfico con base en la información geotécnica proveniente del proyecto original de la compañía Colinas de Buen en 1987, de estudios previos realizados por las compañías Integración de Procesos de Ingeniería, S.A de C.V. (IPISA, 2002) y LAC Mecánica de Suelos y Cimentaciones S.A. de C.V. (LAC, 2005), así como, de los sondeos contenidos en la base de datos del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG (Laboratorio de Geoinformática, Instituto de Ingeniería, UNAM).

Asimismo, se empleó la Geoestadística como herramienta para construir modelos que describen la distribución espacial de las propiedades del subsuelo, particularmente se analiza el contenido de agua y la resistencia de punta de cono eléctrico.

III.1 Información geotécnica disponible

Para la elaboración del modelo geotécnico de la zona de interés, se revisó cuidadosamente la información geotécnica disponible, la cual se incorporó a la base de datos del Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, SIG-SG. La cantidad de sondeos empleados para la elaboración del modelo se presenta en la Tabla III.1.

Tabla III.1 Tabla de sondeos.

Tipo sondeo	SIG-SG	Proyecto original (1987)	IPISA (2002)	LAC (2005)	Total
Pozo a cielo abierto (PCA)	4	10	9	16	39
Sondeo Mixto (SM)	24	6	6	9	45
Sondeo de penetración Estándar (SPT)	16	----	----	----	16
Sondeo con Cono Eléctrico (CPT)	44	12	5	4	65
Sondeo con Cono Dinámico	16	---	----	----	16
Sondeo con Piezocono (SPz)	----	----	----	4	4
Sondeo de Avance	----	----	12	----	12
Total	104	28	32	33	197

III.2 Estratigrafía del subsuelo a lo largo del eje en estudio

Con el propósito de conocer con detalle la estratigrafía del subsuelo en el tramo entre las estaciones *Guelatao* y *Los Reyes* se elaboró un corte geotécnico identificando los estratos típicos del subsuelo con base en la información geotécnica existente.

III.2.1 Información geotécnica considerada

Los sondeos geotécnicos que han sido considerados para la elaboración de este corte se indican en la Tabla III.2. Del 1 al 24 son sondeos proporcionados por el Sistema de Transporte Colectivo (STC), del 25 al 41 son sondeos existentes en el Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos (SIG-SG, Instituto de Ingeniería, UNAM). En total se cuenta con 49 sondeos de tipo cono eléctrico (CPT), penetración estándar (SPT) y mixtos. En la Fig. III.1 se presenta la ubicación y distribución en planta de los sondeos.

En general, la información disponible tiene las siguientes limitaciones:

1. La mayoría de los sondeos no cuentan con datos de elevación del brocal.
2. La mayoría de los sondeos tienen más de 20 años de antigüedad.
3. La mayoría de los sondeos son cortos.
4. En algunos tramos los sondeos se han realizado en distancias muy cortas, mientras que otros no han sido explorados.

Lo anterior impide conocer y caracterizar con precisión el subsuelo a lo largo del eje de estudio.

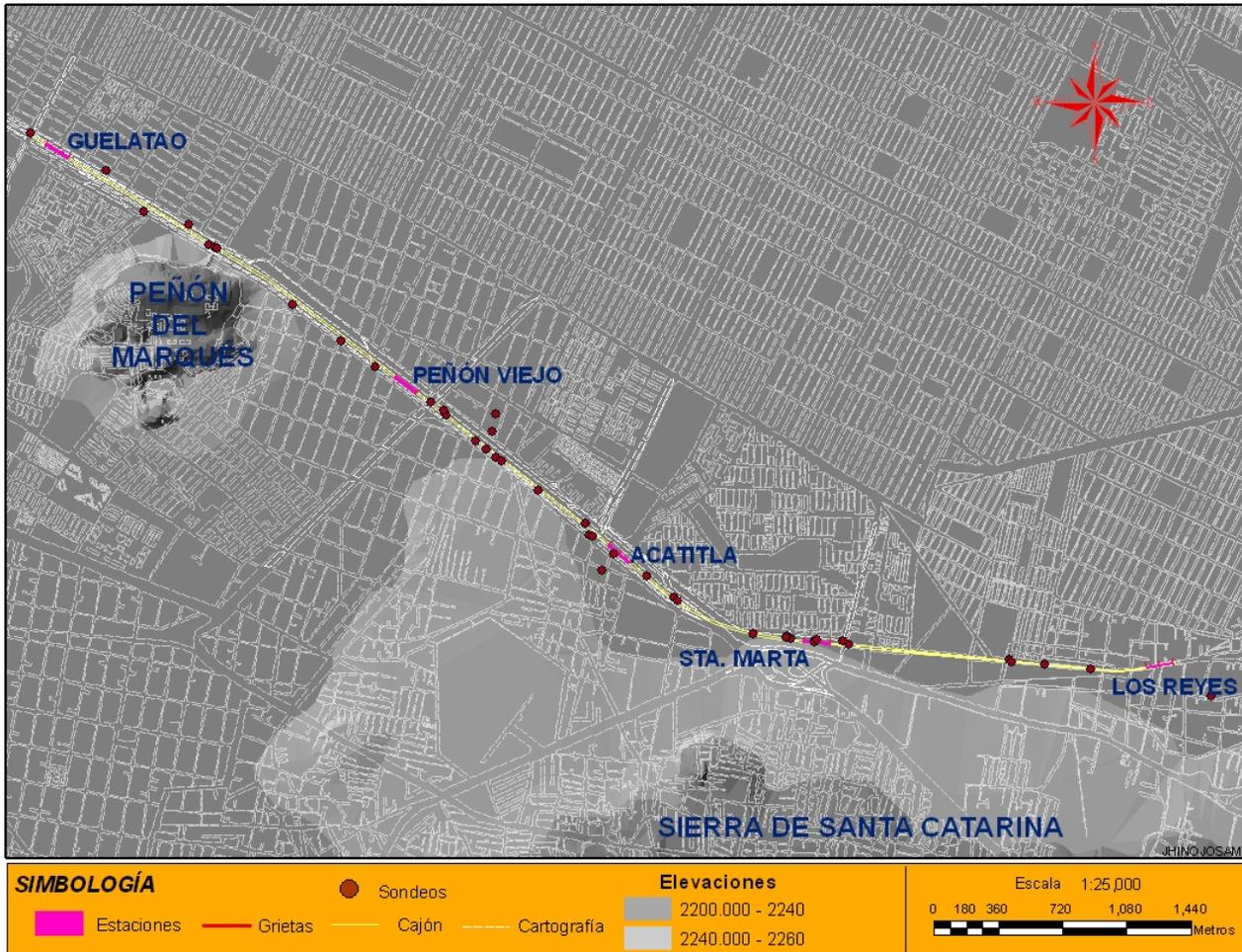


Figura III.1 Ubicación de los sondeos.

En la Tabla III.2, se emplea la siguiente nomenclatura:

- CPT : Sondeo de Cono Eléctrico
- SPT : Sondeo de Penetración Estándar
- MIXTO : Sondeo mixto, con valores de contenido de agua y número de golpes.
- CB : Colinas de buen
- IE : Ingeniería Experimental S.A. de C.V
- CYPOYS : Control y Promoción de Obras y Servicios S.A. de C.V
- IPISA : Integración de Procesos de Ingeniería, S.A de C.V.
- LAC : LAC Mecánica de Suelos y Cimentaciones S.A. de C.V.

Tabla III.2 Datos de sondeos geotécnicos.

CLAVE	SONDEO	EMPRESA	TIPO	COOR_X (m)	COOR_Y (m)	PROF. (m)	AÑO
1	IPISA-01	IPISA	SM	497114.75	2142911.78	35.35	2002
2	LAC-01	LAC	SM	497148.12	2142899.23	40.0	2005
3	LAC-02	LAC	SM	497582.57	2142576.54	51.7	2005
4	LAC-03	LAC	SM	497854.09	2142368.59	95.0	2005
5	IPISA-02	IPISA	SM	498609.04	2141808.63	30.0	2002
6	LAC-04	LAC	SM	498671.64	2141758.83	54.2	2005
7	LAC-05	LAC	SM	498725.11	2141716.30	86.0	2005
8	LAC-06	LAC	SM	498961.10	2141528.65	64.3	2005
9	LAC-07	LAC	SM	499246.17	2141276.96	40.0	2005
10	IPISA-03	IPISA	SM	500378.71	2140695.51	44.0	2002
11	LAC-08	LAC	SM	500703.81	2140660.64	26.0	2005
12	LAC-09	LAC	SM	501601.61	2140574.76	60.0	2005
13	IPISA-04	IPISA	SM	501615.54	2140564.18	40.6	2002
14	IPISA-05	IPISA	SM	501800.89	2140547.09	40.3	2002
15	IPISA -06	IPISA	SM	502059.66	2140521.75	40.6	2002
16	LAC -01	LAC	CPT	497160.53	2142890.40	40.0	2005
17	LAC -02	LAC	CPT	498045.36	2142223.26	40.0	2005
18	LAC -03	LAC	CPT	498441.96	2141950.66	40.0	2005
19	IPISA-01	IPISA	CPT	498752.38	2141693.65	21.0	2002
20	IPISA-02	IPISA	CPT	499723.64	2140928.23	31.0	2005
21	LAC-04	LAC	CPT	500668.71	2140681.15	40.0	2005
22	IPISA-03	IPISA	CPT	501614.21	2140563.95	43.0	2002
23	IPISA -04	IPISA	CPT	501800.89	2140546.54	40.0	2002
24	IPISA -05	IPISA	CPT	502059.64	2140521.60	38.0	2002
25	2828	TGC	CPT	496112.82	2143540.66	55.0	1986
26	2534	TGC	CPT	499227.82	2141340.65	32.0	1986
27	2697	TGC	CPT	495834.82	2143628.66	31.0	-----
28	378	ACI	CPT	499315.82	2141079.65	40.8	1996
29	3980	TGC	CPT	498724.82	2141955.65	63.0	1994
30	3981	TGC	CPT	498701.82	2141860.65	50.0	1994
31	3994	TGC	CPT	496536.82	2143328.65	61.0	1994
32	4285	IE	SPT	502733.83	2140367.65	14.2	1992
33	5796	IE	SPT	496751.82	2143098.65	60.0	1979
34	5799	IE	SPT	498428.82	2141976.65	55.20	1979
35	5802	IE	SPT	500511.82	2140678.64	55.2	1979
36	5870	IE	SPT	495214.81	2144035.65	72.6	1979
37	5871	IE	SPT	495247.81	2144087.65	72.6	1979
38	6361	IE	SM	497003.81	2143022.65	36.0	1971
39	6469	IE	SPT	498355.82	2142026.65	52.2	1979
40	6470	CYPOYS	SM	499263.82	2141271.65	45.6	1979
41	6475	CYPOYS	SPT	500356.82	2140708.64	55.2	1979
42	SM6_P_O	CB	SM	499383.88	2141172.99	55.0	1987
43	SM7_P_O	CB	SM	499741.04	2140903.69	55.0	1987
44	SM15_P_O	CB	SM	500507.29	2140675.72	45.0	1987
45	SC20_P_O	CB	CPT	500165.76	2140722.34	50.0	1987
46	SC21_P_O	CB	CPT	499744.08	2140903.16	63.0	1987
47	SC22_P_O	CB	CPT	500347.56	2140699.42	40.0	1987
48	SC23_P_O	CB	CPT	500526.14	2140684.97	23.0	1987
49	SC24_P_O	CB	CPT	499569.48	2141046.83	50.0	1987
40	6470	CYPOYS	SM	499263.82	2141271.65	45.6	1979
41	6475	CYPOYS	SPT	500356.82	2140708.64	55.2	1979
42	SM6_P_O	CB	SM	499383.88	2141172.99	55.0	1987
43	SM7_P_O	CB	SM	499741.04	2140903.69	55.0	1987
44	SM15_P_O	CB	SM	500507.29	2140675.72	45.0	1987
45	SC20_P_O	CB	CPT	500165.76	2140722.34	50.0	1987
46	SC21_P_O	CB	CPT	499744.08	2140903.16	63.0	1987
47	SC22_P_O	CB	CPT	500347.56	2140699.42	40.0	1987
48	SC23_P_O	CB	CPT	500526.14	2140684.97	23.0	1987
49	SC24_P_O	CB	CPT	499569.48	2141046.83	50.0	1987

III.2.2 Corte estratigráfico

Para construir el modelo estratigráfico del subsuelo a lo largo del eje de la *Línea A* del tramo en estudio, se consideró conveniente incluir únicamente los sondeos más cercanos, es decir, a una distancia máxima de 100m en sentido perpendicular al eje de la vía, sin considerar la antigüedad de ejecución.

La integración de los sondeos para la construcción del modelo estratigráfico se realizó ajustando las imágenes de cada uno de los sondeos de acuerdo con las escalas horizontal y vertical previamente definidas, en este caso particular, se consideró conveniente aumentar 10 veces la escala vertical con respecto a la horizontal. Una vez incorporadas las imágenes de los sondeos se procedió a identificar cada uno de los estratos típicos del subsuelo (costra superficial, formación arcillosa superior y capa dura). En las Fig. III.2 a III.5 se presentan los cortes por tramos entre estaciones, en el mismo corte se indica la ubicación de las estaciones, las juntas de construcción, las juntas de expansión y los cadenamientos referidos al trazo geométrico de la *Línea A*.

Es importante señalar que para la elaboración del corte al no contar con información de la elevación del brocal, los sondeos se ubicaron con base en la configuración topográfica de la subrasante del cajón del metro, por tener una configuración parecida a la superficie del terreno, lo cual puede generar puntualmente algunos cambios significativos en la continuidad de los estratos típicos.

III.2.3 Condiciones y propiedades del subsuelo

A continuación se presenta una descripción general de la estratigrafía superficial a lo largo del tramo en estudio.

Estratigrafía del tramo Guelatao – Peñón Viejo (Fig. III.2)

Costra Superficial (CS). Desde la superficie del terreno hasta 2.0m de profundidad, se encuentra el relleno superficial constituido por limos arenosos (tepetate) de color café y con un 20% de contenido natural de agua. Entre 2.0m y 4.6m de profundidad, se encuentra un estrato de arena fina, arcillosa compacta con un contenido de agua de 40%. Entre los cadenamientos de 16+800 al 17+500 el espesor de este estrato se reduce por la presencia del *cerro del Marqués* y continúa hasta la estación *Peñón Viejo*.

Formación Arcillosa Superior (FAS). Del cadenamiento 15+620 al 16+800, de la profundidad de 4.6m y hasta 65m, se ubica un estrato de arcillas con una consistencia de blanda a muy blanda, de colores verde olivo, café oscuro, gris olivo, café rojo, intercalada por lentes de arena fina, gris y vidrio volcánico, con un contenido de agua que varía entre 100% y 370%; a la profundidad de 12m se presenta un lente de arena de 3m de espesor. En el cadenamiento donde interactúa con el *cerro del Marqués*, el espesor del estrato de arcilla se reduce hasta 33.4m y del 17+500 hasta la estación *Peñón Viejo* aumenta hasta 79.5m.

Capa Dura (CD). Del 15+620 al 16+800, se infiere por columna litográfica de pozos de agua que la capa dura se encuentra a los 80m con un espesor de 3 o 4m. Del 16+800 al 17+500, de 33.4m a 35.5m se encontró un limo-arenoso, color gris, con un porcentaje de finos de 35%, un porcentaje de arena del orden de 37% a 48% y un contenido de grava de 38%. Del 17+500 hasta 18+500 a una profundidad de 80m se encuentra una formación limo-arenosa de 8 a 10m de espesor.

Formación Arcillosa Inferior (FAI). Del 17+500 hasta 18+500 a una profundidad de 90m se encuentra una formación arcillosa, de la cual se desconoce el espesor al no encontrarse los depósitos profundos.

Estratigrafía del tramo Peñón Viejo – Acatitla (Fig. III.3)

Costra Superficial (CS). Desde la superficie del terreno hasta una profundidad aproximada de 4.0m se encontró el relleno superficial constituido por limos-arenosos (tepetate) de color café y un contenido natural de agua entre 20% y 40%.

Formación Arcillosa Superior (FAS). De 4m hasta 22m se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda a media, colores verde olivo, café oscuro, café rojo, con lentes de arena fina, vidrio volcánico con microfósiles. El contenido natural de agua varía entre 15% y 230%.

Capa Dura (CD). Entre 22m y 61.3m se encontró limo-arcilloso duro, color café y gris, con un contenido de agua entre 20% y 80%. De 61.3m hasta una profundidad de 86.4m una formación limo-arenosa, a partir de los de 86.4m, se detectó roca basáltica.

Estratigrafía del tramo Acatitla – Santa Marta (Fig. III.4)

Costra Superficial (CS). Desde la superficie del terreno hasta una profundidad aproximada de 5m se encontró el relleno superficial constituido por limos arenosos (tepetate) de color café.

Formación Arcillosa Superior (FAS). De 5 hasta 15m de profundidad se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda, colores café olivo, amarillo olivo y verde, con lentes de arena fina negra y alto contenido de microfósiles. El contenido natural de agua varía entre 10% y 350%. Entre 15m y 18m de profundidad se ubica un estrato de arena fina, arcillosa, café oscuro y negra, muy compacta, con un contenido de agua entre 15% y 140%. De 18m hasta la profundidad de 55m se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda a media, colores verde olivo, gris y gris olivo, con lentes de arena fina, vidrio volcánico y alto contenido de microfósiles. El contenido de agua varía de 40% hasta 350%.

Capa Dura (CD). A la profundidad de 55m, se encontró una formación limo-arenosa, como capa dura.

Estratigrafía del tramo Santa Marta – Los Reyes (Fig. III.5)

Costra Superficial (CS). Del cadenamamiento 21+300 al 22+600 desde la superficie del terreno hasta una profundidad aproximada de 3m se encontró el relleno superficial constituido por limos arenosos (tepetate) de color café. De 3 a 5m se encontró una formación de arcilla arenosa con grava de tezontle, color café–amarillo, con un contenido de agua que varía de 20% a 160%. A partir del cadenamamiento 22+600 a 22+980 la costra superficial aumenta a 5.5m, con un contenido de agua que varía de 35% a 100%.

Formación Arcillosa Superior (FAS). Del 21+300 a 22+260 de 5m hasta 30m de profundidad se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda a blanda, colores verde olivo, café oscuro y gris olivo, con lentes de arena fina y alto contenido de microfósiles. El contenido natural de agua varía entre 10% hasta 350%, con un promedio general de 200%.

Del 22+260 a 22+600 de 5m hasta 12.5m de profundidad se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda, color café – rojo, verde olivo y gris, con poca arena fina y microfósiles. El contenido de agua varía entre 30% hasta 535%, con un promedio general de 225%. De 12.5m a 14.6m se encontró una lente de arena fina, arcillosa, muy compacta, con un contenido de agua de 20%. A partir de la profundidad de 14.6m y hasta a 40.6m, se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda color café–rojo, gris olivo, con lentes de arena fina, vidrio volcánico y alto contenido de microfósiles. El contenido de agua varía de 20% hasta 340%, siendo el promedio general del orden de 200%.

Del cadenamamiento 22+600 a 22+980 a partir de la profundidad de 5.5m y hasta 40.3m se encontró un estrato de arcilla de consistencia muy blanda a blanda, color, café–rojo, gris olivo y verde olivo, con lentes de arena fina, vidrio volcánico y alto contenido de microfósiles. El contenido de agua varía entre 10% hasta 350%, con un promedio general de 200%.

Capa Dura (CD). Del cadenamamiento 21+300 a 22+260 de 30m y hasta a 40.6m, se encontró un estrato de arena fina, de color café-gris de compacidad media a muy compacta, poco arcillosa, con lentes de vidrio volcánico. El contenido de agua varía de 10% hasta 50%, siendo el promedio general del orden de 25%.

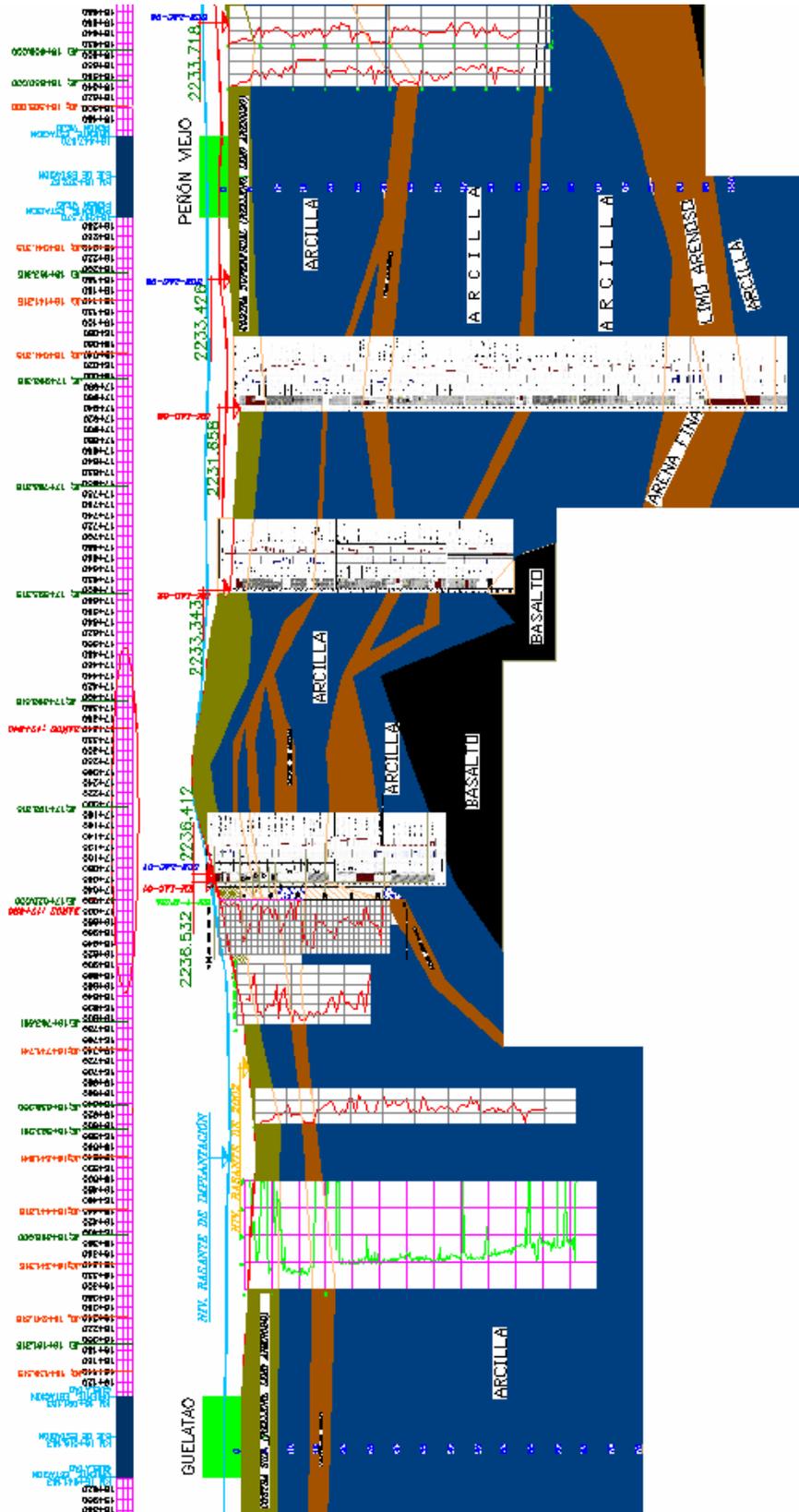


Figura III.2 Corte estratigráfico Guelatao–Peñon Viejo.

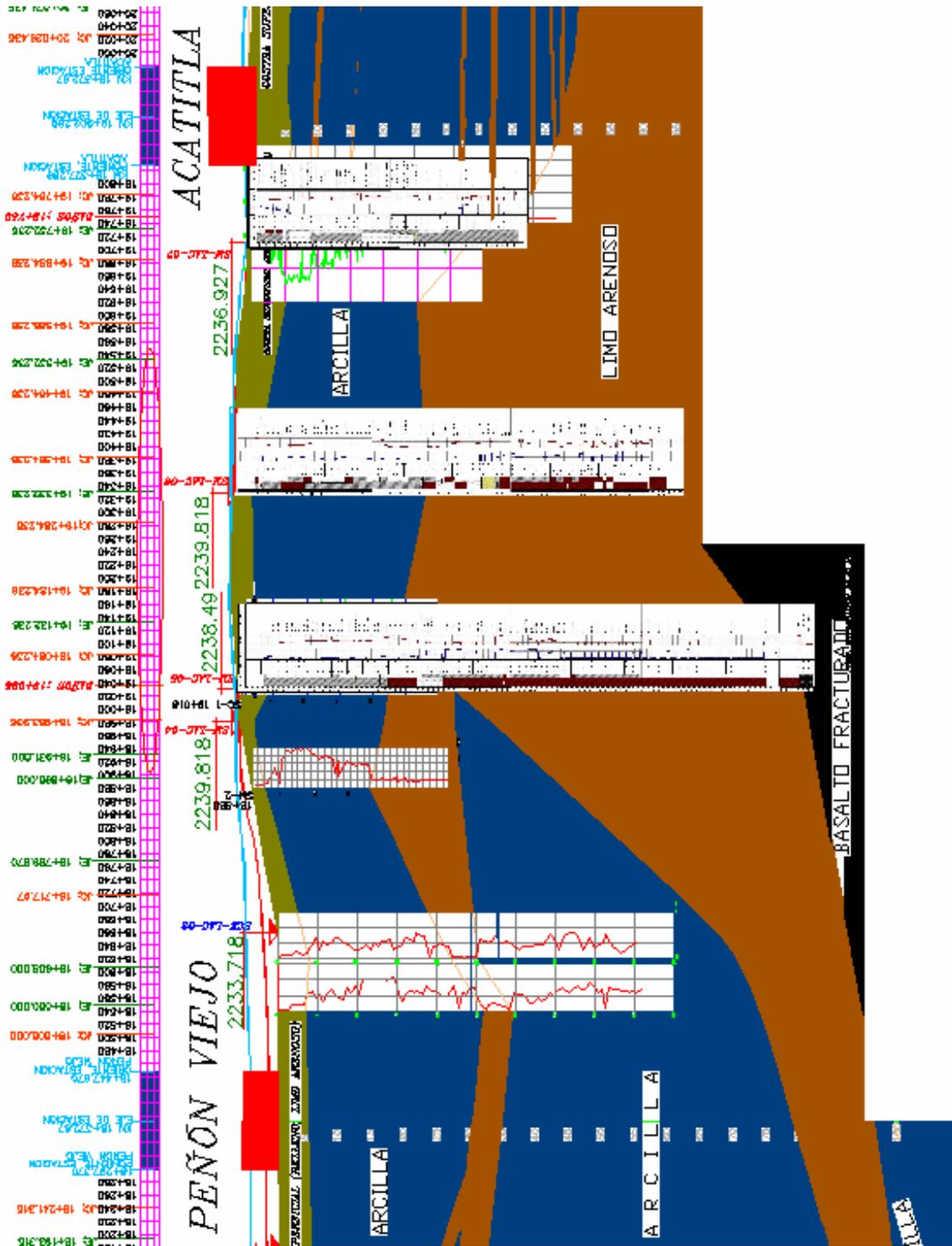


Figura III.3 Corte estratigráfico Peñón Viejo – Acatitla.

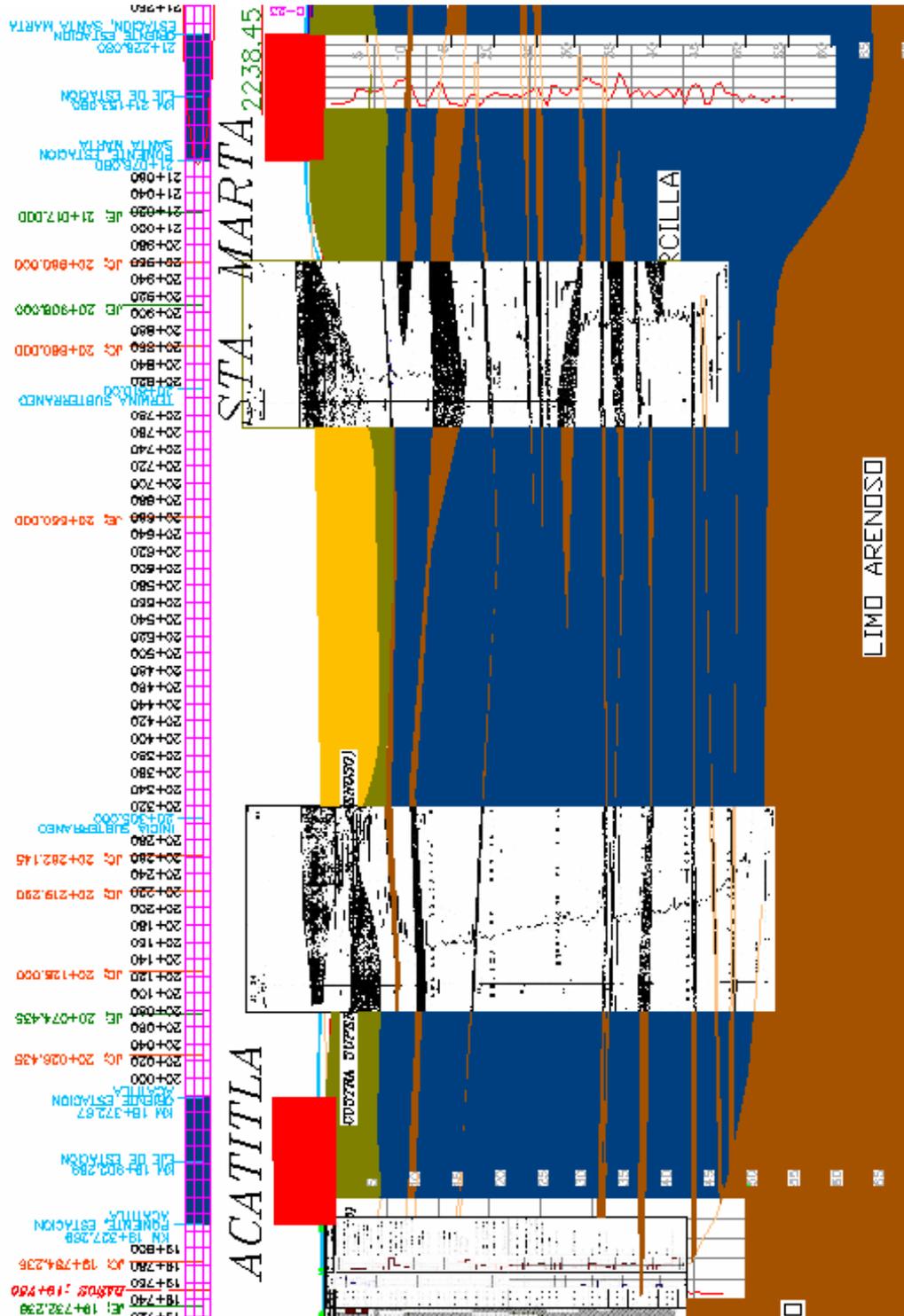


Figura III.4 Corte estratigráfico Acatitla – Santa Marta.

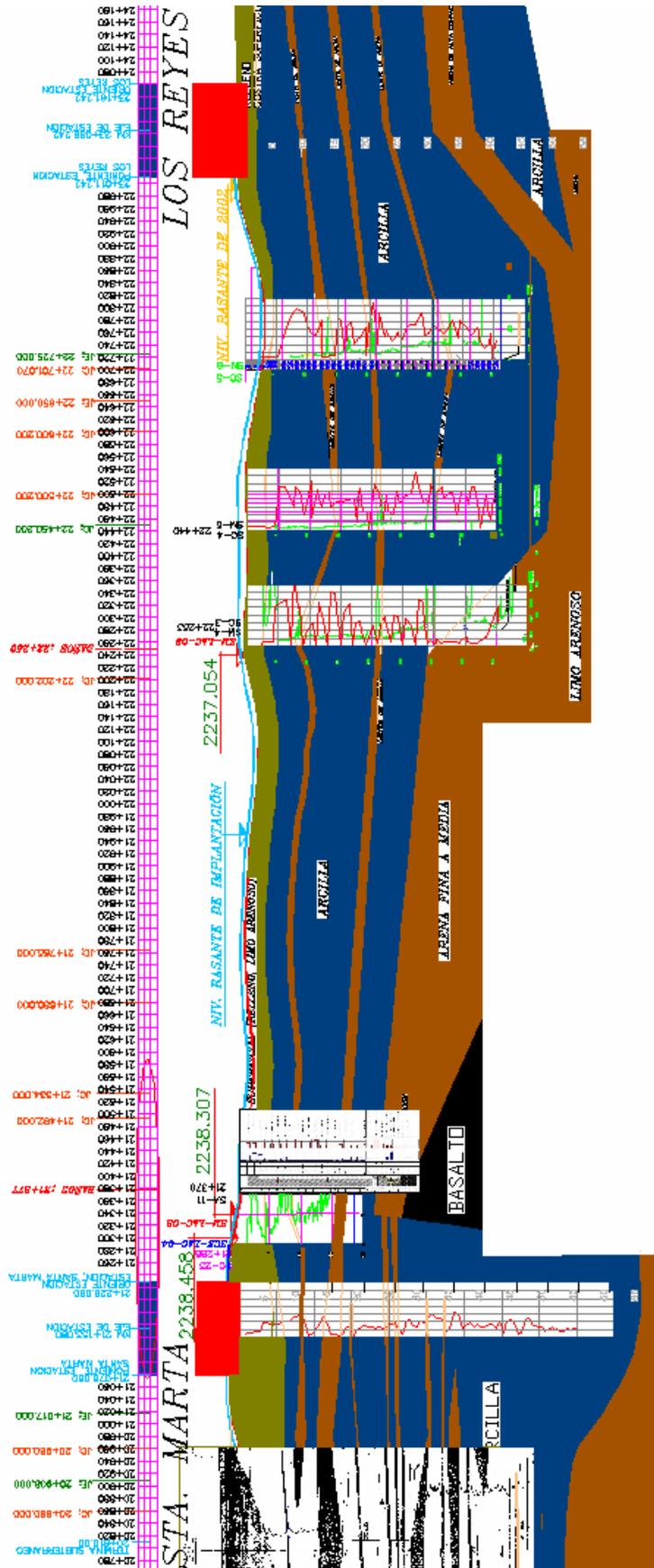


Figura III.5 Corte estratigráfico Santa Marta – Los Reyes.

III.2.4 Condiciones piezométricas

En cuanto a la piezometría de la zona, no se encontró información suficiente registrada antes del 2005. La empresa de ingeniería LAC Mecánica de Suelos y Cimentaciones instaló tres estaciones piezométricas con punta de tipo Casagrande cuya localización se indica en la Fig. III.6. La información general de las estaciones se presenta en la Tabla III.3 y el registro de lecturas piezométricas (profundidades del nivel de agua en los piezómetros) se observan en la Tabla III.4.



Figura III.6 Localización en planta de las estaciones piezométricas (LAC, 2005).

Tabla III.3 Datos generales de las estaciones piezométricas (LAC, 2005).

Estación	Punta	Profundidad (m)	Cadenamiento (km)	Cota (m.s.n.m.)
EPZ-LAC-01	1	31.00 m	17+070	2236.518
EPZ-LAC-02	1	12.00 m	22+210	2238.769
	2	35.00 m		

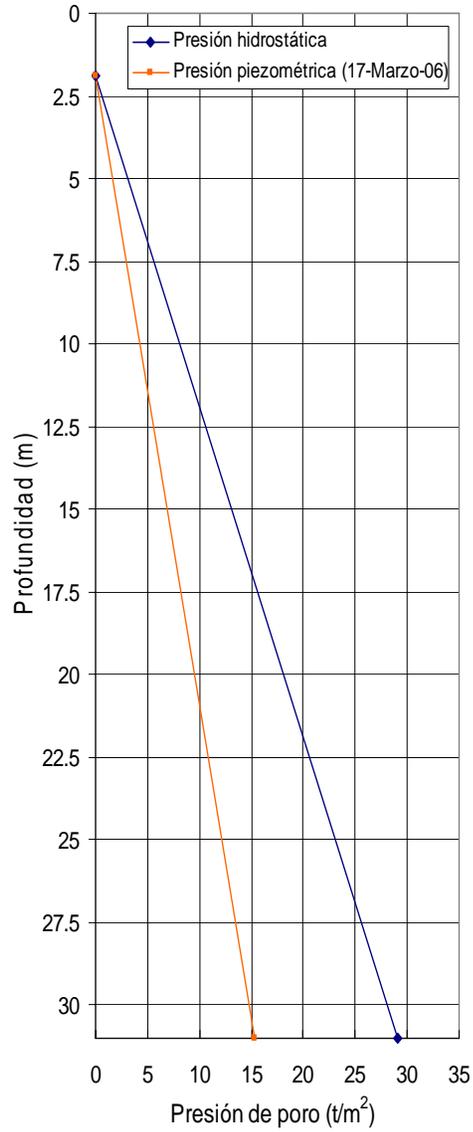
Estación	Punta	Profundidad (m)	Cadenamiento (km)	Cota (m.s.n.m.)
EPZ-LAC-03	1	16.60m	17+940	2236.833
	2	26.80 m		
	3	53.50 m		
	4	88.00 m		
EPZ-LAC-04	1	28.00 m	19+034	2231.808

Tabla III.4 Lecturas piezométricas (LAC, 2005 y 2006).

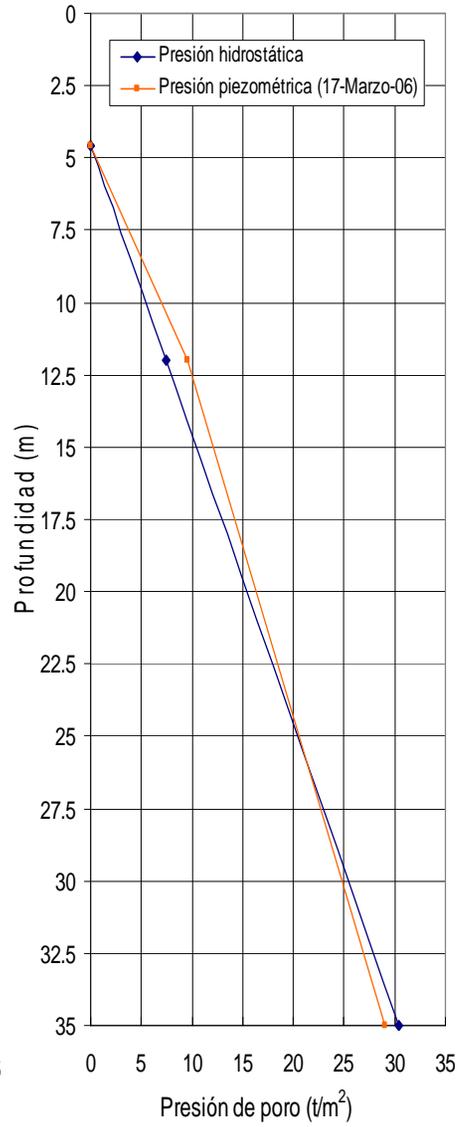
Estación	EPz LAC-01	EPz LAC-02		EPz LAC-03				EPz LAC-04
	Punta 1	Punta 1	Punta 2	Punta 1	Punta 2	Punta 3	Punta 4	Punta 1
26/11/05				2.10	2.80	2.50	15.70	
11/12/05				2.49	2.80	2.50	15.65	27.20
26/12/05	10.00			2.25	2.70	2.50	15.70	26.00
10/01/06	11.76			2.60	2.64	2.50	15.50	24.60
25/01/06	13.30	2.50	5.95	2.75	2.65	2.50	15.45	21.95
09/02/06	14.64	2.31	5.80	2.80	2.50	2.50	15.40	20.55
17/03/06	15.71	2.45	6.00	3.00	2.50	2.50	15.40	19.85

Como se observa en la Tabla anterior, la información piezométrica es insuficiente para determinar el descenso de presiones intersticiales en la zona de estudio, las estaciones EPz-LAC-01 y la EPz-LAC-02 (km 22+210), son las que muestran una mayor estabilidad en cuanto a la toma de lecturas, de hecho las fluctuaciones del nivel de aguas freáticas no es importante, sin embargo en las estaciones EPz-LAC-01 (km 17+070) y EPz-LAC-03 (km 17+940), presentan variaciones importantes. Los cambios y las tendencias de las lecturas en las estaciones, pueden atribuirse a las recargas y descargas del acuífero, producido por el bombeo para el abastecimiento del agua.

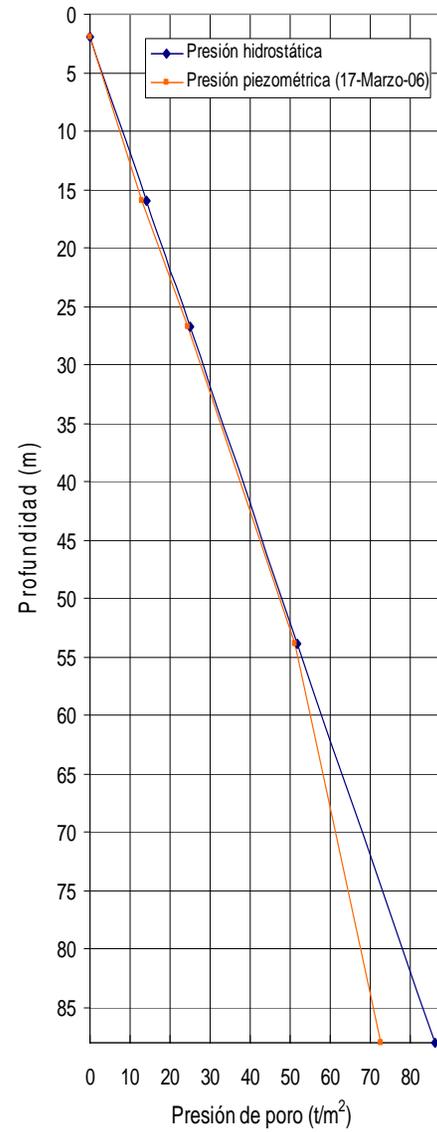
De esta manera, se observa que para la EPZ-LAC-01 (km 17+070) hay una disminución de 15 t/m² en la presión de poro, a 31m de profundidad, en la EPZ-LAC-02 (km 22+210) no se tiene prácticamente variación (1.4 t/m²) y para la EPZ-LAC-03 (km 17+940) la disminución es de 13.5 t/m² a 88m de profundidad, Fig. III.7. Es evidente la influencia del sistema de pozos alrededor de *Cerro del Marqués* en las estaciones piezométricas EPZ-LAC-01 y EPZ-LAC-03. La EPZ-LAC-04 no presenta variaciones importantes.



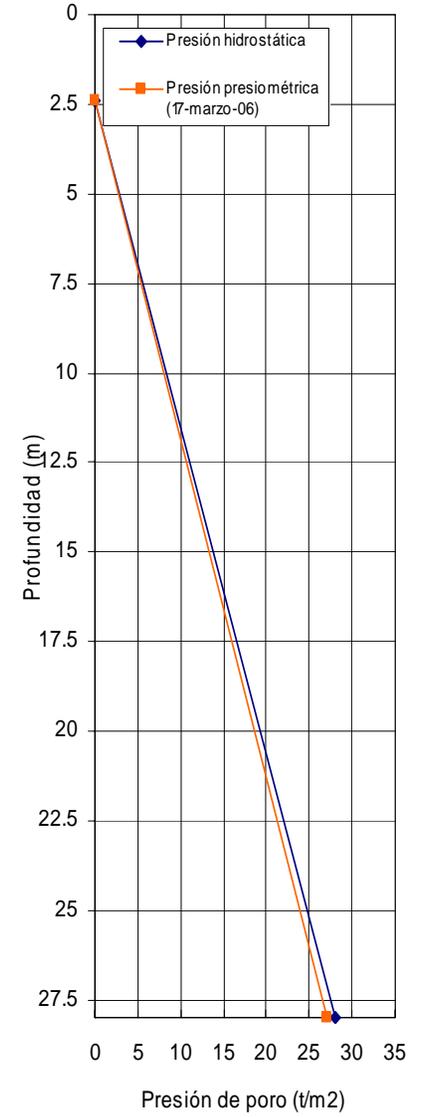
EPZ-LAC-01



EPZ-LAC-02



EPZ-LAC-03



EPZ-LAC-04

Figura III.7 Mediciones piezométricas.

III.3 Análisis geoestadístico de la distribución espacial de las propiedades del subsuelo

A partir de los sondeos geotécnicos contenidos en el Sistema de Información Geográfica de la zona y empleando como herramienta la geoestadística se elaboró un modelo de la distribución espacial del contenido de agua y otro de la resistencia de punta de cono eléctrico a lo largo del eje de vía.

Bajo el nombre de Geoestadística se entiende la aplicación de la teoría de las funciones aleatorias (en este caso espaciales) y del tratamiento de las señales a la descripción de las condiciones estratigráficas y de la distribución espacial de las propiedades de los materiales geológicos. La Geoestadística permite tomar en cuenta la dependencia espacial entre propiedades en puntos cercanos a través del concepto de función de autocovarianza o de variograma. Con estas herramientas es posible resolver en forma racional problemas tales como la estimación de valores de las propiedades en un sitio dado o en una zona determinada a partir de la información de los sondeos existentes con base en técnicas de estimación optimizadas como el “*Kriging*” (obtención de estimadores lineales de mínima varianza).

Para la elaboración del modelo geoestadístico, es indispensable contar con los datos numéricos de las propiedades del suelo. Sin embargo, únicamente se dispone de la imagen de cada uno de los sondeos, por lo que fue necesario proceder a la captura de los datos numéricos a partir de la información gráfica, es decir, capturar la información en formato digital a partir de los sondeos en formato analógico, esta actividad implica mucho trabajo y tiempo.

Campos aleatorios

Sea $V(X)$ la variable geotécnica de interés, definida en los puntos (sondeos) X del dominio estudiado (el predio) R^p ($p = 1, 2, \text{ ó } 3$). En cada punto del dominio, esta variable puede considerarse como aleatoria debido al rango de posibles valores que puede tomar. El conjunto de estas variables aleatorias constituye un *campo aleatorio* (Auvinet, 1987). Para poder describir este campo se emplean los siguientes parámetros:

- Esperanza:

$$\mu_v(X) = E\{V(X)\} \quad (III.1)$$

- Varianza:

$$\sigma_v^2(X) = Var[V(X)] \quad (III.2)$$

- Desviación estándar:

$$\sigma_v(X) = \sqrt{\sigma_{vv}^2(X)} \quad (III.3)$$

- Coeficiente de variación:

$$CV_V(X) = \frac{\sigma_V(X)}{E\{V(X)\}} \quad (\text{III.4})$$

- Función de autocovarianza:

$$C_V(X_1, X_2) = \text{Cov}[V(X_1)V(X_2)] = E\{[V(X_1) - \mu_V(X_1)][V(X_2) - \mu_V(X_2)]\} \quad (\text{III.5})$$

La autocovarianza representa el grado de dependencia lineal entre los valores de la propiedad de interés en dos puntos diferentes del medio. Se puede escribir bajo la forma de un *coeficiente de autocorrelación* adimensional, cuyo valor queda siempre comprendido entre -1 y +1:

- Coeficiente de autocorrelación:

$$\rho_V(X_1, X_2) = \frac{C_V(X_1, X_2)}{\sigma_{V_1} \sigma_{V_2}} \quad (\text{III.6})$$

- Variograma:

$$2\gamma(h) = E\{[V(X) - V(X+h)]^2\} \quad (\text{III.7})$$

Es el momento estadístico de segundo orden del incremento $V(X) - V(X+h)$. Es una herramienta generalmente equivalente a la función de autocovarianza.

Las funciones de correlación anteriores no son propiedades intrínsecas de los dos puntos X_1 y X_2 ya que dependen también de la población, es decir del dominio en el que el campo se encuentra definido.

Frecuentemente, al realizar un estudio geoestadístico, por simplicidad, se acepta que la esperanza de la variable es constante en el dominio, es decir que el campo aleatorio es estacionario. Sin embargo, es común que exista una deriva en la variación de las propiedades del suelo con la profundidad. Por tanto, a fin de estimar adecuadamente las funciones de correlación espacial es importante evaluar si el dominio en estudio es o no estacionario. En caso de que exista una deriva, esta puede removerse de los datos; se trabaja entonces con el campo aleatorio residual.

Estimación estadística de los parámetros de un campo aleatorio

Los parámetros y funciones descriptivos definidos en las ecuaciones anteriores pueden ser estimados a partir de los resultados “discretos” (muestras aisladas) o “continuos” (sondeos) de las campañas de reconocimiento, recurriendo a estimadores estadísticos.

En este último caso, aceptando que el campo es estadísticamente homogéneo, estacionario y ergódico (es decir que sus parámetros pueden ser estimados a partir de una sola *realización* del mismo), el valor esperado puede ser evaluado utilizando la aproximación:

$$\mu_V \cong \mu^* = \frac{1}{L} \int_0^L V(X) dX \quad (III.8)$$

donde L es la longitud del sondeo.

En la misma forma, es posible estimar la autocovarianza a lo largo de la dirección \mathbf{u} como:

$$\frac{1}{L} \int_0^L V(X)V(X + \lambda\mathbf{u})dX - \mu_V^2 \quad (III.9)$$

donde \mathbf{u} es el vector unitario en la dirección en la que se evalúa la covarianza y λ es un escalar.

- Distancia de correlación.

$$\delta = 2a \quad (III.10)$$

donde a es el área bajo la curva representativa de la función ρ_V , calculada hasta cuando por primera vez, esta curva cruza el eje de las abscisas.

Estimación

Un problema de interés en geoestadística es el de la estimación del valor de una propiedad de interés en un punto del medio donde no se cuenta con medición. Disponer de una solución a este problema permite en particular *interpol*ar entre datos disponibles e inclusive definir sondeos y cortes *virtuales*. El problema puede generalizarse a la estimación del valor medio de la misma propiedad en cualquier subdominio del medio estudiado, por ejemplo en un volumen dado o a lo largo de determinada superficie potencialmente crítica. Una técnica que permite alcanzar este objetivo es la técnica de estimación lineal sin sesgo y con mínima varianza (*Best linear unbiased estimation* ó "*BLUE*"), conocida también como *kriging* (Krige, 1962; Matheron, 1965; Auvinet, 2002) ampliamente usada en ingeniería minera.

La técnica de kriging consiste en recurrir a estimadores que sean combinaciones lineales de los datos:

$$V^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i \quad (III.11)$$

donde los λ_i son reales.

El problema consiste en estimar los parámetros λ_i que den un estimador satisfactorio de $V(X)$. El kriging recurre al "*mejor estimador sin sesgo*"; es decir, a un estimador que tenga las dos propiedades siguientes:

1. Ausencia de sesgo: $E\{V(X) - V^*(X)\} = 0$

2. Mínimo valor de la varianza de estimación definida como:

$$\sigma_E^2(X) = \text{Var}[V(X) - V^*(X)] = E\{(V(X) - V^*(X))^2\}$$

Introduciendo la variable aleatoria "error" definida como $V^*(X) - V(X)$, los dos criterios anteriores implican que esta variable tiene:

- una esperanza nula
- una dispersión mínima alrededor de esta esperanza.

a) Ausencia de sesgo

Sea $E\{V(X)\}$ la esperanza de $V(X)$ (tendencia). La condición de ausencia de sesgo se escribe:

$$E\{V(X)\} = \sum_{i=1}^n \lambda_i E\{V_i\} \quad (\text{III.13})$$

donde:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{III.14})$$

b) Minimización de la varianza de estimación

La varianza de estimación $\sigma_E^2(X) = \text{Var}[V^*(X) - V(X)]$ puede escribirse en la forma:

$$\sigma_E^2(X) = \text{Var}[V(X)] + \sum_{i=1}^n \lambda_i \lambda_j C_V(X_i, X)_j - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_V(X, X_i) \quad (\text{III.15})$$

El valor de $\sigma_E^2(X)$ se minimiza respetando la condición de ausencia de sesgo, esto se logra recurriendo a la técnica de los multiplicadores de Lagrange.

III.3.1 Datos

Para la elaboración del modelo geoestadístico, es indispensable contar con los datos numéricos de las propiedades del suelo. Sin embargo, los más de 100 perfiles de sondeos disponibles se encuentran en formato analógico, por lo que se procedió a la captura de los datos numéricos a partir de la información gráfica de los parámetros: contenido de agua y resistencia de punta de cono eléctrico. En la Tabla III.5 y III.6 se muestran las características generales de los sondeos.

Tabla III.5 Coordenadas de ubicación de los sondeos para contenido de agua.

CLAVE	SONDEOS	COOR_X (m)	COOR_Y (m)	PROF. (m)	AÑO
1	IPISA-01	497114.75	2142911.78	35.35	2002
2	LAC-01	497148.12	2142899.23	40.00	2005
3	LAC-02	497582.57	2142576.54	51.70	2005
4	LAC-03	497854.09	2142368.59	95.00	2005
5	IPISA-02	498609.04	2141808.63	30.00	2002
6	LAC-04	498671.64	2141758.83	54.20	2005
7	LAC-05	498725.11	2141716.30	86.00	2005
8	LAC-06	498961.10	2141528.65	64.30	2005
9	LAC-07	499246.17	2141276.96	40.00	2005
10	IPISA-03	500378.71	2140695.51	44.00	2002
11	LAC-08	500703.81	2140660.64	26.00	2005
12	LAC-09	501601.61	2140574.76	60.00	2005
13	IPISA-04	501615.54	2140564.18	40.60	2002
14	IPISA-05	501800.89	2140547.09	40.30	2002
15	IPISA-06	502059.66	2140521.75	40.60	2002
16	4284	502723.83	2140353.65	13.35	1992
17	4285	502733.83	2140367.65	14.15	1992
18	5795	496807.82	2143140.65	60.00	1979
19	5796	496751.82	2143098.65	60.00	1979
20	5797	498254.82	2141912.65	54.00	1979
21	5798	498472.82	2142129.65	55.20	1979
22	5799	498428.82	2141976.65	55.20	1979
23	5800	498320.82	2142111.65	55.20	1979
24	5801	500353.82	2140639.65	53.40	1979
25	5802	500511.83	2140678.65	55.20	1979
26	5877	496134.82	2143567.66	60.00	1979
27	5878	496081.82	2143473.66	70.20	1979
28	5940	498879.82	2141535.65	20.40	2002
29	6362	496882.82	2142970.65	25.00	1971
30	6403	495954.82	2143340.66	33.00	1971
31	6464	498285.82	2141956.65	54.00	1979
32	6465	498287.82	2141946.65	54.00	1979
33	6466	498487.82	2142100.65	55.20	1979
34	6467	498363.82	2141976.65	55.20	1979
35	6468	498359.82	2142071.65	55.20	1979
36	6469	498355.82	2142026.65	55.20	1979
37	6471	499327.82	2141289.65	45.20	1979
38	6473	500109.82	2140550.65	24.00	1979
39	6474	500232.82	2140642.65	54.00	1979
40	6475	500356.82	2140708.65	55.20	1979
41	381	499275.82	2141078.65	40.10	1996
42	2541	495617.82	2143390.66	48.80	1948

CLAVE	SONDEOS	COOR_X (m)	COOR_Y (m)	PROF. (m)	AÑO
43	3458	496101.82	2143602.66	41.30	1999
44	3598	499620.82	2140471.65	35.60	2001
45	3602	497567.82	2142425.65	20.00	1999
46	3873	501350.83	2140103.65	48.60	1948
47	4286	502740.83	2140325.65	14.80	1992
48	5875	496066.82	2143519.66	75.60	1979
49	5876	496159.82	496159.82	72.00	1979
50	5941	498887.82	2141520.65	23.23	2002
51	6360	495768.82	2143555.66	54.00	1971
52	6361	497003.82	2143022.65	36.00	1971
53	6407	495683.82	2143473.66	74.42	1971
54	6460	498423.82	2142051.65	45.60	1979
55	6461	498328.82	2142044.65	70.20	1979
56	6462	498408.82	2142022.65	70.80	1979
57	6463	498318.82	2142009.65	70.80	1979
58	6470	499263.82	2141271.65	45.60	1979
59	6472	500166.82	2140597.65	36.00	1979
60	***SM6-P4	499383.89	2141172.99	55	1987
61	***SM7-P4	499741.04	2140903.69	58	1987
62	***SM15-P4	500507.29	2140675.72	45	1987
63	*SM23-P1	499322.58	2141363.75	50	1990
64	*SM35-P1	499253.28	2141273.20	46	1990
65	**SM04-P2	496088.55	2143545.27	80	1990

- (1-15) Sondeos proporcionados por el STC
(16-59) Sondeos contenidos en la base de datos del SIG-SGL
* Puente Amador Salazar
** Puente Crisóstomo Bonilla
*** Proyecto original (Colinas de Buen)

Tabla III.6 Coordenadas de ubicación de los sondeos para resistencia de punta.

CLAVE	SONDEOS	COOR_X (m)	COOR_Y (m)	PROF. (m)	AÑO
1	LAC-01	497160.53	2142890.40	40	2005
2	LAC-02	498045.36	2142223.26	40	2005
3	LAC-03	498441.96	2141950.66	40	2005
4	IPISA-01	498752.38	2141693.65	21	2002
5	IPISA-02	499723.64	2140928.23	31	2005
6	LAC-04	500668.71	2140681.15	40	2005
7	IPISA-03	501614.21	2140563.95	43	2002
8	IPISA-04	501800.89	2140546.54	40	2002
9	IPISA-05	502059.64	2140521.60	38	2002
10	377	499249.82	2141099.65	61.2	1996
11	378	499315.82	2141079.65	40.8	1996
12	379	499317.82	2141047.65	42	1996
13	380	499284.82	2141040.65	38.2	1996
14	1199	498467.82	2141469.65	25.8	2000

MODELO ESTRATIGRÁFICO DEL SUBSUELO

CLAVE	SONDEOS	COOR_X (m)	COOR_Y (m)	PROF. (m)	AÑO
15	1200	498447.82	2141444.65	34	2000
16	2527	496137.82	2143560.66	50	1986
17	2528	496112.82	2143540.66	55	1986
18	2529	496082.82	2143485.66	60	1986
19	2530	496137.82	2143560.66	61	1986
20	2531	496117.82	2143530.66	63	1986
21	2532	496082.82	2143490.66	50	1986
22	2533	499257.82	2141390.65	33	1986
23	2534	499227.82	2141340.65	32	1986
24	2537	496552.82	2143310.65	61	1987
25	2559	499087.82	2141650.65	61	1996
26	2650	495890.82	2143542.66	60	-----
27	2654	498803.82	2141775.65	24	1988
28	2655	499197.82	2141292.65	57	1987
29	2673	499302.82	2142155.65	56	1990
30	2674	499133.82	2141956.65	54	1990
31	2697	495834.82	2143628.66	31	-----
32	3976	496114.82	2143594.66	50	1994
33	3977	496137.82	2143639.66	55	1994
34	3978	496138.82	2143689.66	60	1994
35	3979	498743.82	2142018.65	61	1994
36	3980	498724.82	2141955.65	63	1994
37	3981	498701.82	2141860.65	50	1994
38	3982	499384.82	2141390.65	33	1994
39	3983	499461.82	2141304.65	32	1994
40	3994	496536.82	2143328.65	61	1994
41	5939	498879.82	2141535.65	20.2	2002
42	*SC17P1	499267.81	2141295.56	32	1990
43	*SC18P1	499239.86	2141248.04	38	1990
44	*SC57P1	499313.64	2141332.45	37	1990
45	*SC58P1	499303.02	2141302.82	30	1990
46	**SC12P2	496085.61	2143488.09	60	1990
47	**SC11P2	496096.42	2143540.54	55	1990
48	***SC20P4	500160.54	2140723.01	48	1987
49	***SC21P4	499987.85	2140773.90	62	1987
50	***SC22P4	500338.79	2140694.76	45	1987
51	***SC23P4	500651.59	2140661.08	20	1987
52	***SC24P4	499572.92	2141037.19	53	1987
53	***SC44P	502457.25	2140547.54	50	1992

- (1-9) Sondeos proporcionados por el STC
 (10-41) Sondeos contenidos en la base de datos del SIG-SGL
 * Puente Amador Salazar
 ** Puente Crisóstomo Bonilla
 *** Proyecto original

III.3.2 Análisis de la distribución espacial del contenido de agua

III.3.2.1 Análisis exploratorio

La ubicación y distribución de los sondeos empleados para el análisis de la distribución espacial del contenido de agua se presentan en la Fig. III.8.

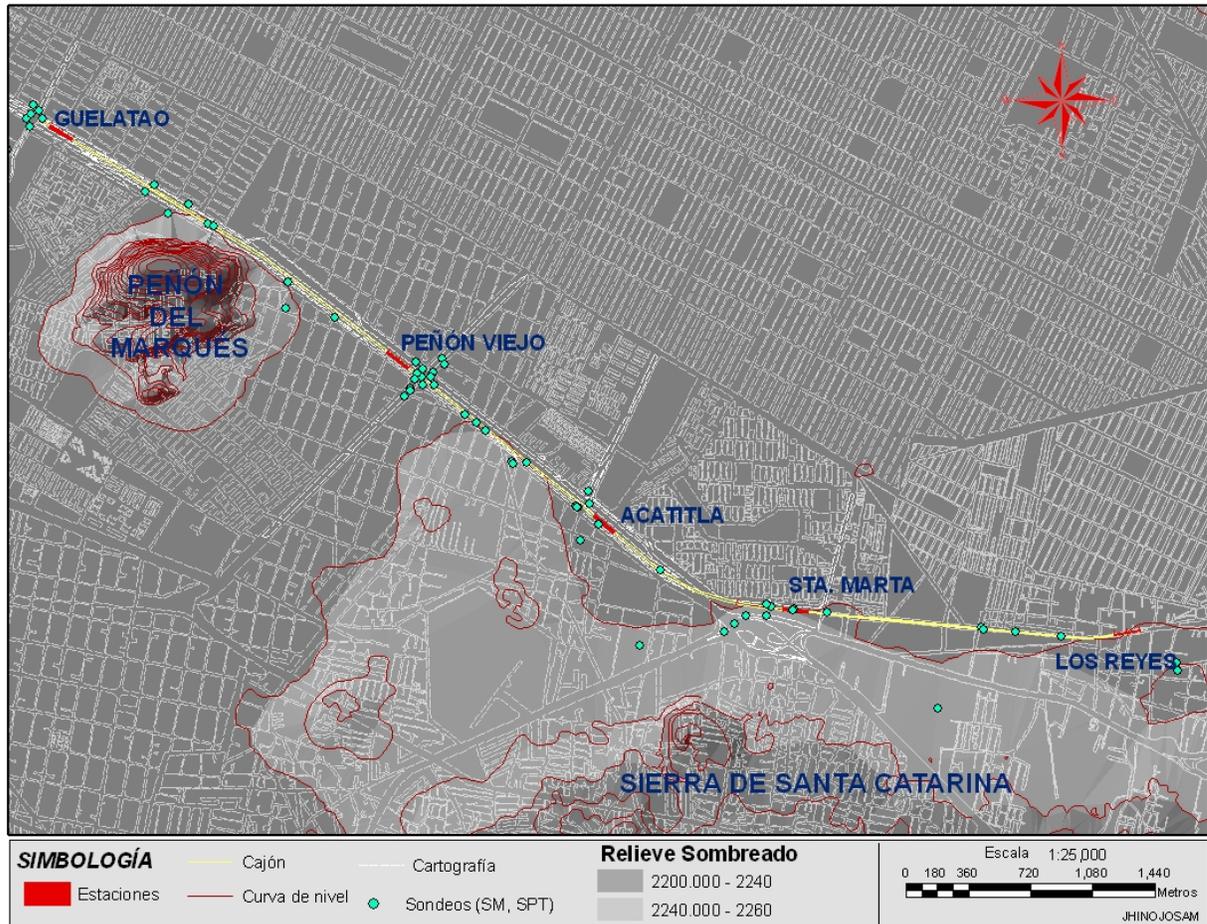


Figura III.8 Ubicación de sondeos con perfil del contenido de agua.

Con el propósito de tener una visión general sobre las características y la variabilidad de los datos se construyó un diagrama de dispersión, Fig. III.9.

El diagrama de dispersión del contenido de agua muestra que superficialmente existe una fuerte heterogeneidad de los materiales del subsuelo. El contenido de agua toma valores que van desde 20% hasta más de 450% en algunos sitios.

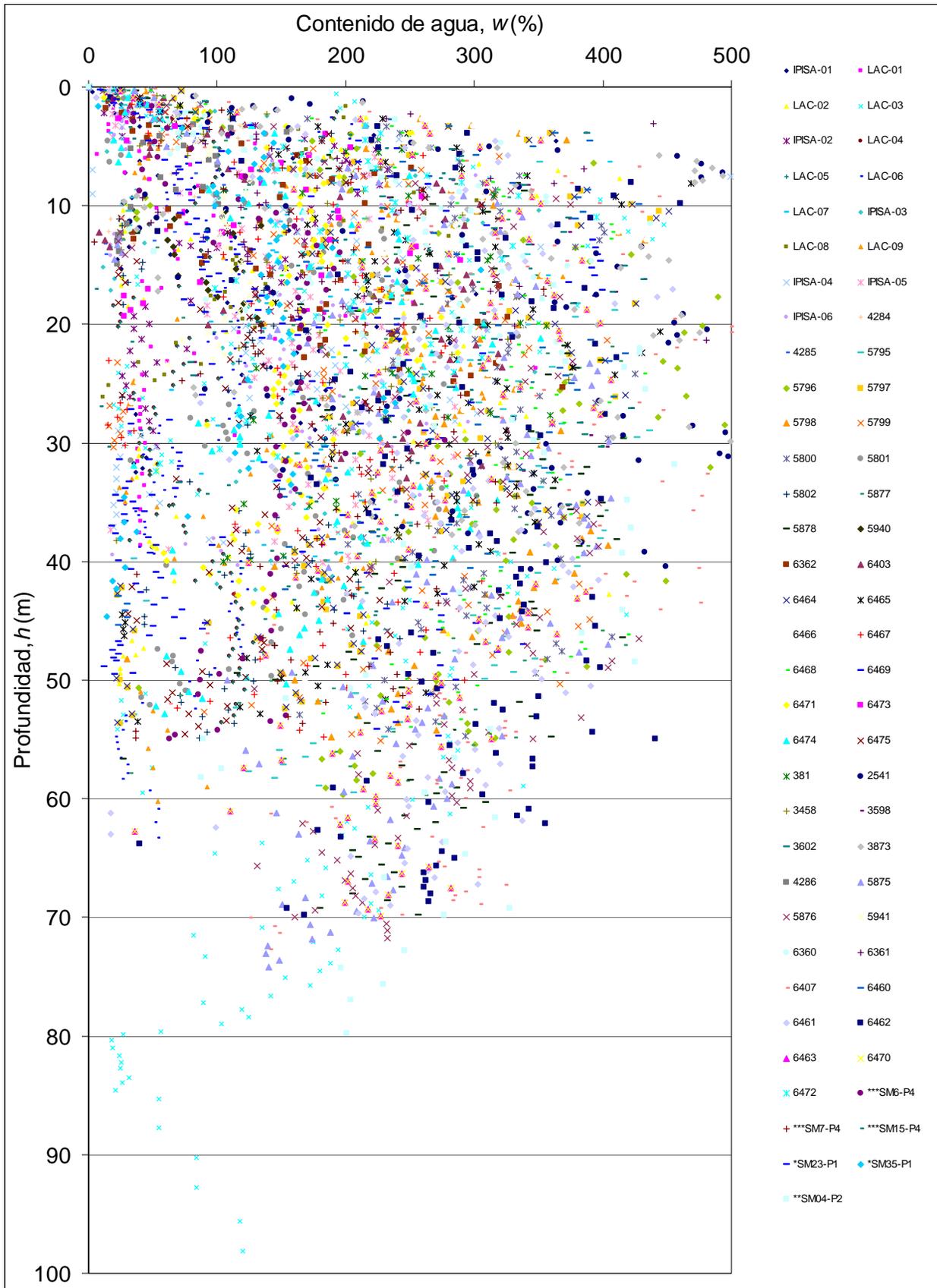


Figura III.9 Diagrama de dispersión del contenido de agua.

III.3.2.2 Descripción estadística

Los parámetros estadísticos que describen el contenido de agua se presentan en la Tabla III.7.

Tabla III.7 Parámetros estadísticos.

Parámetros estadísticos	
Número de datos	4984
Media	198.24
Mediana	198.51
Moda	20.0
Varianza	13519.08
Desviación estándar	116.27

El histograma de la Fig. III.10 describe la dispersión general de los datos de contenido de agua. Como se observa, el histograma es multimodal lo que indica que existe una gran heterogeneidad. Las medidas de tendencia central indican que los valores representativos del medio se encuentran entre valores de 180% a 320% del contenido de agua.

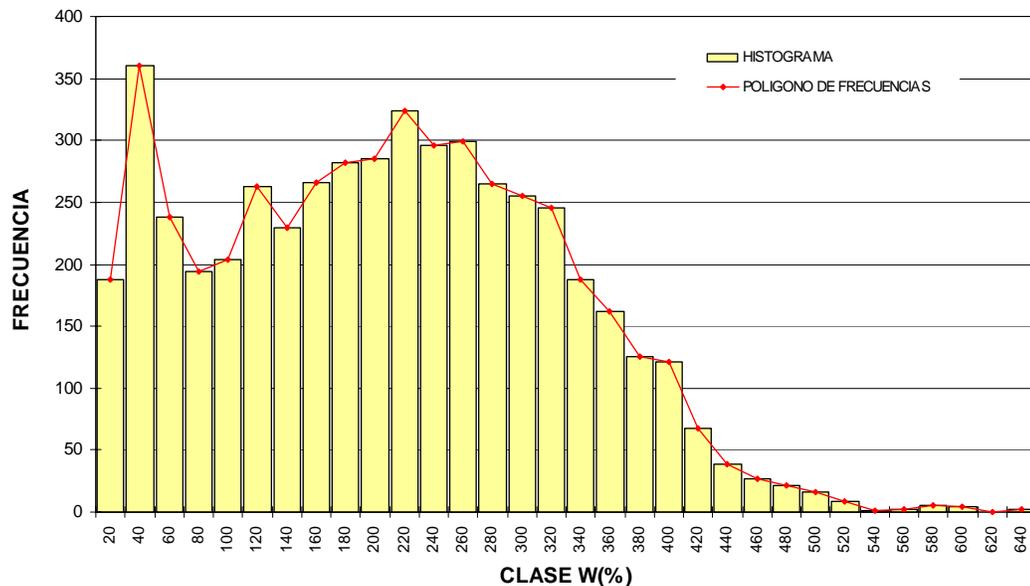


Figura III.10 Histograma del contenido de agua.

III.3.2.3 Análisis estructural

Este análisis tiene como objetivo evaluar el grado de dependencia espacial de los datos de contenido de agua. Para ello, se evalúa la función de autocovarianza y autocorrelación, considerando la combinación de todos los sondeos, tomando de dos en dos en cada combinación. Como resultado, la función de autocorrelación evaluada a partir de los datos se representa en forma gráfica (correlograma experimental). Las distancias de correlación (influencia) se estiman a partir de las funciones de los correlogramas experimentales, Figs. III.11 y III.12. Los valores de las distancias de correlación horizontal y vertical se presentan en la Tabla III.8.

Tabla III.8 Distancias de correlación del contenido de agua.

Dirección	Distancia de correlación (m)
Vertical	3.7
Horizontal	1200

Para la estimación (interpolación) es necesario adoptar un modelo teórico que represente en forma teórica la correlación general del medio, esto se logra ajustando una función de tipo exponencial al correlograma experimental y empleando las correspondientes distancias de influencia, Figs. III.11 y III.12.

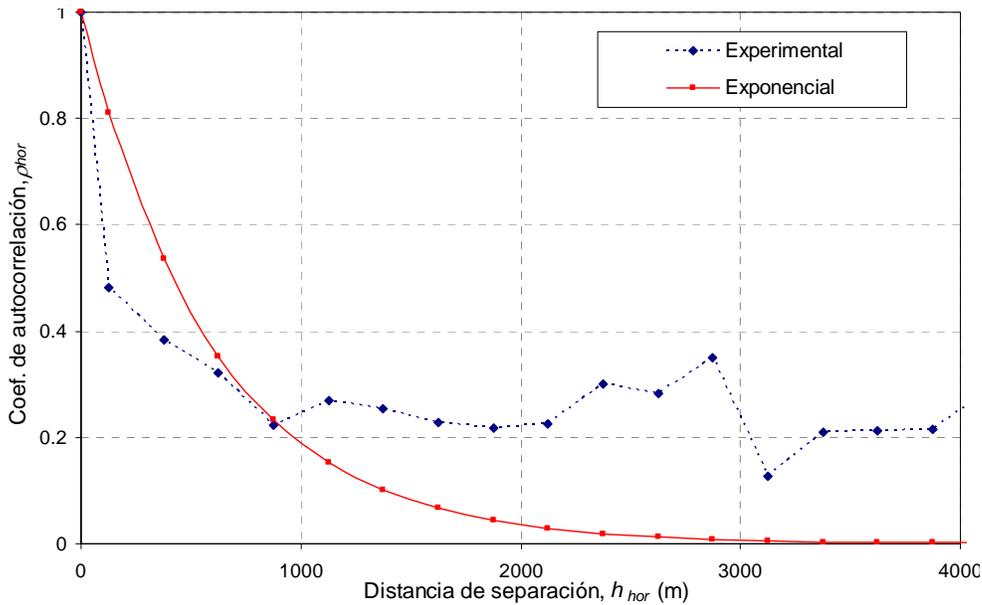


Figura III.11 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección horizontal.

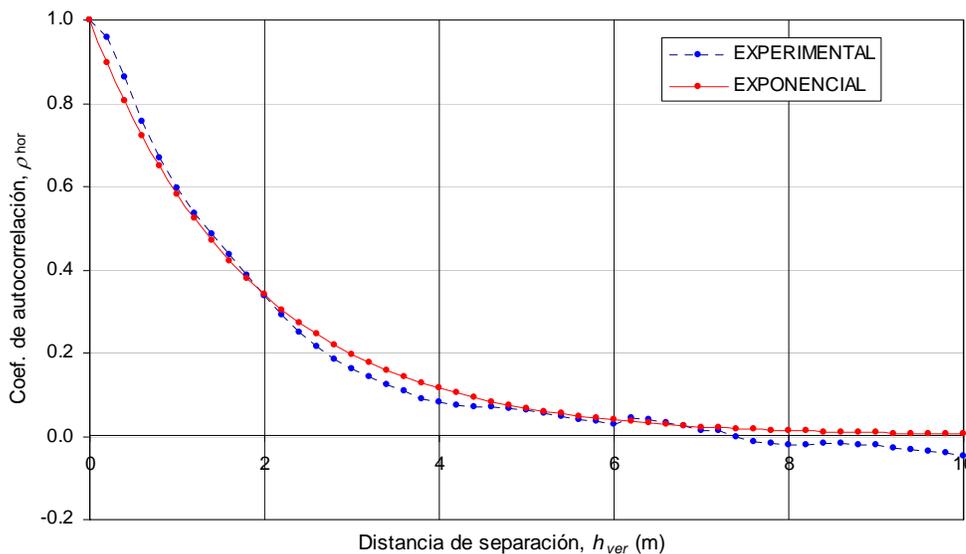


Figura III.12 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección vertical.

III.3.2.4 Estimación de sondeos y cortes

Estimación de perfiles

Con base en los resultados del análisis de correlación espacial, se estimaron mediante la técnica del Kriging simple (estimación condicional) unos perfiles de contenido de agua (o sondeos *virtuales*). Los perfiles se estimaron con la ayuda del “*Sistema de Apoyo para el Análisis Geoestadístico*” (Instituto de Ingeniería, UNAM), tomando en cuenta las mediciones de los sondeos. La estimación (interpolación) de perfiles se realizó a lo largo del eje de vía, con una separación equidistante de 200m en dirección horizontal, verticalmente la propiedad se estimó a cada 20cm hasta 50m de profundidad.

Cortes estimados

Con los perfiles estimados (*virtuales*) a lo largo del eje de vía se construyó un corte de contenido de agua. La representación gráfica del corte estimado se presenta en la Fig. III.13, en la cual se observa que entre la estación *Guelatao* (16+016) y hasta el 16+900 se presentan los contenidos de agua más altos, lo que implica una baja resistencia de los materiales del subsuelo, por ubicarse en zona franca de lago, con espesores de 70m. Del 16+900 al 17+500 disminuyen por la presencia del *cerro del Marqués*. Del 17+500 al 18+600 se incrementan considerablemente, ya que en tiempos históricos existió un canal que comunicaba el lago de Texcoco y el lago de Santa Marta, Fig II.5. Del 18+600 al 19+520, entre la estación *Peñón Viejo* y *Acatitla* se presentan los contenidos de agua más bajos y por tanto mayor resistencia. Después del 19+520 y hasta la estación *Los Reyes*, prevalece el suelo blando.

En general, en el corte estimado de contenido de agua, se tiene que superficialmente a lo largo del eje de vía las condiciones del subsuelo son muy variables y permiten identificar zonas donde se presentan cambios significativos (graduales o bruscos) de los materiales del subsuelo, lo cual puede asociarse con el comportamiento irregular del cajón del metro y a la generación de grietas.

III.3.2.5 Validación de la estimación

Con el propósito de evaluar la consistencia del método, en el corte se han dibujado los perfiles de los sondeos experimentales cercanos al eje de corte, Fig. III.13. En general se observa que existe una consistencia entre los cortes y los perfiles experimentales. Asimismo, para evaluar la precisión de la estimación (interpolación), se elaboró un corte de la desviación estándar de la estimación, el cual se presenta en la misma Fig. III.13.

Al disponer de la interpretación final, es previsible que se requerirá realizar más sondeos en puntos estratégicos a lo largo de la vía, entre una y otra estación, con el propósito de complementar la información disponible. Los mapas de incertidumbre asociada a la estimación podrán emplearse para definir los sitios de futuros sondeos, es

decir, en los sitios o zonas de mayor incertidumbre de interpolación es donde se recomiendan (16+200, 17+500, 18+100, 20+400, 21+700, 23+300).

Por lo tanto no se recomienda que sean empleados para fines de diseño, en virtud de existir un cierto grado de incertidumbre tanto en el origen de la información como en su interpretación.

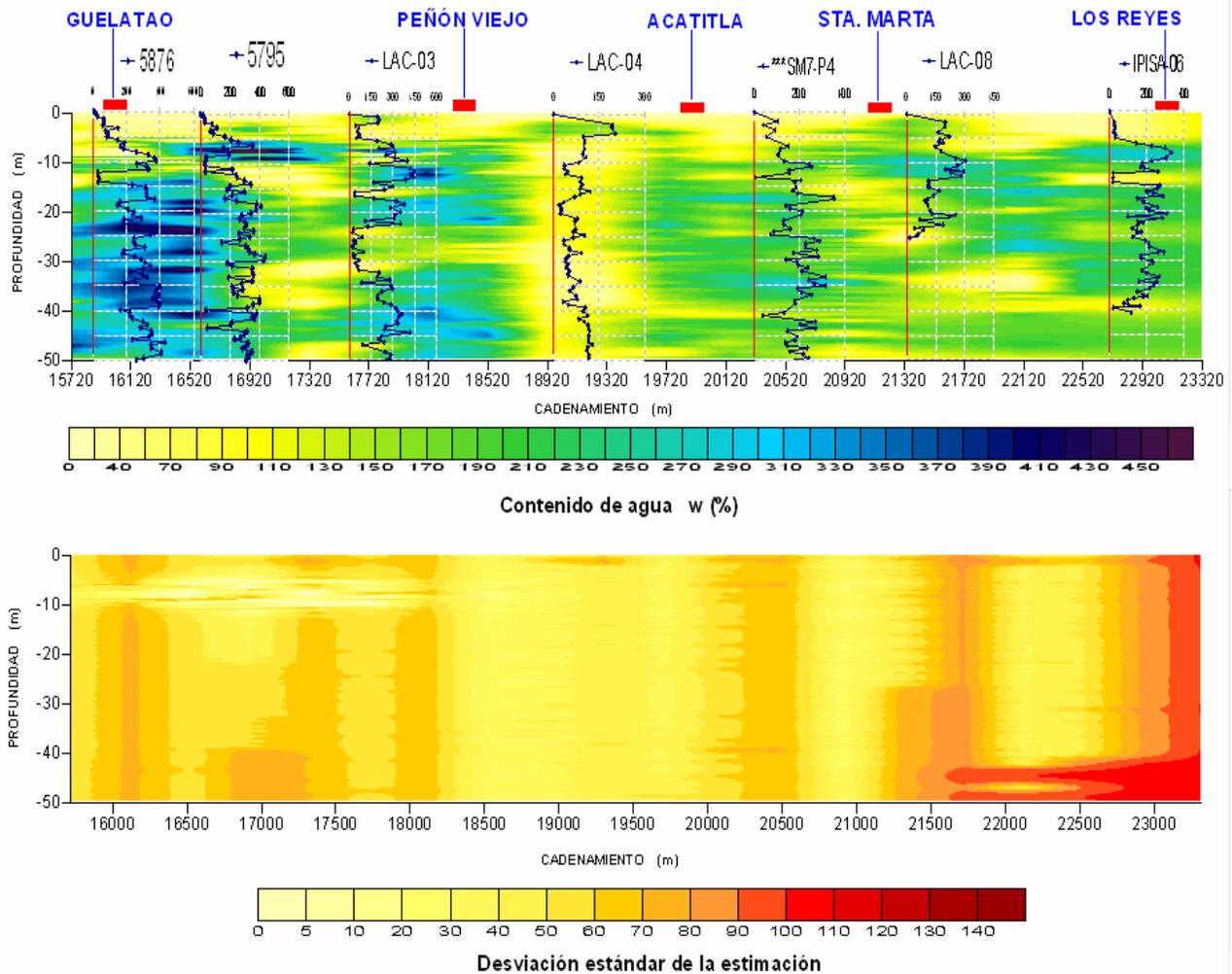


Figura III.13 Corte estimado (virtual) de contenido de agua.

III.3.3 Análisis de la distribución espacial de la resistencia de cono eléctrico

III.3.3.1 Análisis exploratorio

La ubicación y distribución de los sondeos empleados para el análisis de la distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico (q_c) se presentan en la Fig. III.14.

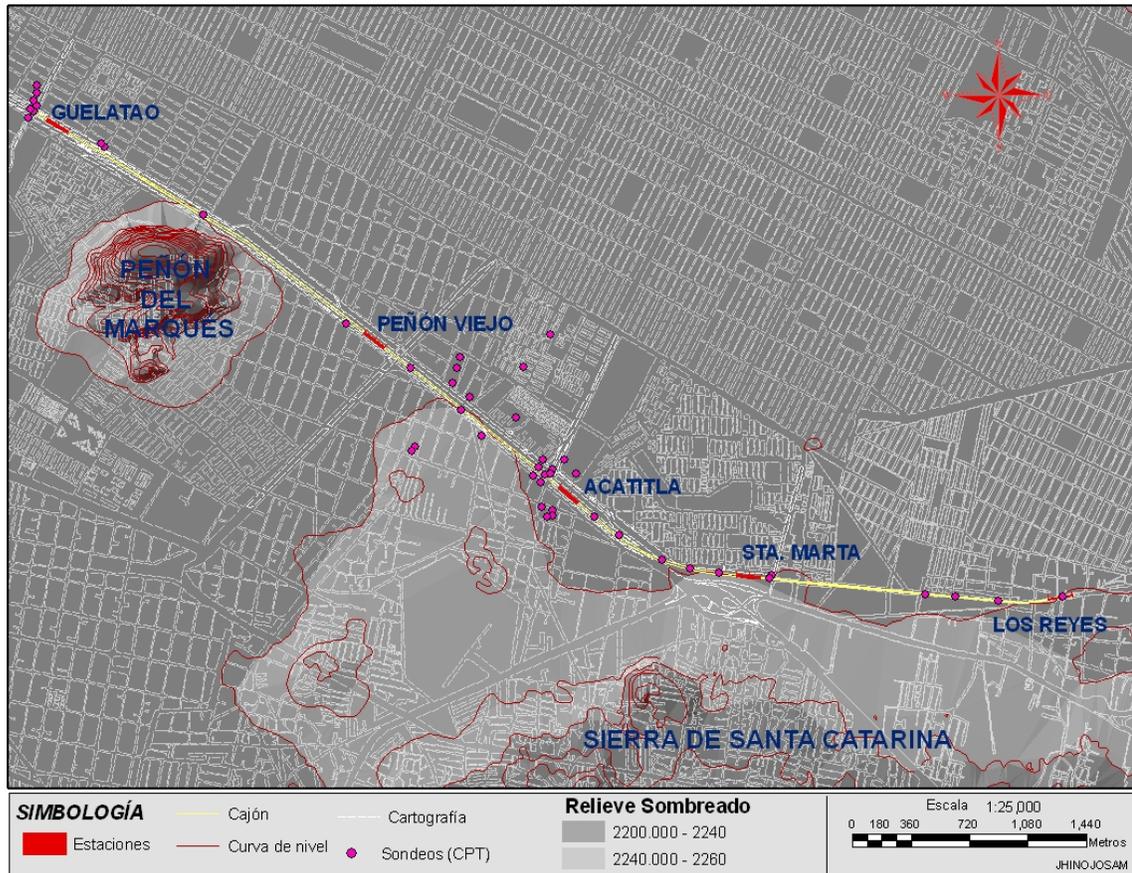


Figura III.14 Ubicación de sondeos de cono eléctrico.

Con el propósito de tener una visión general sobre las características y la variabilidad de los datos se construyó un diagrama de dispersión de la resistencia de punta de cono eléctrico, Fig. III.15. El diagrama de dispersión de la resistencia de punta de cono eléctrico muestra que superficialmente existe una fuerte heterogeneidad de los materiales del subsuelo. Los valores varían desde 500kPa (5kg/cm²) hasta más de 10000kPa (100kg/cm²) en algunos sitios.

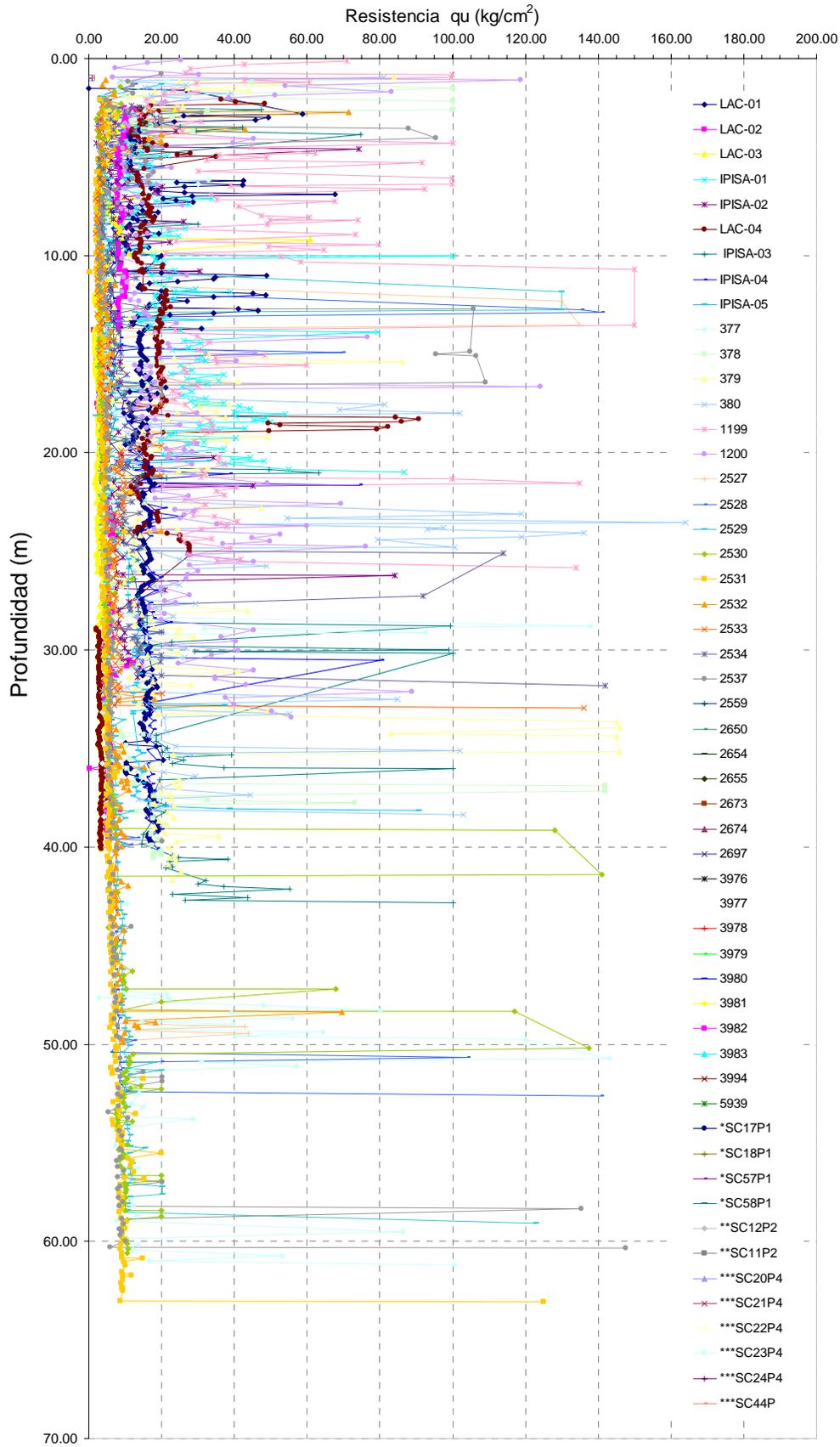


Figura III.15 Diagrama de dispersión de la resistencia de punta de cono eléctrico.

III.3.3.2 Descripción estadística

Los parámetros estadísticos de la resistencia de punta de cono eléctrico se presentan en la Tabla III.9.

Tabla III.9 Parámetros estadísticos.

Parámetros estadísticos	
Número de datos	8094
Media	12.72
Mediana	7.25
Moda	2.0
Varianza	356.57
Desviación estándar	18.88

El histograma de la Fig. III.16 describe la dispersión general de los datos de resistencia de punta de cono eléctrico. Este histograma presenta una fuerte asimetría. Como se observa, las medidas de tendencia central indican que los valores representativos del medio se encuentran entre valores de 300kPa (3kg/cm^2) a 1300kPa (13kg/cm^2)

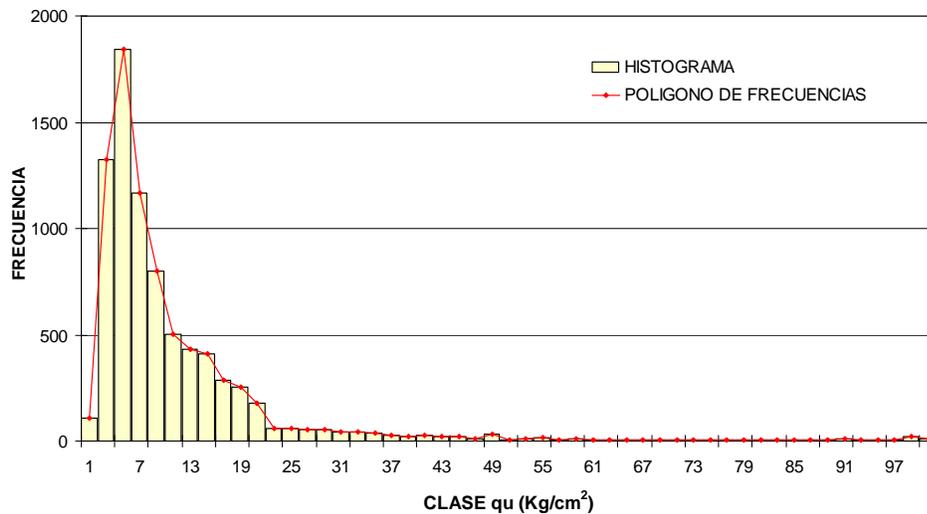


Figura III.16 Histograma de la resistencia de punta de cono eléctrico.

III.3.3.3 Análisis estructural

Este análisis tiene como objetivo evaluar el grado de dependencia espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico. Para ello, se evalúa la función de autocovarianza y autocorrelación, considerando la combinación de todos los sondeos, tomando de dos en dos en cada combinación. Como resultado, la función de autocorrelación evaluada a partir de los datos se representa en forma gráfica (correlograma experimental). Las distancias de correlación (influencia) se estiman a partir de las funciones de los correlogramas experimentales, Figs. III.17 y III.18. Los valores de las distancias de correlación horizontal y vertical se presentan en la Tabla III.10.

Tabla III.10 Distancias de correlación de la resistencia de punta de cono eléctrico.

Dirección	Distancia de correlación (m)
Vertical	2.8
Horizontal	700

Para la estimación (interpolación) es necesario adoptar un modelo teórico que represente en forma teórica la correlación general del medio, esto se logra ajustando una función de tipo exponencial al correlograma experimental y empleando las correspondientes distancias de influencia, Figs. III.17 y III.18.

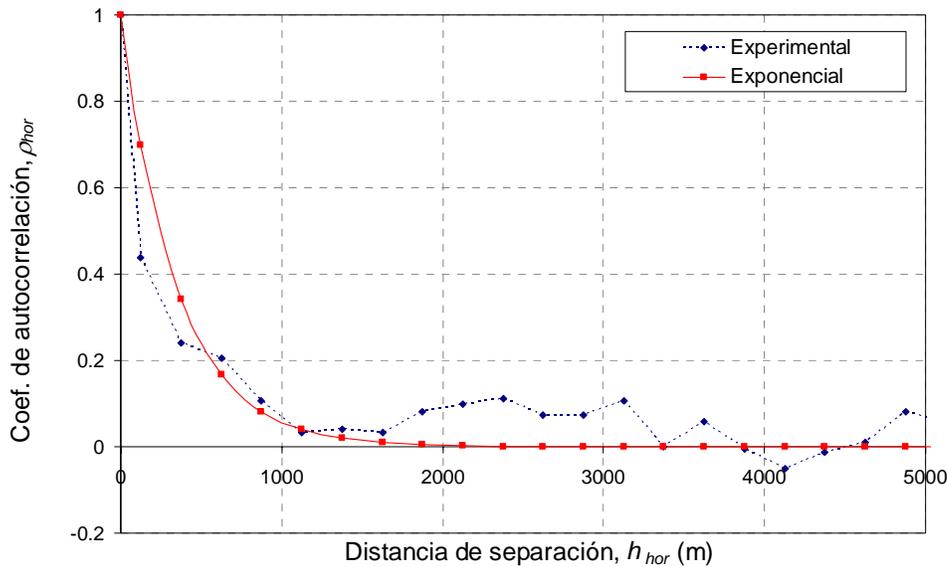


Figura III.17 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección horizontal.

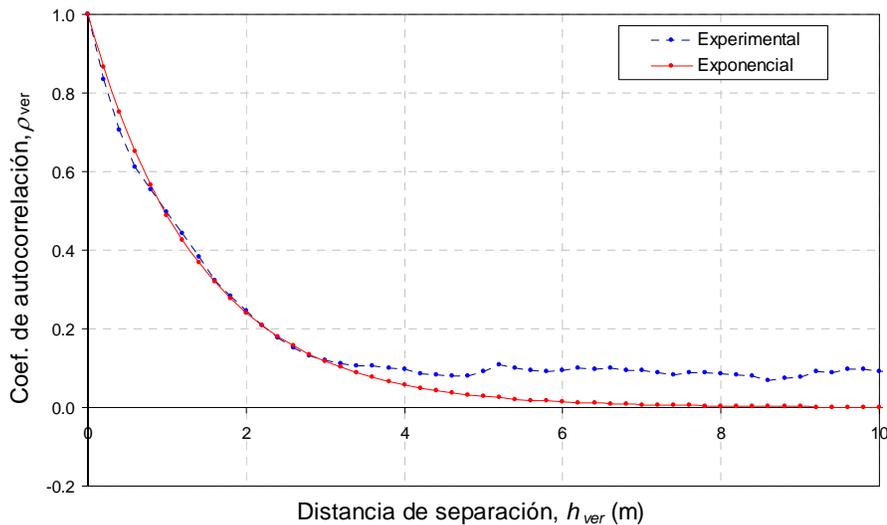


Figura III.18 Correlograma experimental y modelo de correlación, dirección vertical.

III.3.3.4 Estimación de sondeos y cortes

Estimación de perfiles

Con base en los resultados del análisis de correlación espacial, se estimaron mediante la técnica del Kriging simple (estimación condicional) unos perfiles de resistencia de punta (perfiles *virtuales*). Los perfiles se estimaron con la ayuda del “*Sistema de Apoyo para el Análisis Geoestadístico*” (Instituto de Ingeniería, UNAM, 2005), tomando en cuenta las mediciones de los sondeos. La estimación (interpolación) de perfiles se realizó a lo largo del eje de vía, con una separación equidistante de 200m en el sentido horizontal y verticalmente a cada 20cm hasta la profundidad de 50m.

Cortes estimados

Con los perfiles estimados (*virtuales*) a lo largo del eje de vía se construyó un corte de resistencia de punta de cono eléctrico. La representación gráfica del corte estimado se presenta en la Fig. III.21, en la cual se observa que entre la estación *Guelatao* (16+016) y hasta el 16+900 se presentan la resistencia de punta de cono eléctrico más baja, lo que implica la presencia de suelo de alta compresibilidad, a la profundidad de 11 m a 13 m se presenta un lente de arena de resistencia considerable. Del cadenamiento 16+900 al 17+500 la resistencia aumenta un poco por la presencia del *cerro del Marqués*. Del cadenamiento 17+500 al 18+600 baja considerablemente, ya que en tiempos históricos existió un canal que comunicaba el lago de Texcoco y el lago de Santa Marta, Fig II.5. Del 18+600 al 19+520, entre la estación *Peñón Viejo* y *Acatitla* se presentan las resistencias más altas debido a la influencia de la *sierra de Santa Catarina* y por tanto menor compresibilidad. Después del cadenamiento 19+520 y hasta la estación *Los Reyes*, prevalece el suelo blando con la presencia de algunos lentes de arena.

En general, en el corte estimado de resistencia de punta de cono eléctrico permite identificar zonas donde se presentan cambios bruscos de los materiales del subsuelo, con gran influencia en el comportamiento del cajón del metro y en la presencia de grietas.

III.3.3.5 Validación de la estimación

Con el propósito de evaluar la consistencia del método, en el corte se han dibujado los perfiles de los sondeos experimentales cercanos al eje de corte, Fig. III.19. En general se observa que existe una consistencia entre los cortes y los perfiles experimentales.

Asimismo, para evaluar la precisión de la estimación, se elaboró un corte de la desviación estándar de la estimación, Fig. III.19, en la cual se observan los cadenamientos estratégicos para definir los sitios de futuros sondeos (zonas de mayor incertidumbre de interpolación) a lo largo de la vía, con la finalidad de complementar la información disponible (17+300, 19+000, 21+700, 23+100).

Por lo tanto no se recomienda que sean empleados para fines de diseño, en virtud de existir un cierto grado de incertidumbre tanto en el origen de la información como en su interpretación.

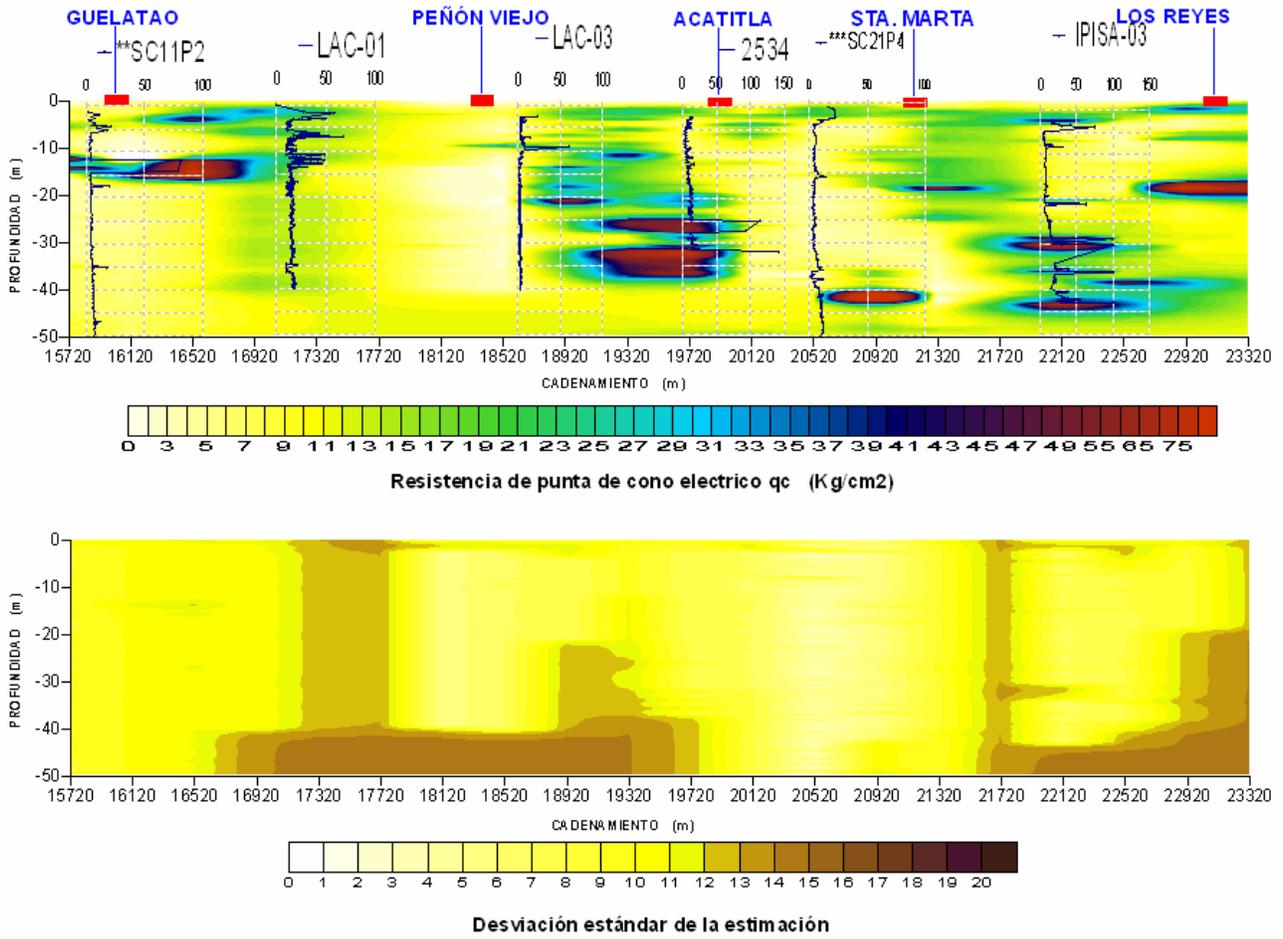


Figura III.19 Corte estimado (virtual) de resistencia de punta de cono eléctrico.

CAPÍTULO IV

MODELACIÓN SIMPLIFICADA DE LOS EFECTOS DEL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LA ESTRUCTURA DEL METRO

IV.1 Características de la estructura

La construcción de la *Línea A* del metro se realizó en dos soluciones: subterránea y superficial.

La primera se construyó a base de un túnel falso de sección rectangular conformado con muros colados en el lugar y estructurales (Anexo B, Figs. B.23 a B.26) losa de piso y techo integrado por tabletas prefabricadas y firme de compresión. La *Línea A* se divide en tres tramos: el primero, de aproximadamente 1600m de longitud, se extiende desde la estación *Pantitlán* hasta la calzada *Ignacio Zaragoza*; el segundo, de 500m de longitud, se construyó entre *Acatitla* y *Santa Marta* a efecto de librar la vialidad de la propia calzada, asimismo, existe un paso deprimido del metro en cajón subterráneo de aproximadamente 385m en el tramo *Santa Marta* a *Los Reyes*, para librar la avenida Simón Bolívar en el municipio de Los Reyes, Estado de México (DDF, 1991).

La segunda solución consiste en una estructura de concreto hidráulico en forma de cajón abierto, con una losa de fondo que se construye sobre una plantilla de concreto pobre, dos muros laterales que además sirven de confinamiento y un muro central de seguridad (Anexo B, Figs. B.9 a B.21).

El tramo en estudio de la *Línea A* cuenta con cinco estaciones; dos de ellas son de correspondencia a futuro (*Acatitla* y *Santa Marta*) y las restantes son estaciones de paso *Guelatao*, *Peñón Viejo* y *Los Reyes*.

IV.1.1 Estaciones

Todas las estaciones tienen una longitud aproximada de 150m para recibir trenes de nueve carros, en particular las de tipo superficial están estructuradas sobre un basamento de concreto hidráulico que sirve de cimentación, andenes y paso de vía sobre las que se apoyan unas columnas cortas de concreto las cuales a su vez reciben columnas metálicas donde se sustenta el nivel de vestíbulo arriba de la zona de andenes. La techumbre con sistema autosoportante tiene forma de bóveda de cañón a base de lámina acanalada estructural calibre 24, Fig. IV.1.



Figura IV.1 Estación *Peñón Viejo*.

Los accesos a las estaciones se realizan a través de puentes peatonales equipados con puertas y sirven tanto para acceso al metro como para el cruce de la calzada *General Ignacio Zaragoza*. La zona de vestíbulo superior está limitada por dos líneas de torniquetes, en este se alojan los locales para venta de boletos y algunos servicios de atención al público. Las estaciones cuentan con andén central con capacidad suficiente para recepción de usuarios en espera para el tiempo correspondiente a tres intervalos. Se cuenta con locales técnicos y subestaciones alojados en las cabeceras de las estaciones fuera de acceso a los usuarios.

Las estaciones son estructuras que poseen una rigidez superior a la de las distintas secciones del cajón del metro. Esta rigidez es tal que estas estructuras no son propensas a daños importantes en comparación con lo observado sobre el cajón del metro. Una sección transversal típica se ilustra en la Fig. IV.2 (estación *Peñón Viejo*). En el ANEXO B, se presenta con detalle las dos secciones estructurales tipo de cimentación (celda y losa), vistas en planta y en corte, de las estaciones; *Guelatao, Peñón Viejo, Acatitla, Santa Marta y Los Reyes*.

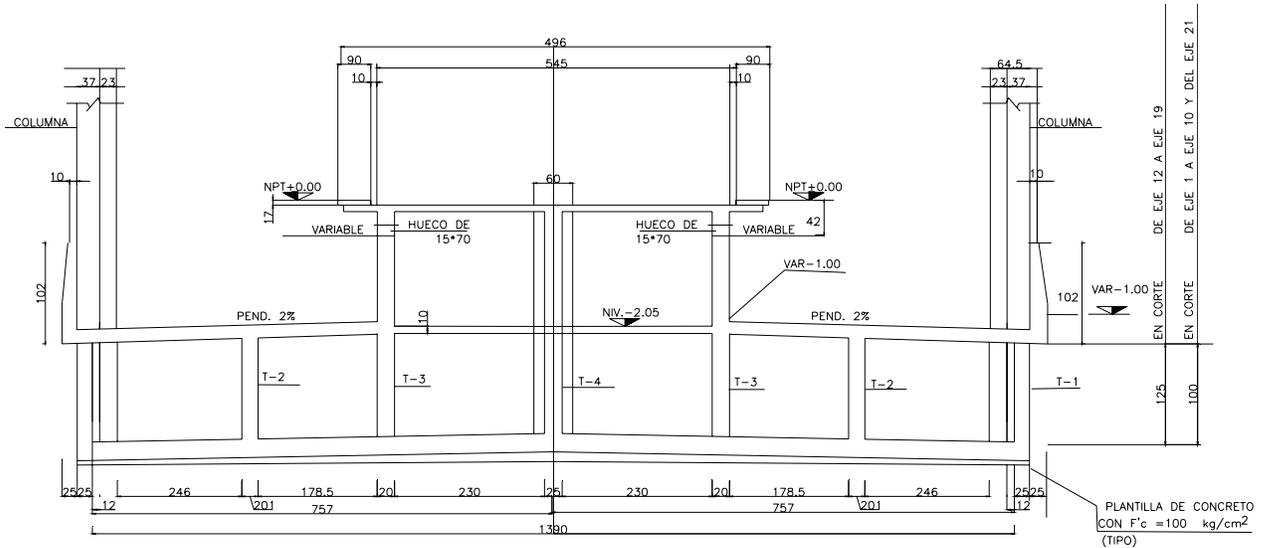


Figura IV.2 Sección transversal de la estación *Peñón Viejo*.

IV.1.2 Secciones estructurales del cajón del metro

El tramo en estudio tiene una longitud total de 7.22km, la Fig. IV.3 muestra las secciones estructurales en planta tipo comprendidas en el tramo *Guelatao* y *Los Reyes*, sustentadas a partir de los planos estructurales del proyecto original (Colinas de Buen, S.A. de C.V., 1989), y de los planos digitalizados por IPISA en 2001. En la Tabla IV.1 se indican los cadenamientos de cada una de ellas con sus propiedades geométricas. Cabe recalcar que en algunas secciones existe una importante diferencia de rigidez (momentos de inercia), de una sección con respecto a otra.

Las secciones estructurales del cajón del metro se pueden clasificar en dos tipos:

- Cajón con losa de cimentación (Fig. IV.4)
- Cajón con celda de cimentación (Fig. IV.5)

Las secciones estructurales del cajón del metro con celdas de cimentación se localizan principalmente en las zonas donde el hundimiento del subsuelo es importante (Fig. IV.6, zona de lago), es decir, zonas donde los espesores de arcilla lacustre son considerables (entre 70 y 80m). Las secciones estructurales del cajón que están formadas simplemente por una losa de cimentación se localizan en general en zonas donde los hundimientos del subsuelo son menores (Fig. IV.7, zona de transición).

Por otra parte, las Figs. IV.6 a IV.9 indican de manera ilustrativa los cambios de sección estructural con el desplazamiento vertical del nivel de sub-rasante del cajón del metro para el período de 1987 a 2001. En el ANEXO B se muestran de manera detallada las diferentes secciones estructurales del cajón que existen en el tramo de estudio.

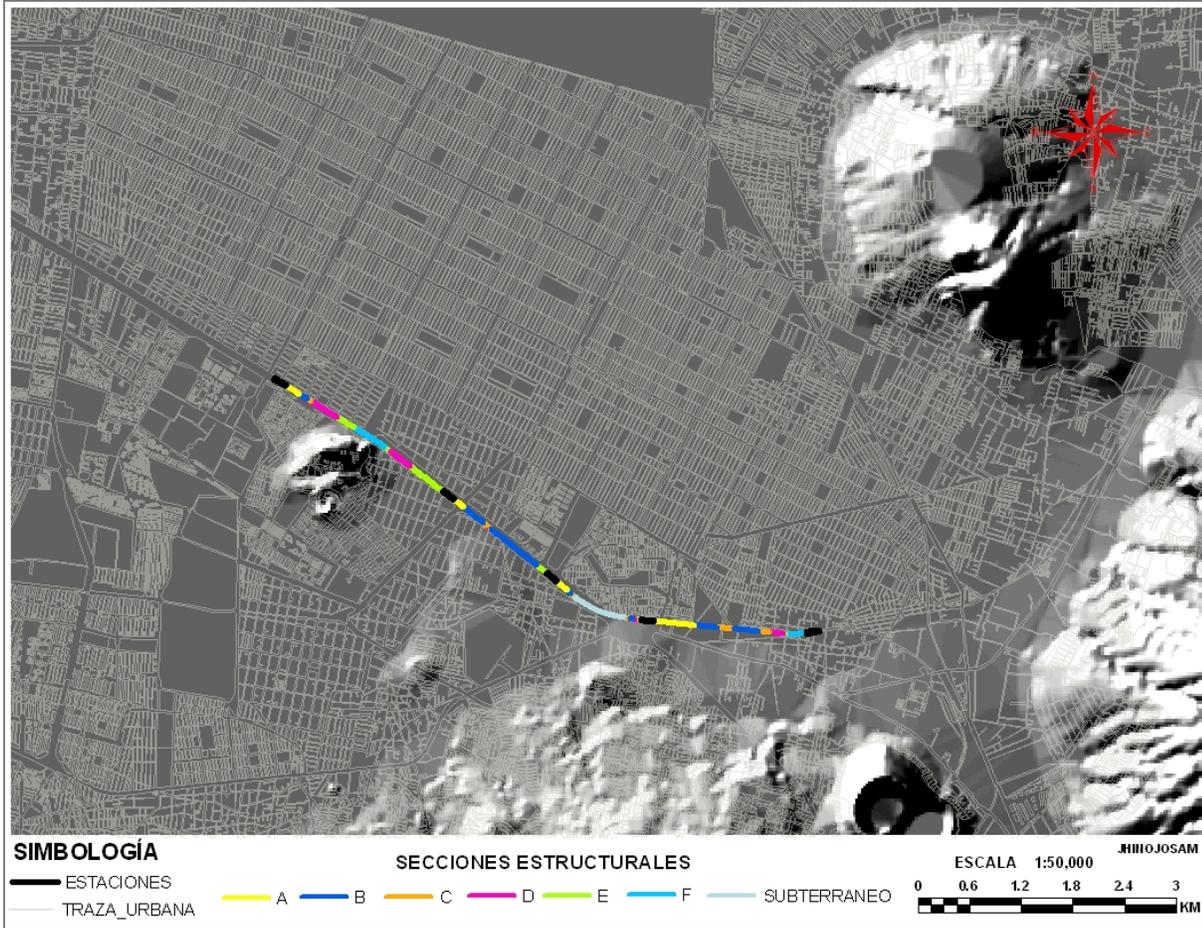


Figura IV.3 Secciones estructurales del cajón en planta del tramo de estudio (Tabla IV.1).

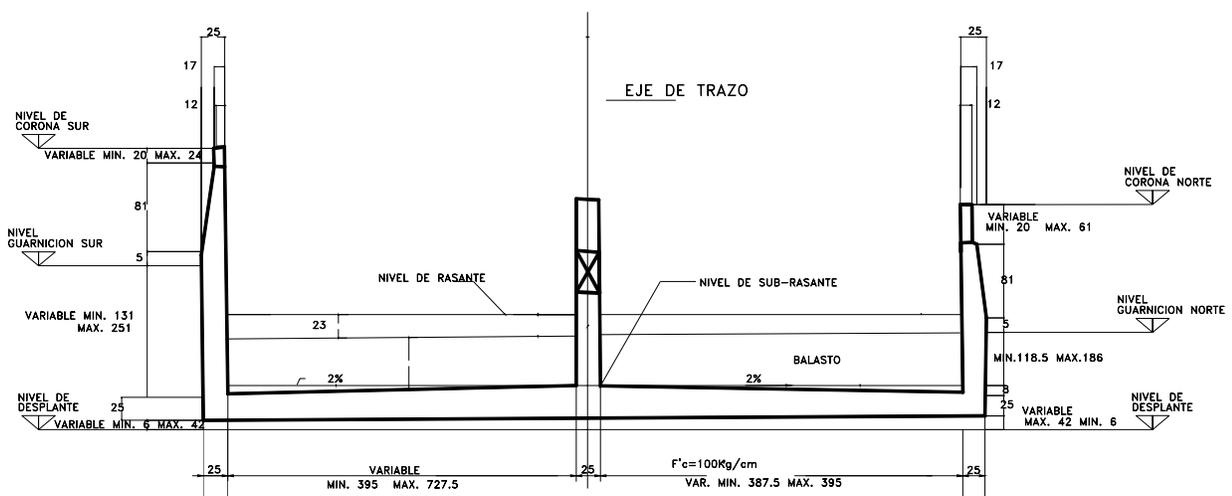


Figura IV.4 Sección transversal del cajón con losa de cimentación.

MODELACIÓN SIMPLIFICADA DE LOS EFECTOS DEL HUNDIMIENTO EN LA ESTRUCTURA DEL METRO

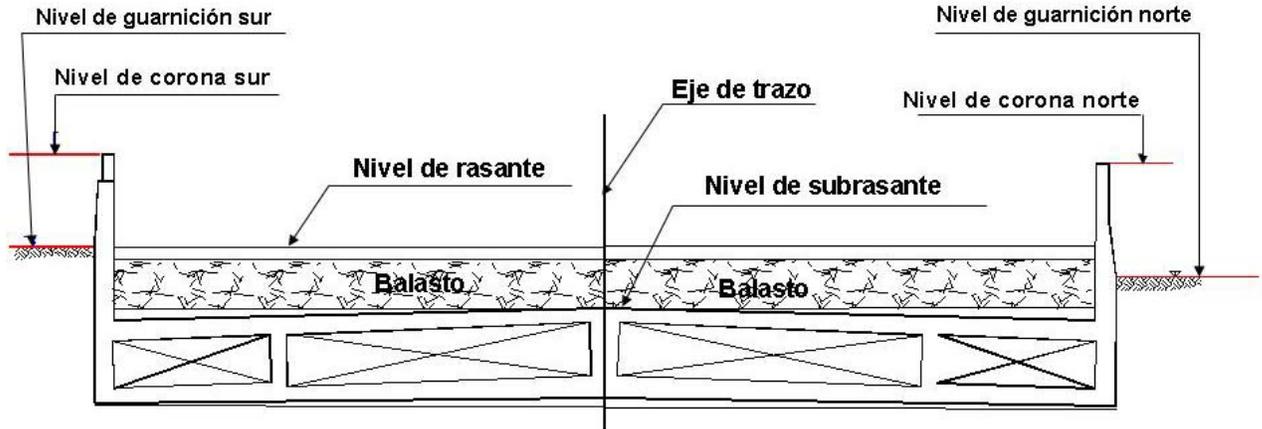


Figura IV.5 Sección transversal del cajón con celdas de cimentación.

Tabla IV.1 Cadenamientos y propiedades geométricas del cajón del metro.

SECCIÓN	CADENAMIENTOS		DIS. (m)	# MATERIAL	INERCIA (m ⁴)		AREA (m ²)	ELEMENTOS		CENTROIDE	
	INICIO	FINAL			lxx	lyy		ORIGEN	FINAL	Cxx	Cyy
GUELATAO	15940.000	16090.000	150.000	1	13.283	338.636	17.875	1	16	7.895	1.010
A	16090.000	16280.000	173.484	2	9.327	174.158	9.878	16	35	6.455	1.034
B	16280.000	16385.000	105.000	3	11.342	133.809	9.202	35	46	5.919	1.282
C	16385.000	16440.016	55.016	4	17.124	149.040	9.448	46	51	5.484	1.662
D	16440.016	16800.016	360.000	5	20.280	105.451	10.331	51	87	5.268	1.640
E	16800.036	17020.000	219.964	6	12.786	81.606	9.448	87	109	4.636	1.395
F	17020.000	17485.000	465.000	7	2.961	55.970	6.636	109	156	4.666	0.596
E	17485.000	17520.000	35.000	6	12.786	81.606	9.448	156	159	4.636	1.395
D	17520.000	17819.750	299.750	5	20.280	105.451	10.331	159	189	5.268	1.640
E	17819.750	18300.000	460.570	6	12.786	81.606	9.448	189	237	4.636	1.395
PENON-VIEJO	18300.000	18450.000	150.000	8	13.283	338.636	17.875	237 / 1	252 / 16	7.985	1.010
A	18450.000	18600.825	138.655	2	6.077	124.646	10.073	16	31	5.719	0.923
B	18600.825	18899.832	299.007	3	2.418	45.798	4.839	31	61	4.448	0.588
C	18899.832	18932.236	32.404	4	2.197	36.551	4.196	61	64	4.053	0.556
D	18932.236	18973.613	41.377	5	1.957	55.943	3.937	64	68	7.521	0.390
C	18973.613	19002.361	29.748	4	2.197	36.551	4.196	68	71	4.053	0.556
B	19002.361	19679.642	677.281	3	2.418	45.798	4.839	71	139	4.448	0.588
E	19679.624	19827.269	131.309	6	3.192	80.786	5.381	139	154	5.835	0.603
ACATITLA	19827.269	19977.269	150.000	7	13.283	338.636	17.875	154 / 1	169 / 16	7.985	1.010
A	19977.269	20140.000	206.267	2	4.319	64.778	6.844	16	32	4.741	0.957
B	20140.000	20194.500	54.500	3	1.654	51.931	3.823	32	38	4.865	0.497
C	20194.500	20212.500	18.000	4	3.721	56.540	5.622	38	40	4.125	0.719
A"	20212.500	20303.363	90.863	5	108.583	271.820	19.005	40	49	5.050	2.328
B"	20303.363	20345.808	40.808	6	242.274	408.997	60.905	49	53	5.050	3.333
C"	20345.808	20490.367	144.559	7	190.199	298.246	53.023	53	68	4.680	3.474
D"	20490.367	20549.000	50.000	8	386.234	454.187	34.682	68	74	5.049	5.076
C"	20549.000	20775.000	22.181	7	190.199	298.246	53.023	74	97	4.680	3.474
E"	20775.000	20926.000	116.000	9	92.607	215.767	17.283	97	112	4.675	2.302
C	20926.500	20950.000	23.500	4	3.721	56.540	5.622	112	115	4.125	0.719
B	20950.000	20992.154	42.154	3	1.654	51.931	3.823	115	119	4.865	0.497
D	20992.154	21020.000	27.846	10	0.947	104.323	4.445	119	122	7.011	0.316
E	21020.000	21078.080	64.779	11	2.965	63.151	6.460	122	128	4.775	0.821
SANTA-MARTA	21078.080	21228.080	150.000	12	13.283	338.636	17.875	128 / 1	143 / 16	7.895	1.010
A	21225.608	21700.000	474.392	2	4.726	77.733	6.978	16	63	4.975	0.922
B	21700.000	21980.000	280.000	3	1.881	11.582	3.029	63	91	2.731	0.783
D	21980.000	22160.000	180.000	4	2.306	48.884	5.336	91	109	4.475	0.579
B	22160.000	22458.000	298.000	3	1.881	11.582	3.029	109	139	2.731	0.783
C	22458.000	22580.000	122.000	5	1.682	33.974	3.603	139	151	4.505	0.555
E	22580.000	22785.000	205.000	6	21.028	288.200	12.442	151	171	6.510	1.137
F	22785.000	22805.000	20.000	7	59.691	290.229	14.598	171	173	5.759	1.960
E	22805.000	22965.000	160.000	6	21.028	288.200	12.442	173	195	6.510	1.137
LOS REYES	23011.242	23161.242	150.000	8	13.283	338.636	17.875	195	210	7.895	1.010

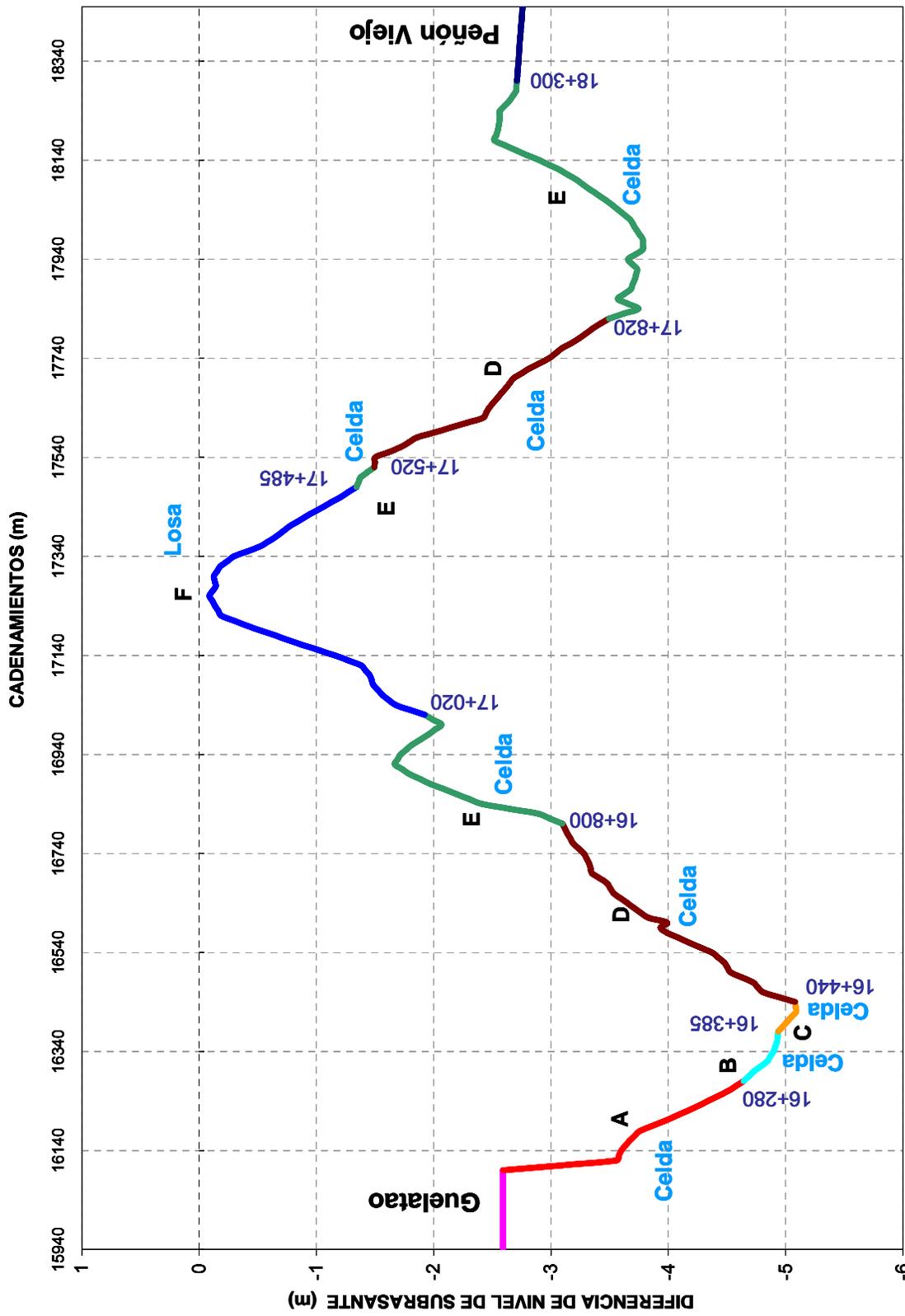


Figura IV.6 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo Guelatao-Peñón Viejo.

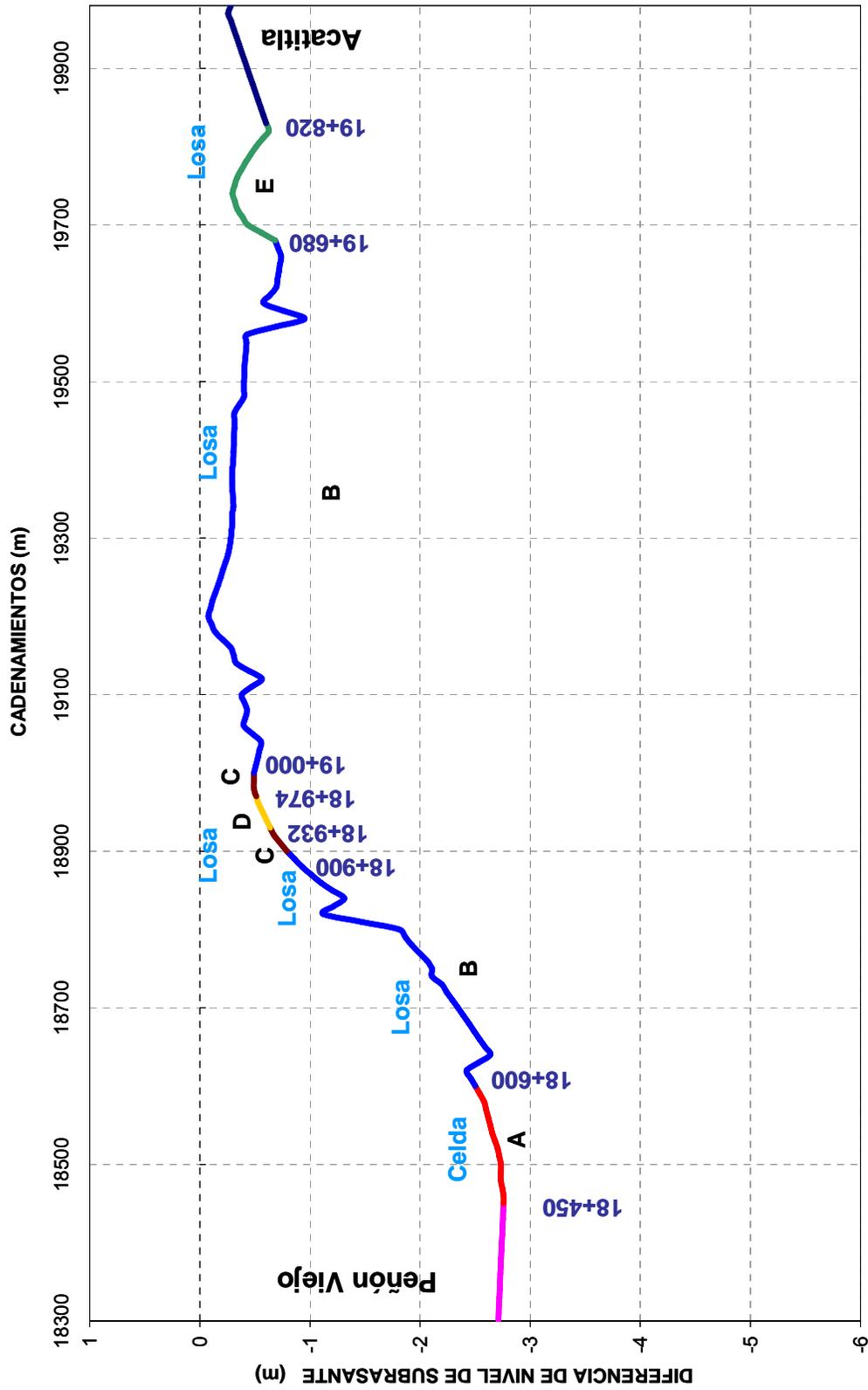


Figura IV.7 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo Peñón Viejo-Acatilla.

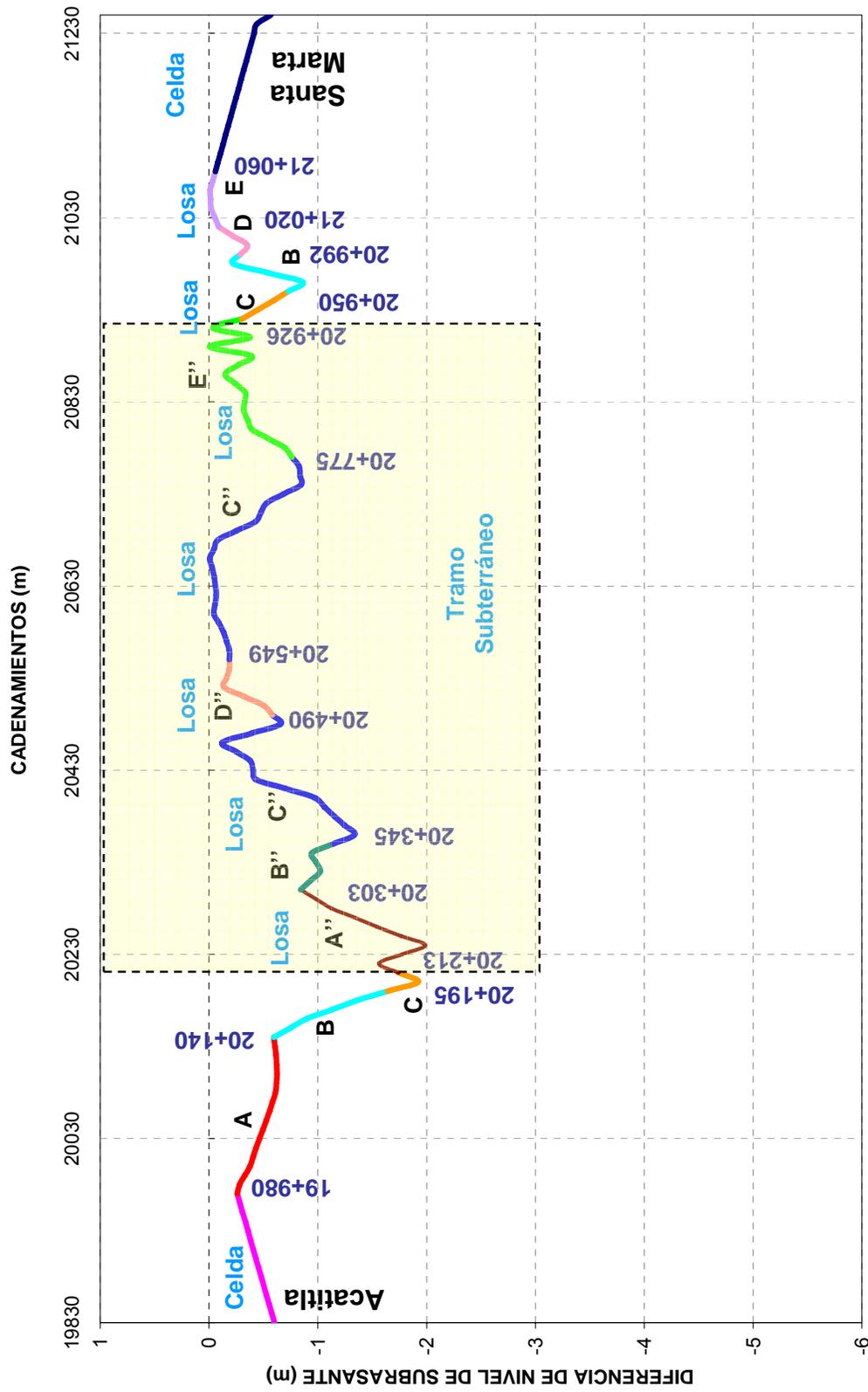


Figura IV.8 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo Acatitla-Santa Marta.

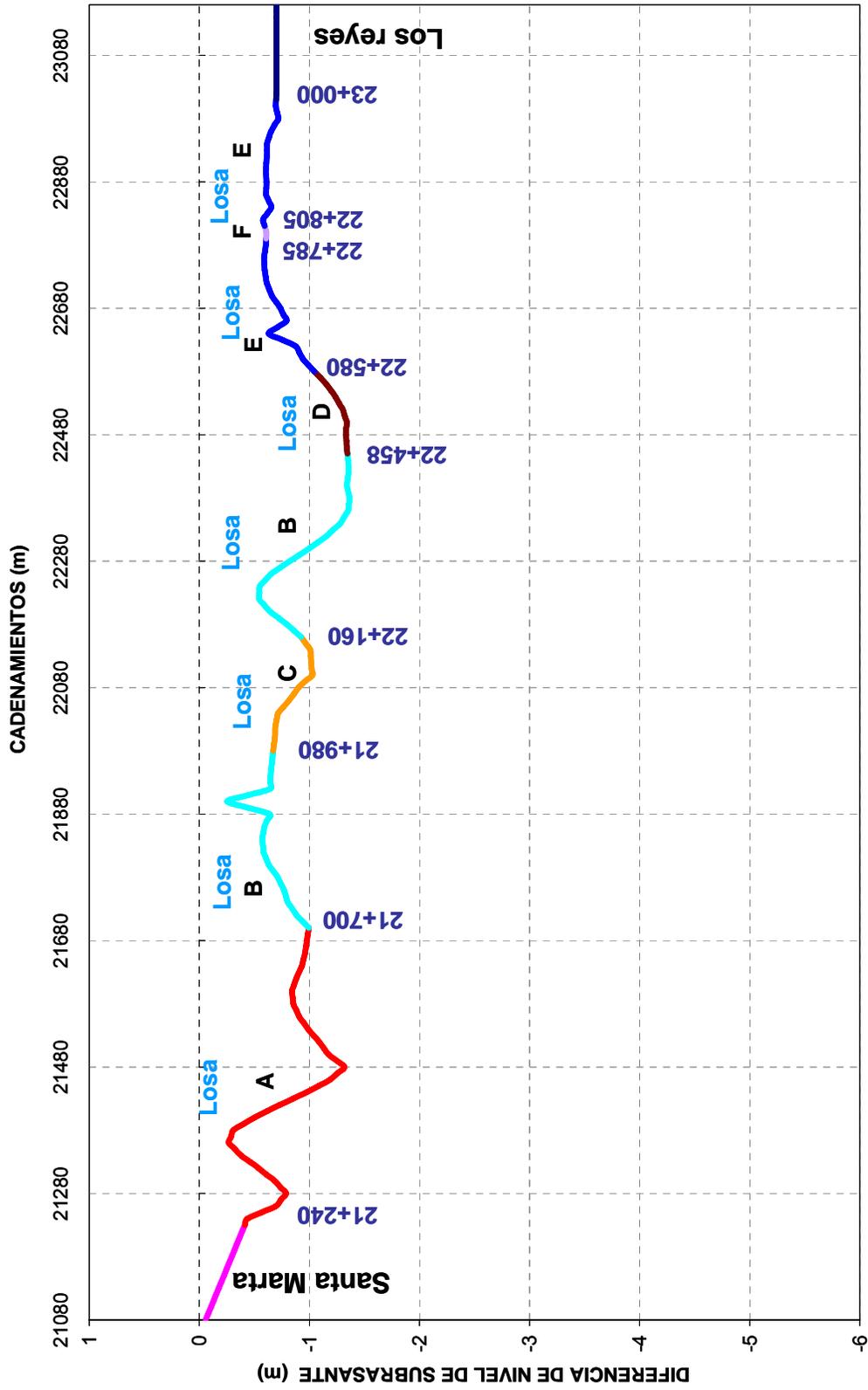


Figura IV.9 Secciones transversales del cajón del metro en el tramo Santa Marta-Los Reyes.

IV.1.3 Juntas

De acuerdo con el proyecto ejecutivo original realizado en 1987 por la compañía Colinas de Buen S.A. de C.V., existen dos tipos de juntas en los muros del cajón del metro:

- Junta constructiva (JC): Permite absorber tanto los momentos positivos como los momentos negativos; es decir tiende a ajustarse al hundimiento diferencial del subsuelo. La junta se coloca a través del muro hasta la rasante. Para las secciones compuestas por celda de cimentación, la junta atraviesa la losa inferior, Fig. IV.10.
- Junta de expansión (JE): Permite un desplazamiento horizontal por temperatura (algunos centímetros); está formada por una especie de "diente o Z invertida" que impide el desplazamiento vertical. Con este tipo de junta, los momentos positivos y negativos pueden también absorberse. Esta junta atraviesa el muro del cajón hasta el nivel de rasante. Para las secciones compuestas por celda de cimentación, la junta atraviesa la losa inferior, Fig. IV.11.

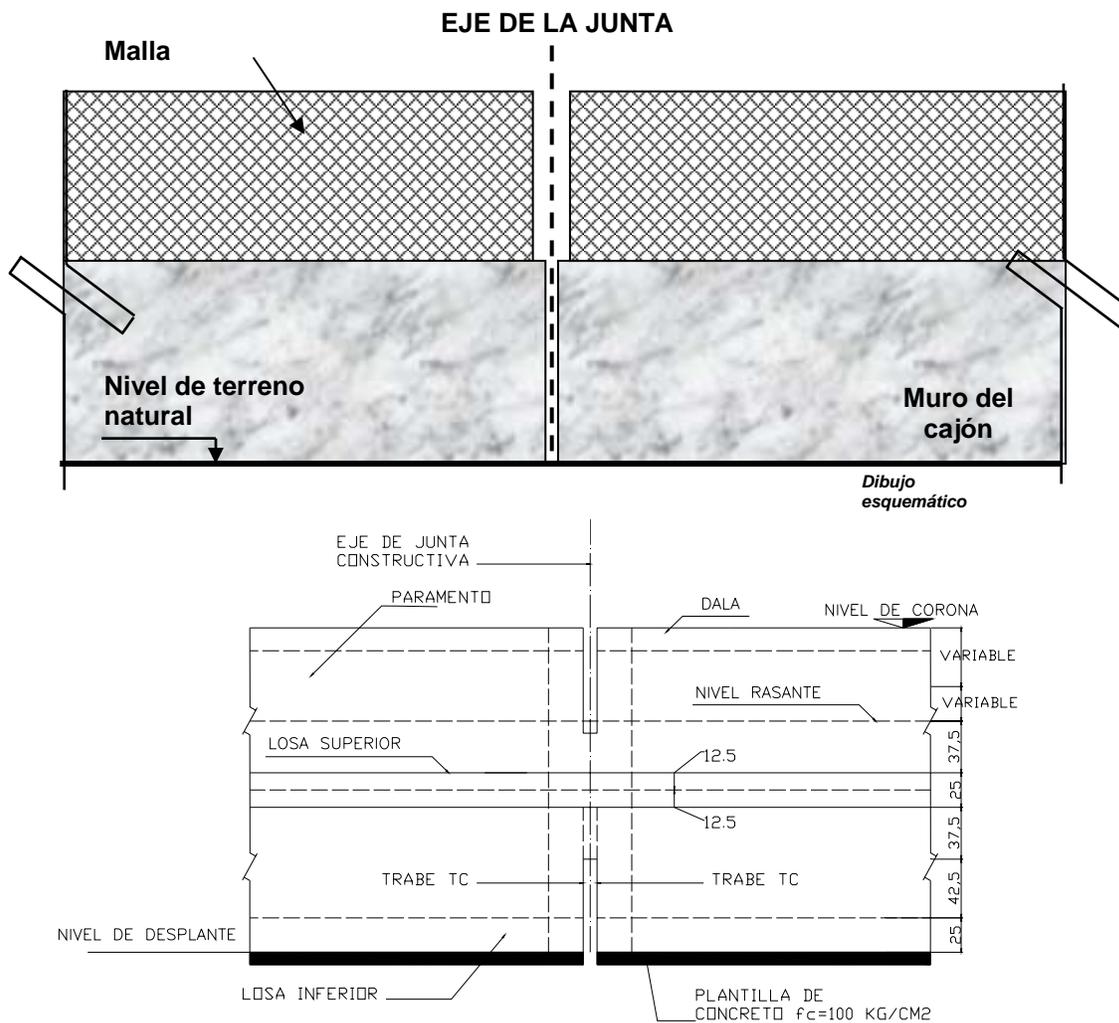


Figura IV.10 Junta de construcción tipo del muro del cajón.

CAPÍTULO IV

Las Tablas IV.2 a IV.5 presentan el tipo de juntas en el proyecto original (Colinas de Buen S.A de C.V, 1986); los trabajos de revisión y reparación realizados por la compañía IPISA (2002); las juntas construidas por el Consorcio Mexicano de Ingeniería Civil (CMIC) 2003; así como la revisión actualizada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el 2007. Las Figs. IV.12 a IV.15, permiten comparar la localización de las juntas constructivas y de expansión del proyecto original y la de las juntas construidas y modificadas por la empresa CMIC, para los tramos *Guelatao-Peñón Viejo*, *Peñón Viejo-Acatitla*, *Acatitla-Santa Marta* y *Santa Marta-Los Reyes*.

Tabla IV.2 Juntas en el tramo *Guelatao - Peñón Viejo*.

CAD.	TIPO DE JUNTA			
	1986	Oct- 2002	Abr-2003	Abr-2007
16+091.315	JE	JE		JE
16+139.315			JC	JC
16+191.315	JC	JC	JE	JE
16+241.315			JC	JC
16+291.315	JE	JE		JE
16+341.315			JC	JC
16+395.500	(16+391.315)JC	(16+391.315)JE	JE	JE
16+441.315			JC	JC
16+491.841	JE	JE		JE
16+541.841			JC	JC
16+593.291	(16+591.291)JC	(16+591.291)JC	JE	JE
16+638.200	(16+614.291)JC	JE	JE	JE
16+690.741	JE	JE		JE
16+741.741		JC	JC	JC
16+793.591	(16+791.591)JC	(16+791.591)JC	JE	JE
16+840.000	JC	JC		JC
16+890.000	JE	JE		JE
16+941.315	JC	JC		JC
16+993.315	(16+991.315)JC	(16+991.315)JC	JC	JC
17+020.000	----	JE	JE	JE
17+041.315	JC	JC		JC
17+091.315	JE	JE		JE
17+141.315	JC	JC		JC
17+193.315	(17+191.315)JC	JE	JE	JE
17+208.333		JC		JC
17+216.315	JC			JC
17+240.000	JC	JC		JC
17+291.315	JE	JE		JE
17+342.000	JC	JC		JC
17+391.315	JC	JE	JE	JE
17+440.894	JC	JC		JC
17+491.315	JE	JE		JE
17+541.315	JC	JC		JC
17+593.000	(17+591.315)JC	JE	JE	JE
17+649.000	(17+641.315)JC	JC		JC
17+691.315	JE	JE		JE
17+741.315	JC	JC		JC
17+795.000	(17+791.315)JC	JC	JE	JE
17+841.315	JC	JC		JC
17+891.315	JE	JE		JE
17+941.300	JC	JC		JC

MODELACIÓN SIMPLIFICADA DE LOS EFECTOS DEL HUNDIMIENTO EN LA ESTRUCTURA DEL METRO

CAD.	TIPO DE JUNTA			
	1986	Oct- 2002	Abr-2003	Abr-2007
17+993.000	(17+991.315)JC	JE	JE	JE
18+041.315		JC	JC	JC
18+048.315			JC	
18+091.315	JE	JE		JE
18+117.000		JC		JC
18+141.315		JC	JC	JC
18+180.000		JC		JC
18+193.000	(18+191.315)JC	JE	JE	JE
18+241.315		JC	JC	JC

(1986) : Proyecto Original, (ambos muros)

(2002) : Revisión para trabajos de reparación de IPISA, ambos muros

(2003) : Construidas y modificadas por CMIC

(2007) : Revisión actual, Instituto de Ingeniería

(JC) : Junta de construcción

(JE) : Junta de expansión

Tabla IV.3 Juntas en el tramo *Peñón Viejo – Acatitla*.

CAD	TIPO DE JUNTA					
	1986	Oct- 2002	Abr-2003	Mar. 2005 -muro sur-	Mar. 2005 -muro norte-	Abr-2007
18+447.970		JE		JE	JE	JE
18+455.000				JE	JE	JE
18+505.000		JC	JC	JC	JC	JC
18+517.970				JC	JC	JC
18+550.000		JE	JE	JE	JE	JE
18+567.970	JC	JC		JE	JE	JE
18+608.000		JC	JE	JC	JC	JC
18+617.970			JC	JC	JC	JC
18+667.97		JE		JE	JE	JE
18+670.000				JE	JE	JE
18+717.970		JC	JC	JC	JC	JC
18+767.970	JC			JC	JC	JC
18+769.970		JE	JE	JC	JC	JC
18+834.000	JE		JE	JE	JE	JE
18+840.000				JE	JE	JE
18+884.236				JC	JC	JC
18+896.000		JE	JE	JC	JC	JC
18+909.17		JC		JC	JC	JC
18+931.000		JE	JE	JC	JC	JC
19+933.936	JC			JC	JC	JC
18+983.900		JC	JC	JC	JC	JC
19+034.236	JE			JE	JE	JE
19+084.236		JC	JC	JC	JC	JC
19+132.236		JE	JE	JC	JC	JC
19+134.236				JC	JC	JC
19+183.800					JC	JC
19+184.236		JC	JC	JC	JC	JC
19+234.236	JE	JE		JE	JE	JE
19+284.000				JC	JC	JC
19+284.236			JC	JC	JC	JC
19+287.597		JC				JC
19+332.236		JE	JE	JC	JC	JC