



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

HUNDIMIENTO REGIONAL DEL VALLE DE
MÉXICO Y EL STC (ESTUDIO DE CASO,
TRAMO TERMINAL AÉREA - OCEANÍA DE
LA LÍNEA 5 DEL METRO).

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A N :

**ALICIA ESCAMILLA ESTRADA
ENRIQUE PALACIOS SÁNCHEZ**



DIRECTOR DE TESIS: ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ

MÉXICO, D.F.

2009

A nuestros hijos Enrique, Mariana y Alicia. Especialmente a los gemelitos que han estado con nosotros en las buenas y en las malas, siempre a nuestro lado sin preguntas ni reproches, siendo los mejores maestros, cuidándonos y teniendo siempre una sonrisa para nosotros, siendo un apoyo inquebrantable en todo momento, dándonos todo su amor y ternura y aguantándolo todo, los amamos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por darnos otra oportunidad para hacer lo correcto. Por haberme colocado en una familia hermosa y una madre admirable y por haberme puesto en el camino a gente buena para la cual no tengo palabras para expresar lo mucho que les estoy agradecida.

A mis hijos y esposo:

Gracias por ser mi Luz, mi paz, mi descanso, mi compañía y mi tesoro son lo mejor que la vida me ha regalado. Bebé, gracias por existir.

A mi madre:

Gracias por ser mi madre, mi ángel, mi orgullo, mi fuerza y mi amor, porque con tu ejemplo de entrega y de sacrificio, me has guiado siempre por el camino del trabajo y del amor, sin tí no hubiera logrado nada en la vida, tu apoyo y tu amor, no podré pagarlo nunca, por lo que este logro no es sólo mío, te amo mamá.

A mi padre:

No pudimos despedirnos, pero sé muy bien que no hacen falta palabras para decirte que te amo, que siempre pienso en ti, que cada vez que me faltan las fuerzas recurro a tu recuerdo y pienso en lo que me dirías y me salen las fuerzas, siempre tuviste las palabras adecuadas en los momentos adecuados, tratándome siempre como a una persona importante, tus consejos los tengo grabados en mi mente y me siguen sirviendo a estas alturas de la vida. Creo que soy como tú en muchos aspectos, y en otros he querido serlo, quisiera que mis hijos me tuvieran la misma confianza que yo te tenía. Sé que aunque no te vea estás aquí y me acompañas siempre como mi Ángel de la Guarda.

A mis hermanos:

A mi hermana por ser la mejor hermana, doy gracias a Dios por haberte enviado a mi lado, has sido muy importante en mi vida, has sido mi amiga, mi apoyo, mi hermana. Eres mi orgullo y siempre estaremos juntas, te amo, gracias por todo.

A mi hermano, por todas esas vacaciones en las que te convertiste en niño. Si bien, nunca hemos pensado de la misma manera, sé que puedo contar contigo, y eso me hace sentir muy feliz, te amo hermano.

A mi tía Hilda y la Nena:

Aunque sé que me acompañas y que sabes de sobra lo que pienso y siento, nunca tuve la oportunidad de decirte que te amo, sin saberlo, desde pequeña, con tus atenciones y tu amor me hacías la niña más feliz del mundo, gracias por amar tanto a mis hijos y haberlos cuidado para que yo pudiera seguir estudiando sacrificando tu tiempo, tu espacio y de paso el de la Nena, a la que también tengo tantas cosas que agradecer, a pesar de los años que le llevo he recibido más apoyo de ella que ella de mí, gracias Nena.

A mis tíos, Gustavo y José Luis, gracias por su apoyo, han sido un ejemplo para mí.

A mis amigos, los que me han ayudado y me han apoyado tanto y no terminaré de agradecerles, Italia, Luz y Hugo y Susana.

A Chris, Lupita y Tita, es común apoyar a las personas cercanas a uno los parientes y los amigos, pero es verdaderamente admirable cuando una persona completamente ajena a uno la ayuda o la apoya, tal como lo han hecho ustedes conmigo. Gracias a Dios por ponerlos en mi camino y les agradezco haber cuidado a mis hijos para apoyarme en mis estudios o trabajo.

Al Ing. Marcos Trejo Hernández, “mi querido profesor”, por su apoyo y dedicación para la elaboración de esta Tesis y por su amistad, gracias Marcos.

Al Ing. Luis Bernardo Rodríguez González, por sus enseñanzas, las cuales me han acompañado a lo largo de mi vida profesional, por contagiarme con su amor por la ingeniería y por colaborar para la realización de esta tesis.

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, de la cual nos sentimos orgullosos por ser universitarios y mexicanos, y por habernos abierto sus puertas y habernos ofrecido un mundo maravilloso de conocimientos y experiencias.

Alicia

A Dios:

Por darme todo lo que siempre he querido, a mis tres hijos y una esposa formidable, creo que soy afortunado, no siempre se tiene esa oportunidad de tenerte tan cerca, como yo te he tenido y te tengo, gracias.

A mis hijos:

Este trabajo realmente no es de dos sino de cinco, porque gracias a ustedes, hijos y esposa, esto no hubiera sido una realidad. Enrique, Mariana y Alicia bebé, ustedes representan el conocimiento, esfuerzo y decisión, sin estas tres cosas yo no sería quien soy, espero que éste sea un ejemplo a seguir y deseo que ustedes logren más cosas que yo, estoy seguro de que va a hacer así. El presente es un esfuerzo de todos que sin darse cuenta, han colaborado en gran parte a esto, gracias por aguantar regaños, malas decisiones, equivocaciones, para con ustedes, pero creo que es parte de la vida y sin todo esto, ustedes y yo no existiríamos. Gracias por existir los amo por siempre.

Alicia mamá:

Gracias por ser como eres, y sobre todo gracias por dejarme estar nuevamente contigo, de no ser así, no sé qué hubiera pasado con todo, creo que los dos a pesar de diferencias, peleas, al final hacemos una buena mancuerna, gracias por seguir todos mis sueños e ilusiones y sobre todo por satisfacerme y seguirme sin condición a sabiendas que quizá me vaya a equivocar, siempre me apoyas en lo bueno y en lo malo, una vez más podemos presumir a un nuevo hijo que es esta tesis, la cual representa el cariño, la buena voluntad y sobre todo las ganas que tenemos por salir adelante en las buenas y en las malas, creo que este trabajo representa más que una tesis, representa un gran esfuerzo y el sudor de doce años en donde algún día perdimos la esperanza, pero con esto vemos que esta esperanza tarde o temprano, existe si queremos y todo lo que queramos unidos tu y yo, siempre lo lograremos, esto y todo lo que nos ocurra, simplemente por dos razones por nuestros hijos y porque nos queremos. Gracias por todo esto y gracias por aguantarme. Te amo.

A mi suegra:

Gracias por ayudarnos tanto en todo este camino, pues es parte del presente trabajo, por las siguientes razones: por cuidar a esos angelitos que sin pedirlo vinieron al mundo, y que si no hubiera sido así, a nosotros nos hubiera costado un millón de veces más realizar este proyecto, gracias por alentarnos y exigirnos a su manera que siguiéramos con esto hasta concluirlo, por enseñarnos que todo se puede en esta vida, aún teniendo todo en contra, usted nos lo ha enseñado simplemente con una prueba: sus hijos, que no teniendo todo a su favor, saco adelante a tres pequeños y que si no hubiera sido por su esfuerzo y su entrega por ellos, no hubieran salido adelante, también por esa ayuda incondicional para todas las cosas y sobre todo por respetar nuestras decisiones y dar su punto de vista cuando era el preciso momento de dárselo.

Le agradezco también la confianza que usted algún día me brindó, y le agradezco haberme aceptado nuevamente en su familia, y por perdonarme todos mis errores que en su momento tuve, y por confiar nuevamente en mí. Si esto no hubiera sido así, a lo mejor esto no sería una realidad. Con todo esto simplemente le doy las gracias con todo mi corazón, y espero que el cariño que existe en esta familia aumente cada día mas todos los días, gracias por todo.....

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	
I. HISTORIA DEL TRANSPORTE COLECTIVO EN EL VALLE DE MÉXICO	1
I.1 ANTECEDENTES E HISTORIA	
I.2.1 ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN	
I.2.2 RED	
II. HUNDIMIENTO REGIONAL DEL VALLE DE MÉXICO.	17
II.1 GEOLOGÍA DEL VALLE DE MÉXICO	
II.2 ZONIFICACIÓN DEL VALLE DE MÉXICO	
II.3 ESTRATIGRAFÍA DEL VALLE DE MÉXICO	
II.4 PIEZOMETRÍA Y HUNDIMIENTO DEL VALLE DE MÉXICO	
III. PROBLEMÁTICA EXISTENTE	35
III.1 PROBLEMA GEOTÉCNICO DEL TRAMO TERMINAL AÉREA – OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO (ESTUDIO DE CASO)	
III.1.1 AGRIETAMIENTOS DEL TERRENO	
IV. ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LA PROBLEMÁTICA DEL TRAMO TERMINAL AÉREA – OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO	41
IV.1 TOPOGRAFÍA	
IV.2 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA Y SONDEOS	
IV.2.2 ESTRATIGRAFÍA DEL LUGAR	
IV.2.1 GEOLOGÍA DEL LUGAR	
IV.2.3 HUNDIMIENTO REGIONAL	
V. DIAGNÓSTICO DEL TRAMO TERMINAL AÉREA – OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO	72
V.1 DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA RESULTADO DEL ANÁLISIS TOPOGRÁFICO	
V.2 DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA RESULTADO DEL ANÁLISIS GEOTÉCNICO	

VI.	PROPUESTAS DE SOLUCIÓN DEL TRAMO TERMINAL AÉREA –OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO	81
	VI.1 SOLUCIÓN CONSISTENTE EN RENIVELACIONES PERIÓDICAS	
	VI.2 SOLUCIÓN CONSISTENTE EN DEPRIMIR EL CAJÓN Y RELLENARLO CON BALASTO	
	VI.3 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DEFINITIVA	
	VI.3.1 SOLUCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA PARA EL TRAMO DESCUBIERTO	
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA	108

INTRODUCCIÓN.

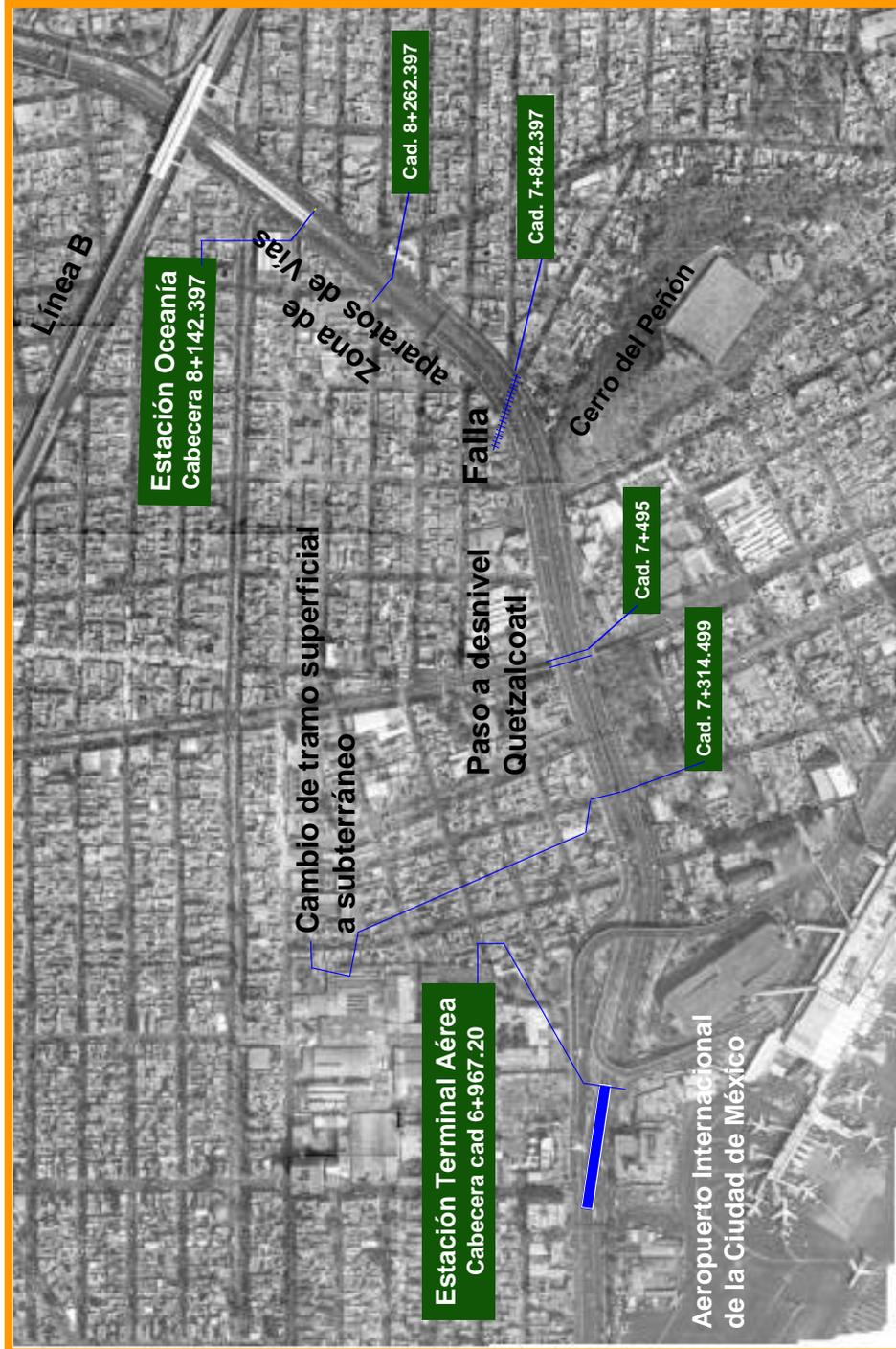
El presente trabajo de tesis tiene el objeto de analizar el proyecto de reparación para solucionar la problemática geotécnica, estructural y funcional que presenta el tramo Terminal Aérea - Oceanía de la línea 5 del Metro, el cual es solo un ejemplo de los muchos que se han tenido a lo largo del desarrollo del Plan Maestro. En esta tesis se apreciará claramente la relación del crecimiento poblacional con el crecimiento del sistema colectivo de transporte y el hundimiento regional, mismo que esta directamente relacionado con la explosión demográfica, como consecuencia de este círculo vicioso se han generado este tipo de problemáticas como también otras y de toda índole en esta ciudad.

Este tramo se encuentra comprendido entre los cadenamientos 6+967.200, correspondiente a la cabecera norte de la estación Terminal Aérea, que es subterránea, y el 8+142.397 correspondiente a la cabecera sur-oriente de la estación Oceanía que es superficial. En el cadenamiento 7+314.499 la sección cambia de cajón subterráneo a estructura superficial, es decir, 347.299 m. de estructura son subterráneos y 827.898 m. son superficiales. (Fotografía I.1)

Agradecemos la cooperación del **Sistema de Transporte Colectivo** y la **Dirección General de Construcción de Obras del Sistema de Transporte Colectivo**, quienes otorgaron los resultados de las nivelaciones con las que contaban, así como los planos correspondientes al proyecto ejecutivo que se utilizaron para su construcción. De estos documentos obtuvimos suficiente información relativa al proyecto original del tramo Terminal Aérea-Oceanía, y los cuales nos permitieron formar una idea clara al compararlos con la situación actual del comportamiento general de las estructura en toda su longitud.

No logramos obtener los perfiles de las vías correspondientes al proyecto original, sólo los correspondientes a su estado en 1991. Sin embargo, sí obtuvimos los perfiles de las vialidades laterales originales, es decir, correspondientes al año 1980. Del comportamiento de estas vialidades y la situación actual y considerando que el de las vías sería igual, se infirió el de estas en ese mismo período. Esto comparado con los perfiles actuales obtenidos por los resultados topográficos mas recientes se produjeron, finalmente, 3 perfiles que representan el comportamiento del suelo en

períodos aproximados de 10 años, y por lo tanto, el comportamiento de las estructuras del Metro ante la acción de estos movimientos.



Fotografía aérea del tramo Terminal Aérea – Oceanía
Fotografía I.1.

CAPÍTULO I

HISTORIA DEL TRANSPORTE COLECTIVO EN EL VALLE DE MÉXICO

I.1 ANTECEDENTES E HISTORIA

A lo largo de la historia, los transportes han facilitado el traslado de muchas personas, mercancías, animales y una variedad casi infinita de objetos, pero también han permitido el intercambio de ideas y costumbres, tendiendo una red de comunicación e intercambio cultural a través de distintas épocas y regiones.

Así, la historia del transporte es parte de la memoria de la ciudad, desde las canoas que navegaban por los canales de la Gran Tenochtitlan, las carrozas coloniales y las locomotoras de vapor hasta la etapa eléctrica del transporte, cuya evolución a lo largo de los tiempos ha marcado épocas inolvidables en el devenir de nuestro país.

Durante la primera mitad del siglo XIX, una vez instaurada la república, la composición geográfica y social de la ciudad de México tenía la necesidad de crear un medio de transporte para el pueblo que venía a vender o a trabajar desde lugares alejados, la solución fue encontrada en los ómnibus, que eran grandes carretones tirados por animales.

En 1856, fue un año de renovación en el que por primera vez se otorgaba una concesión para construir una línea de tranvías de tracción animal conocidos como tranvías de mulitas, los cuales sustituyeron paulatinamente al ómnibus, la proliferación de este medio de transporte trajo a la ciudad el crecimiento urbano a lo largo de sus rutas.

Cuando México surgió como nación independiente en el año 1821, los liberales de mitad del siglo XIX consideraban que el establecimiento de ferrocarriles era factor importante para el desarrollo y progreso de nuestro país y un síntoma inequívoco de modernidad.

Desde la década de 1830 se intento construir el primer ferrocarril, pero no fue sino hasta el 4 de julio de 1857, que el presidente Comonfort puso en marcha el primer tramo de la ruta entre México y la Villa de Guadalupe, que si bien fue concebida como parte del ferrocarril a Veracruz presto servicio a este importante sitio durante muchos años.

A partir de este hecho nacieron diferentes empresas de ferrocarriles, entre ellas la compañía limitada de ferrocarriles, la cual llego a ser la más grande e importante empresa del ramo y que explotaría el sistema ferroviario hasta 1896.

Mientras esto sucedía con las compañías, la ciudad y su población crecían y las diversas líneas se vieron en la necesidad de efectuar diversos cambios en su modalidad de tracción, debido a que presentaron nuevas problemáticas para el transporte urbano. Por sus características de gran peso y tamaño los ferrocarriles no tenían pleno acceso a las estrechas calles. Para dar remedio a tal situación las autoridades dispusieron que los ferrocarriles se instalaran en las periferias mientras que el servicio al interior de la ciudad lo darían coches tirados por mulas o caballos, también conocidos como tranvías de mulitas.

La llegada del siglo XX vio la instalación de los primeros tranvías eléctricos de la ciudad, que circulaban sobre las mismas vías que los de mulitas, aunque la sustitución de estos últimos por los nuevos “troleys” no termino sino hasta 1934, cuando el último tranvía de mulitas hizo su recorrido final de las calles de Guatemala, por el Carmen, hasta el barrio de Tepito.

Así, durante la primera mitad de este siglo, el transporte eléctrico compitió con un creciente número de camiones y automóviles de alquiler y particulares movidos con gasolina, iniciando la dinámica que hoy caracteriza a nuestra ciudad.

Para la segunda mitad del siglo XX la Ciudad de México presentaba graves problemas de transporte público y congestionamiento de la red vial, particularmente en la zona centro, donde se concentraba el 40% del total diario de los viajes realizados dentro de la ciudad, en este lugar y sus alrededores circulaban 65 de las 91 líneas de autobuses y transportes eléctricos de pasajeros, con cuatro mil unidades además de 150 mil automóviles particulares. En las horas pico del tráfico, la velocidad de circulación era menor a la de una persona caminando.

El principal promotor de la construcción del metro, fue el ingeniero Bernardo Quintana quien al frente de la empresa Constructores Civiles y Asociados (ICA), realiza una serie de estudios que permitirían un anteproyecto y mas tarde un proyecto de construcción de un metro para la ciudad de México, el cual se presento a diferentes autoridades del Distrito Federal, sin embargo es hasta el 29 de abril de 1967 que se publica en el Diario Oficial el decreto presidencial mediante el cual se crea un organismo publico descentralizado, el Sistema de Transporte Colectivo, con el propósito de construir, operar y explotar un tren rápido con recorrido subterráneo para el transporte publico del Distrito Federal.

Meses mas tarde el 19 de junio de 1967, en el cruce de la avenida Chapultepec con la calle de Bucareli se realiza la ceremonia de inauguración de las obras del Metro en la Ciudad de México. Dando inicio a la obra civil más grande en la historia de la ciudad, tanto por su dimensión y costo, como por el beneficio que aporta a sus habitantes.

Escasamente dos años más tarde el 4 de septiembre de 1969, un flamante convoy naranja hace el recorrido inaugural, entre las estaciones de Insurgentes y Zaragoza.

El metro es, probablemente, la obra civil y arquitectónica más grande y compleja de la Ciudad de México. Su principal característica es que esta en un proceso permanente de transformación y crecimiento, por la incorporación de nuevas tecnologías y la ampliación de la red.

Durante la década de los 80 el transporte eléctrico de la ciudad no solo se concentro en el metro, ya que fue en este tiempo cuando el Sistema de Transportes Eléctricos (STE), comenzó el reemplazo de los antiguos tranvías PCC, por uno de los símbolos característicos de esta institución, el trolebús, siendo la ultima adquisición los modernos trolebuses serie 9000, que iniciaron su operación en 1998.

Fue en el año 1984 que los últimos tranvías PCC fueron retirados del servicio que prestaban en la antigua Línea de Xochimilco, para dar paso al tren Ligero. En 1985 se inicio un proyecto para renovar el servicio en esa línea que consistió en dos etapas. Primero se acondicionó, el tramo Taxqueña – Estadio Azteca y para 1988, el de Huipulco – Xochimilco.

Los primeros vehículos que dieron vida al tren ligero utilizaron las carretillas de los antiguos tranvías PCC. No obstante, fueron sustituidos en 1995 por modernos trenes modelos TE -90 y TE – 95.

En el año de 1983 comienza la tercera etapa de expansión del Metro con la conclusión de las líneas 1, 2 y 3 y la construcción de las líneas 6 y 7, con lo que este organismo incrementa su longitud a 114.7 km y 105 estaciones en 1985. Un año más tarde comenzaría su cuarta etapa con la ampliación de las recién construidas líneas 6 y 7, además de iniciarse la construcción de la línea 9. En este periodo el Metro aumentaría su extensión 16 km y 16 estaciones más.

Finalmente en el año de 1994 se inicia la construcción de la línea B, la cual fue terminada en su totalidad en el año 2000, tiempo en el que se inauguro el segundo tramo para completar la obra. Así se configura el rostro actual del Metro de la Ciudad de México con un total de 201.3 km. De vías dobles, 11 líneas en operación, 175 estaciones, 7 talleres de mantenimiento, más de 14 mil trabajadores y un promedio de 4.2 millones de usuarios transportados diariamente.

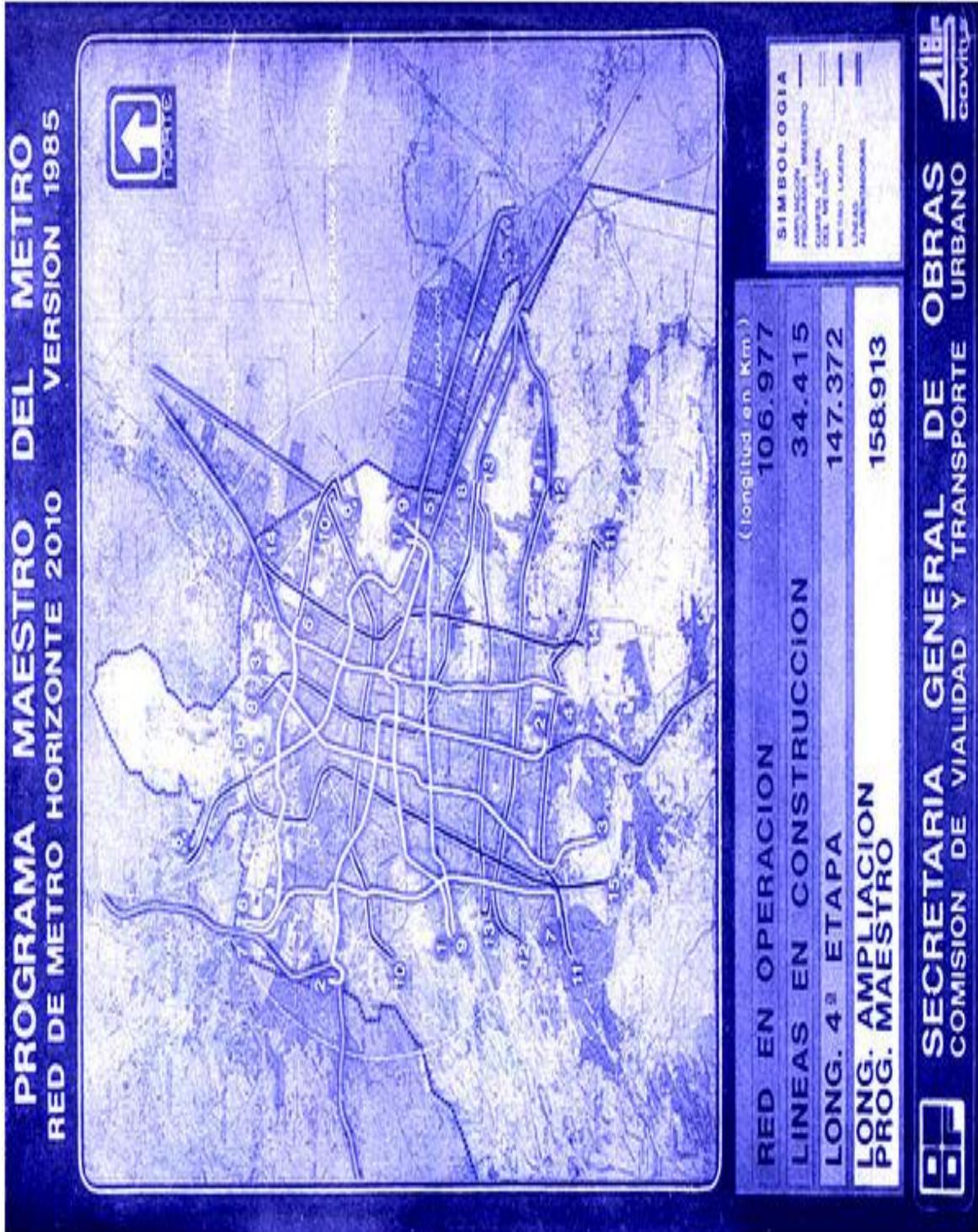
I.2 PLAN MAESTRO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO

Es un instrumento utilizado para determinar metas de movilidad a cubrir por el **Sistema de Transporte Colectivo** en diferentes horizontes a futuro. Estas metas representan las ampliaciones óptimas del servicio de acuerdo a políticas de desarrollo urbano y posibilidades de ejecución.

Bernardo Quintana Arrijoja funda y preside, en 1977, el consejo de administración de *Constructora Metro S.A. de C.V.*, el cual, en colaboración con el Departamento del Distrito Federal crean el **Plan Maestro del Metro** ese mismo año. El proyecto consideraba la construcción de 5 líneas nuevas y la ampliación de las 3 líneas construidas hasta ese año (líneas 1, 2 y 3). En total, se construirían 15 líneas con una longitud total de vía de 315 kilómetros.

En 1985 la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal presentó a través de la Comisión Vialidad de Transporte Urbano el Programa Maestro del Metro versión 1985 horizonte 2010. En este programa se estableció una longitud total del sistema de 306,285 kilómetros que incluía: 15 líneas principales de rodadura neumática; 8 líneas alimentadoras con características de tren suburbano de rodadura férrea y una línea de tren ligero. La línea B es la última ruta construida basándose en el plan de 1985; su trazo representa la unificación de los trazos de las líneas 10 y B presentadas en ese plan.

La Comisión de Vialidad y Transporte Urbano transfirió a la Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal la coordinación del Plan Maestro



del Metro y Trenes Ligeros el 1 de enero de 1995. El 1 de septiembre de 1995 esta coordinación fue transferida al **Sistema de Transporte Colectivo**.

Como parte del Programa Integral del Transporte y Vialidad 1995-2000 del Distrito Federal, en agosto de 1996, se dio a conocer el Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros versión 1996. Esta versión incluyó tres horizontes de expansión del sistema para los años 2003, 2009 y 2020, además, propuso una red de 483 kilómetros compuesta por 14 líneas de rodadura neumática, 3 de rodadura férrea y 10 líneas de tren ligero.

I.2.1 Etapas de construcción

El **Sistema de Transporte Colectivo** divide en etapas su proceso de construcción. Cada etapa está constituida por la construcción de nuevas líneas, ampliaciones e inauguraciones. Hasta el año 2000 se tienen cuantificadas 6 etapas constructivas en los siguientes intervalos: 1967-1972, 1977-1982, 1983-1985, 1985-1987, 1988-1994 y 1994-2000.

I.2.2 Red

La red del sistema de transporte colectivo (metro), está constituido por once líneas, que a continuación se describen. Actualmente se construye la línea doce que va de Mixcoac a Tlahuac, la cual se proyectó que terminaría de construirse en el año 2012.

I.2.2.1 Líneas

Línea 1

Primera línea en construirse e inaugurarse. Está integrada por 20 estaciones y su color distintivo es el rosa. Se localiza al centro de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una longitud total de vía de 18,828 kilómetros, de los cuales 16,654 kilómetros son utilizados para servicio de pasajeros y el restante para maniobras.

El primer tramo de 16 estaciones y 12,660 kilómetros de longitud, Zaragoza-Chapultepec, fue inaugurado el 4 de septiembre de 1969 por Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970 y por Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970. En 1970 se inauguran dos tramos más del sistema: el 11 de abril de 1970 (con 1,046 kilómetros) el tramo Chapultepec-Juanacatlán y el 20 de noviembre el tramo Juanacatlán-Tacubaya. Dos años después, en 1972, se suman 1,705 kilómetros a la

línea con el tramo Tacubaya-Observatorio. Finalmente el 22 de agosto de 1984 se construye el tramo Zaragoza-Pantitlán (de 2,277 kilómetros).

Tiene correspondencia con otras líneas del sistema: líneas 7 y 9 en Tacubaya; línea 3 en Balderas; línea 8 en Salto del Agua; línea 2 en Pino Suárez; línea 4 en Candelaria; línea B en San Lázaro y líneas 5, 9 y A en Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos del sistema, si se desea transbordar a la línea A desde las líneas 1, 5 ó 9, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

El tipo de construcción es subterránea a excepción de la estación Observatorio que es superficial. Está construida bajo las siguientes avenidas: Camino a Belén, Arq. C. Lazo, Av. Jalisco, Gral. Pedro Antonio de los Santos, Avenida Chapultepec, Arcos de Belén, José María Izazaga, San Pablo, Carretones, Esteban Martín, Juan Pablo II, Gral. Emiliano Zapata, Av. Ing. Eduardo Molina, Calz. Ignacio Zaragoza y Río Churubusco.

Estaciones: Observatorio, Tacubaya, Juanacatlán, Chapultepec, Sevilla, Insurgentes, Cuauhtémoc, Balderas, Salto del Agua, Isabel la Católica, Pino Suárez, Merced, Candelaria, San Lázaro, Moctezuma, Balbuena, Blvd. Puerto Aéreo, Gómez Farías, Zaragoza y Pantitlán.

Línea 2

Segunda línea del sistema en inaugurarse. Está integrada por 24 estaciones y su color distintivo es el azul. Está construida al centro de la Ciudad de México con dirección sur-norte de Taxqueña a Zócalo y dirección oriente-poniente de Allende a Cuatro Caminos. Tiene una longitud total de vía de 23,432 kilómetros, de los cuales 20,713 son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante para maniobras o mantenimiento. La línea en su tramo Zócalo-Taxqueña fue construida en el derecho de vía del antiguo tranvía, que corría del Zócalo de la Ciudad de México hacia el Centro Histórico de Tlalpan, al sur de la ciudad.

El primer tramo de 11 estaciones y 11,321 kilómetros de longitud, Taxqueña-Pino Suárez, fue inaugurado el 1 de agosto de 1970 por Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970 y por Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970. Un mes después, el 14 de septiembre de 1970, se inauguran 11 estaciones más en el tramo Pino Suárez-Tacuba (de 8,101 kilómetros de longitud). El 22 de agosto de 1984 se inaugura el tramo final de Tacuba a Cuatro Caminos, con 2 estaciones y 4,009 kilómetros de longitud.

Tiene correspondencia con otras líneas del sistema: línea 7 en Tacuba; línea 3 en Hidalgo; línea 8 en Bellas Artes; línea 1 en Pino Suárez y líneas 8 y 9 en Chabacano.

El 20 de octubre de 1975 ocurrió un choque de trenes en la estación Viaducto: un tren que se encontraba estacionado fue alcanzado por otro en movimiento. El fuerte impacto ocasionó 27 muertos y varios heridos. En consecuencia, el Sistema de Transporte Colectivo implementó un sistema de piloto automático, puestos de mando central y semáforos para controlar la velocidad y posición de los trenes en todo el sistema. Además, se incluyó en cada tren una caja negra para registrar cualquier incidente.

La construcción de la línea es superficial de Taxqueña a San Antonio Abad y subterránea de Pino Suárez a Cuatro Caminos. Está construida en las avenidas: Calz. San Bartolo Naucalpan, Calz. México - Tacuba, Ribera de San Cosme, Puente de Alvarado, Av. Hidalgo, Tacuba, República de Guatemala, Seminario, Calz. Pino Suárez, San Antonio Abad, Calz. de Tlalpan y Puerto Rico.

Estaciones: Cuatro Caminos, Panteones, Tacuba, Cuitláhuac, Popotla, Colegio Militar, Normal, San Cosme, Revolución, Hidalgo, Bellas Artes, Allende, Zócalo, Pino Suárez, San Antonio Abad, Chabacano, Viaducto, Xola, Villa de Cortés, Nativitas, Portales, Ermita, General Anaya y Taxqueña.

Línea 3

Tercera línea del sistema en inaugurarse. Posee 21 estaciones y su color distintivo es el verde olivo. Se localiza al centro de la Ciudad de México con dirección norte-sur. Su longitud total de vía es de 23,609 kilómetros, de los cuales 21,278 kilómetros se utilizan para transporte de pasajeros y el restante para maniobras o mantenimiento.

El primer tramo de 5,441 kilómetros de longitud y 7 estaciones, Tlatelolco-Hospital General, fue inaugurado el 20 de noviembre de 1970 por Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970 y por Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970. Entre 1978 y 1980, durante la presidencia de José López Portillo y Pacheco y la regencia de Carlos Hank González, la línea tuvo 4 expansiones: Tlatelolco-La Raza (25 de agosto de 1978) con 1,389 kilómetros y 1 estación; La Raza-Indios Verdes (1 de diciembre de 1979) con 4,901 kilómetros y 3 estaciones; Hospital General-Centro Médico (7 de junio de 1980) con 0,823 kilómetros y 1 estación y Centro Médico-Zapata (25 de agosto de 1980) con 4,504 kilómetros y 4 estaciones. Finalmente, el 30 de agosto de 1983, Miguel de la

Madrid Hurtado, Presidente de México de 1982 a 1988, inaugura el tramo Zapata-Universidad de 6,551 kilómetros con 5 estaciones.

Tiene correspondencia con las siguientes líneas: línea 6 en Deportivo 18 de marzo; línea 5 en La Raza; línea B en Guerrero; línea 2 en Hidalgo; línea 1 en Balderas y línea 9 en Centro Médico.

El tipo de construcción de la línea es superficial en el tramo Indios Verdes-Potrero y la estación Universidad. El resto de la línea es subterránea. Está construida en el trazo de las avenidas: Avenida de los Insurgentes Norte, Calz. Vallejo, Zoltan Kodaly, Zarco, Balderas, Niños Héroes, Dr. Pasteur, Av. Cuauhtémoc, Av. Universidad, Av. Copilco, Pedro Henríquez Ureña y Av. Antonio Delfín Madrigal.

Estaciones: Indios Verdes, Deportivo 18 de marzo, Potrero, La Raza, Tlatelolco, Guerrero, Hidalgo, Juárez, Balderas, Niños Héroes, Hospital General, Centro Médico, Etiopía, Eugenia, División del Norte, Zapata, Coyoacán, Viveros, Miguel Ángel de Quevedo, Copilco y Universidad.

Línea 4



Tren modelo CNCF NM-73 rehabilitado por técnicos del STC en la estación Candelaria de la línea 4

Cuarta línea del sistema en inaugurarse. La integran 10 estaciones y su identidad gráfica utiliza el color cian. Su trazo recorre el centro de la Ciudad de México con dirección norte-sur. Posee una longitud total de vía de 10,747 kilómetros de los cuales 9,363 kilómetros se emplean para el servicio de pasajeros, el restante se emplea para maniobras.

Fue inaugurada en dos tramos por José López Portillo y Pacheco, Presidente de México de 1976 a 1982: Martín Carrera-Candelaria el 29 de agosto de 1981 (7,499 kilómetros y 7 estaciones) y Candelaria-Santa Anita el 26 de mayo de 1982 (3,248 kilómetros y 3 estaciones).

Tiene correspondencias con las siguientes líneas: línea 6 en Martín Carrera; línea 5 en Consulado; línea B en Morelos; línea 1 en Candelaria; línea 9 en Jamaica y línea 8 en Santa Anita.

De acuerdo a estadísticas del Sistema de Transporte Colectivo es considerada una línea de baja afluencia de pasajeros, por ese motivo se emplean trenes de 6 carros.

Fue la primer línea en emplear la solución de viaducto elevado. Únicamente las estaciones Martín Carrera y Candelaria son de tipo superficial. Está construida sobre las avenidas: Ferrocarril Hidalgo y Av. Congreso de la Unión.

Estaciones: Martín Carrera, Talismán, Bondonjito, Consulado, Canal del Norte, Morelos, Candelaria, Fray Servando, Jamaica y Santa Anita.

Línea 5

Quinta línea en inaugurarse. Está integrada por 13 estaciones y su color distintivo es el amarillo. Su trazo recorre el oriente y norponiente de la Ciudad de México. Tiene una longitud total de vía de 15,675 kilómetros, de los cuales 14,435 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El primer tramo inaugurado fue Pantitlán-Consulado, el 19 de diciembre de 1981; tenía una longitud de 9,154 kilómetros y 7 estaciones. Fue inaugurado durante el sexenio presidencial (1976 a 1982) de José López Portillo. Las obras de ampliación continuaron hacia el norponiente de la Ciudad de México y siete meses después, el 1 de julio de 1982, se inauguró el tramo entre las estaciones La Raza y Consulado acumulando así 12,242 kilómetros de vía y 10 estaciones. Finalmente, el 30 de agosto de 1982 se inauguró el tramo, con una longitud de 3,433 kilómetros, La Raza-Politécnico.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 6 en Instituto del Petróleo; línea 3 en La Raza; línea 4 en Consulado; línea B en Oceanía y con las Líneas 1, 9 y A en Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos en el sistema, si se desea transbordar a la línea A desde las líneas 1, 5 ó 9, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

El tipo de construcción es superficial entre las estaciones Politécnico a La Raza, Consulado a Oceanía y la estación Pantitlán; es subterránea de Misterios a Valle Gómez y Terminal Aérea a Hangares. La línea está construida en las avenidas: Eje Central Lázaro Cárdenas, Av. 100 Metros,

Paganini, Av. Río Consulado, Blvr. Puerto Aéreo, Fuerza Aérea Mexicana, Manuel LeBrija y Talleres Gráficos.

Estaciones: Politécnico, Instituto del Petróleo, Autobuses del Norte, La Raza, Misterios, Valle Gómez, Consulado, Eduardo Molina, Aragón, Oceanía, Terminal Aérea, Hangares y Pantitlán.

Línea 6

Sexta línea en ser construida. La integran 11 estaciones y su color distintivo es el rojo. Está ubicada al norte de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Su longitud total de vía es de 13,947 kilómetros, de los cuales 11,434 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El tramo El Rosario-Instituto del Petróleo, de 9,264 kilómetros y 7 estaciones, fue inaugurado el 21 de diciembre de 1983 por Miguel de la Madrid Hurtado, Presidente de México de 1982 a 1988. Finalmente, el 8 de julio de 1986 se inauguran 4,683 kilómetros y 4 estaciones más (de Instituto del Petróleo a Martín Carrera) hacia el oriente de la ciudad.

Tiene correspondencia con otras líneas: línea 7 en El Rosario; línea 5 en Instituto del Petróleo; línea 3 en Deportivo 18 de marzo y línea 4 en Martín Carrera.

De acuerdo a estadísticas del Sistema de Transporte Colectivo es considerada una línea de baja afluencia de pasajeros, por ese motivo se emplean trenes de 6 carros.

El tipo de construcción es superficial para la estación El Rosario; es subterránea el resto de la línea. Está construida en las avenidas: Tierra Colorada, Av. Aquiles Serdán, Av. Ahuehuetes, Esperanza, Refinería Azcapotzalco, Antigua Calz. de Guadalupe, Calz. Azcapotzalco La Villa, Poniente 134, Ricarte, Colector 13, Ricarte y Alberto Herrera.

Estaciones: El Rosario, Tezozómoc, Azcapotzalco, Ferrería, Norte 45, Vallejo, Instituto del Petróleo, Lindavista, Deportivo 18 de marzo, La Villa-Basílica y Martín Carrera.

Línea 7

Fue la séptima línea del sistema en ser inaugurada. Está integrada por 14 estaciones y su color distintivo es el naranja. Su trazo se encuentra al poniente de la Ciudad de México con dirección norte-sur. Tiene una longitud

total de vía de 18,784 kilómetros, de los cuales 17,011 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

La línea fue inaugurada en 4 tramos durante el sexenio presidencial (1982-1988) de Miguel de la Madrid Hurtado: Tacuba-Auditorio, el 20 de diciembre de 1984, con 5,424 kilómetros y 4 estaciones; Auditorio-Tacubaya, el 22 de agosto de 1985, con 2,730 kilómetros y 2 estaciones; Tacubaya-Barranca del Muerto, el 19 de diciembre de 1985, con 5,040 kilómetros y 4 estaciones; Tacuba-El Rosario, el 29 de noviembre de 1988, con 5,590 kilómetros y 4 estaciones.

Tiene correspondencia con otras líneas: línea 6 en El Rosario, línea 2 en Tacuba y con las líneas 1, 9 en Tacubaya.

El trazo de la línea se proyectó al pie de las estribaciones de la *Sierra de las Cruces*, una que zona se encuentra a mayor altitud que la Ciudad de México. Para compensar la variación de altitudes, se decidió construir la línea a 35 metros bajo la superficie por medio de un escudo excavador. La técnica requiere el empleo de dovelas de concreto prefabricadas para estabilizar el túnel. Las dovelas inferiores soportan los rieles y la barra alimentadora de tensión, por ese motivo se prescindió del uso de balasto.

La estación terminal El Rosario es la única de tipo superficial en toda la línea. La línea está construida bajo las avenidas: Tierra Colorada, Av. Aquiles Serdán, Av. Ferrocarriles Nacionales, Golfo de Adén, Lago Chiem, Lago Helmar, Av. Río San Joaquín, Lago Onega, Arquímedes, Calz. Chivatito, Calz. Molino del Rey, Av. Parque Lira, Puente de la Morena y Av. Revolución.

Estaciones: El Rosario, Aquiles Serdán, Camarones, Refinería, Tacuba, San Joaquín, Polanco, Auditorio, Constituyentes, Tacubaya, San Pedro de los Pinos, San Antonio, Mixcoac y Barranca del Muerto.

Línea 8

Fue la décima ruta de la red en ser inaugurada. Está integrada por 19 estaciones y su color distintivo es el verde. Su trazo se encuentra localizado al centro y sur oriente de la Ciudad de México. Tiene dirección oriente-poniente entre las estaciones Constitución de 1917-Atlalilco y dirección norte-sur entre Escuadrón 201-Garibaldi . Tiene una longitud total de vía de 20,078 kilómetros, de los cuales 17,679 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El Sistema de Transporte Colectivo denomina *Quinta Etapa del Metro* al intervalo entre los años 1988 y 1994. Durante esta *Etapa* se planeó el trazo de la ruta de la estación Indios Verdes a la colonia *Ejército Constitucionalista*, pasando por el Centro Histórico de la Ciudad de México. Bajo el argumento del posible daño que sufrirían edificios coloniales y prehispánicos, presentes en el primer cuadro de la ciudad, el trazo y fecha de inicio de la obra fueron modificados.

El 20 de julio de 1994 fue inaugurada por Carlos Salinas de Gortari, Presidente de México de 1988 a 1994, y Manuel Aguilera Gómez, Regente del Distrito Federal de 1993 a 1994.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 4 en Santa Anita; líneas 2 y 9 en Chabacano; línea 1 en Salto del Agua; línea 2 en Bellas Artes y línea B en Garibaldi.

El tipo de construcción es superficial en el tramo Aculco-Coyuya y la estación Constitución de 1917; el resto de la línea es de tipo subterránea. La línea está construida en las siguientes avenidas: Av. Paseo de la Reforma (solo estación Garibaldi), Eje Central Lázaro Cárdenas, Juan A. Mateos, Prol. José Tomás Cuellar, Calz. de la Viga, Viaducto, Coyuya, Hidalgo, Centeno, Violeta, Francisco del Paso y Troncoso, Avenida 5 y Av. Ermita Iztapalapa.

Estaciones: Garibaldi, Bellas Artes, San Juan de Letrán, Salto del Agua, Doctores, Obrera, Chabacano, La Viga, Santa Anita, Coyuya, Iztacalco, Apatlaco, Aculco, Escuadrón 201, Atlalilco, Iztapalapa, Cerro de la Estrella, UAM-I y Constitución de 1917.

Línea 9

Octava línea en inaugurarse. Está integrada por 12 estaciones y su color distintivo es el café. Su trazo se localiza al centro de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una longitud de vía de 15,375 kilómetros, de los cuales 13,033 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El primer tramo inaugurado, Pantitlán-Centro Médico, el 26 de agosto de 1987 contaba con una longitud de 11,669 kilómetros y 9 estaciones; se inauguró durante el sexenio presidencial (1982-1988) de Miguel de la Madrid Hurtado. El segundo tramo fue inaugurado el 29 de agosto de 1988, de Centro Médico a Tacubaya, con una longitud de 3,706 kilómetros y 3 estaciones.

Tiene correspondencia con otras líneas: líneas 1 y 7 en Tacubaya; línea 3 en Centro Médico; líneas 2 y 8 en Chabacano; línea 4 en Jamaica y líneas 1, 5 y A en Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos en el sistema, si se desea transbordar a la línea A desde las líneas 1, 5 ó 9, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

El tipo de construcción es subterráneo en el tramo Tacubaya-Mixiuhca. De Velódromo a Pantitlán es viaducto elevado. La línea está construida en las avenidas: José Martí, Gral. Francisco Murguía, Benjamin Franklin, Av. Baja California, Av. Dr. Ignacio Morones, José Peón Contreras, Calz. Chabacano, Av. Morelos, Viaducto y Río Churubusco.

Estaciones: Tacubaya, Patriotismo, Chilpancingo, Centro Médico, Lázaro Cárdenas, Chabacano, Jamaica, Mixiuhca, Velódromo, Ciudad Deportiva, Puebla y Pantitlán.

Línea A

Novena línea del sistema en ser inaugurada. Está integrada por 10 estaciones y su color distintivo es el morado. Su trazo se localiza al sur-orientado de la Ciudad de México con dirección predominante oriente-poniente. Tiene una longitud de vía de 17,192 kilómetros, de los cuales 14,893 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.^[15] Se distingue del resto de las líneas por tener trenes de 6 carros de rodadura férrea alimentados por catenaria.

Fue inaugurada por Carlos Salinas de Gortari, Presidente de México de 1988 a 1994 y Manuel Camacho Solís, Regente del Distrito Federal de 1988 a 1993, el 12 de agosto de 1991.

Tiene correspondencia con las líneas 1, 5 y 9 en la estación Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos en el sistema, si se desea transbordar a las líneas 1, 5 ó 9 desde la línea A, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

En 1985 la desaparecida *Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR)*, dependiente de la *Secretaría General de Obras* del Distrito Federal, dió a conocer el *Programa Maestro del Metro Horizonte 2010*. En esta versión se determinó construir 8 *líneas alimentadoras* que tendrían como característica particular ser una transición entre el Metro *convencional* y un ferrocarril suburbano. La transición consistiría en: diseñar trenes de

rodadura férrea de seis vagones (con posibilidad de aumentar hasta nueve); de dimensiones similares a los de rodadura neumática empleados en el sistema desde 1969; tomarían por medio de un pantógrafo la tensión suministrada por una catenaria; dada su función de *línea alimentadora*, al extenderse hacia zonas suburbanas en el Estado de México, se debería comprar un boleto más para abordar a las *líneas principales* (líneas del Metro con trazo predominante en el centro de la Ciudad de México) y para distinguirlas de las *principales* se emplearía nomenclatura por letras.¹

Del proyecto de *líneas alimentadoras* únicamente se logró construir la **línea A** (con una modificación en su trazo oriente). En posteriores revisiones del *Plan Maestro del Metro* se consideró sustituir las *líneas alimentadoras* por líneas de tren ligero o por expansiones de las líneas de rodadura neumática existentes.

La estación terminal Pantitlán es subterránea, el resto de la línea es superficial. La línea está construida en las siguientes avenidas: Río Churubusco, Calz. Ignacio Zaragoza, Av. Puebla, Generalísimo Morelos y Vías Férreas del Sur.

Estaciones: Pantitlán, Agrícola Oriental, Canal de San Juan, Tepalcates, Guelatao, Peñón Viejo, Acatitla, Santa Marta, Los Reyes y La Paz.

Línea B

Undécima línea en inaugurarse. Está integrada por 21 estaciones y es la única del sistema en utilizar en su identidad gráfica dos colores: verde y gris. Su trazo se localiza en el centro y nororiente de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente de Buenavista a San Lázaro y dirección sur-norte de Ricardo Flores Magón a Ciudad Azteca. Tiene una longitud total de vía de 23,722 kilómetros, de los cuales 20,278 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

La línea fue inaugurada en 2 tramos: el primer tramo inaugurado por Ernesto Zedillo Ponce de León, Presidente de México de 1994 a 2000, y Rosario Robles Berlanga, Jefe de Gobierno del Distrito Federal de 1999-2000 fue Buenavista-Villa de Aragón, el 15 de diciembre de 1999 (de 12,139 kilómetros y 13 estaciones). El segundo tramo, Villa de Aragón-Ciudad Azteca, inaugurado el 30 de noviembre de 2000 sumó a la línea 11,583 kilómetros y 8 estaciones.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 3 en Guerrero, línea 8 en Garibaldi, línea 4 en Morelos, línea 1 en San Lázaro y línea 5 en Oceanía.

En 1985 el *Programa Maestro del Metro Horizonte 2010* propuso el trazo de la *Línea 10* desde la colonia *Los Morales* en la Delegación Miguel Hidalgo hasta la colonia *Villa de Aragón* en los límites de la Delegación Gustavo A. Madero y el Municipio de Nezahualcóyotl (Estado de México). Para alimentar esta línea sería necesario construir una *línea alimentadora* similar a la línea A. La *línea alimentadora* tendría la nomenclatura *Línea B* y partiría desde la colonia *Villa de Aragón* hacia la colonia *Ciudad Azteca* (en el Estado de México).

El proyecto final comenzó a construirse en 1994 con diversos cambios: la línea no tendría su estación terminal poniente en la colonia *Los Morales* sino en la estación Buenavista cerca de la Avenida de los Insurgentes y la estación terminal nororiente sería Ciudad Azteca; no se emplearían trenes de rodadura férrea sino neumáticos; por tratarse de la fusión de dos proyectos, *línea B* y *línea 10*, la identidad gráfica tendría dos colores (verde y gris); la línea se llamaría en su totalidad *Línea B* y no se necesitaría comprar un boleto más para efectuar transbordos a otras líneas (como ocurre en la línea A).

De la terminal Buenavista a la estación Morelos la línea es subterránea. La línea viaja a través de viaducto elevado de San Lázaro a Oceanía. De Deportivo Oceanía a la terminal Ciudad Azteca la línea es superficial. La línea está construida en las avenidas: Mosqueta, Rayón, Héroe de Granaditas, Av. del Trabajo, Albañiles, Av. Ing. Eduardo Molina, Artilleros, Oceanía, Av. 608 y Av. Central.

Estaciones: Buenavista, Guerrero, Garibaldi, Lagunilla, Tepito, Morelos, San Lázaro, Ricardo Flores Magón, Romero Rubio, Oceanía, Deportivo Oceanía, Bosque de Aragón, Villa de Aragón, Nezahualcóyotl, Impulsora, Río de los Remedios, Múzquiz, Ecatepec, Olímpica, Plaza Aragón y Ciudad Azteca.

CAPÍTULO II.

HUNDIMIENTO REGIONAL DEL VALLE DE MÉXICO.

Es necesario repasar la historia geológica del Valle de México, así como el hundimiento regional, ya que son el origen de esta problemática como veremos en el capítulo tres.

II.1. GEOLOGÍA DEL VALLE DE MÉXICO

La historia geológica del Valle de México data del Terciario Medio, en el cual, gracias a los movimientos tectónicos, emergieron grandes cantidades de lavas formando la Sierra de Xochitepec, localizada al Sur de Xochimilco, parte de la Sierra de Guadalupe y en las cuales podemos encontrar desde andesitas basálticas, andesitas francas conanfíbolas y piroxenas, dacitas y latitas, con espesores mayores a 1500 m, localizadas a las faldas del Iztacihualt y del Ajusco y al término de Mioceno se presentó un periodo de erosión intensa.

El período denominado Plioceno marca las principales características orográficas actuales del Valle he inicia en la región de Pachuca y en la Sierra de Guadalupe. En el período del Plioceno Inferior la actividad volcánica fue muy fuerte, esto se sabe por los depósitos que dejaron estas actividades como: lavas dácticas y riolíticas en el cerro del Chiquihuite, derrames andesíticos de la Sierra Nevada y de las cruces primero y después del Ajusco y del Iztacihuatl, al mismo tiempo se formaron algunos volcanes como el que ahora conforman los cerros del Peñón de los Baños el Tigre y parte de la Sierra de Guadalupe con andesitas oscuras.

En el Plioceno superior se crea la división al norte de la cuenca gracias a los derrames de andesita basáltica. Gracias a la falla del Clarión se originan fracturas que van de NNW a SSE al mismo tiempo nubes ardientes dejaron depósitos de piedra cantera alrededor del Centro del Guajolote y al norte del Santuario de los Remedios.

En este mismo periodo predomina un clima semiárido acompañado de lluvias torrenciales que erosionaron el terreno abrupto, de los depósitos generados se obtuvo la formación Tarango, cuya característica principal es

la ausencia de lavas. Contiene en su parte más superficial arena cementada con carbonato de calcio, limo en las capas superiores y grava en las inferiores; la cual constituye la primera capa dura. Además de estos suelos, en esta formación encontramos ceniza volcánica blanca del tamaño de arena fina incrustada en ella arcilla lacustre con alto contenido de agua.

Los mas importantes del periodo siguiente llamado Pleistoceno fue, que gracias a la humedad y las bajas temperaturas que se presentaron durante este periodo, se propicio la formación de grandes glaciares en el Iztacihuatl y el Popocatepetl, los cuales al deshielarse destruyeron la formación Tarango antes mencionada dando origen a las actuales barrancas del poniente de la ciudad, así como los dos valles en donde desaguaban por el sur del río Amacuzac. Estos valles se encuentran situados al occidente del valle y abarcaba desde Pachuca hasta la ciudad de México, extendiéndose inclusive de Cuernavaca y la sierra del Tepozteco, el segundo al oriente de lo que es ahora la Ciudad de México, nacía al pie de la Sierra Nevada, atravesaba Chalco y Amecameca, alcanzando la cuenca del Alto Amacuzac en Cuautla; ejemplo de estas erosiones ocurridas en el Pleistocenos son los cañones de Contreras y de San Rafael.

En este periodo se formaron los cerros de Chiconautla y la Estrella, con capas de basalto pómez originadas al norte de la cuenca por la actividad volcánica y traídas hacia el sur. De esta manera se iba formando la cuenca y se serró por las erupciones volcánicas del Chichinautzin, cuyos espesores de lava arrojada alcanzaron los 2000 m.

FORMACIÓN DEL SUBSUELO DEL VALLE DE MÉXICO

El subsuelo del actual Valle de México empezó a formarse gracias a la obstrucción del drenaje, de tal manera que los depósitos fluviales (limo-arenoso), se interestratificaron con suelos y capas de cenizas y pómez provenientes de las erupciones volcánicas originadas en el sur, rellenándose primero las zonas abruptas (serie clásica fluvial aluvial del Pleistoceno).

FORMACIÓN TACUBAYA. Posteriormente se presento un intenso depósito de cenizas volcánicas en el periodo denominado Tacubaya, acompañado de un periodo seco, el cual dio origen a suelos cementados con caliche.

FORMACIÓN BECERRA. Seguida a la formación Tacubaya tenemos la formación Becerra, que se caracteriza por tener estratos de aluvión y polvo volcánico con alto contenido de fósiles.

FORMACIÓN TOTOLSINGO. El clima árido que siguió dejó como huella la presencia de caliche que dio lugar a esta formación, en la que el material orgánico se presenta en tierras de color café y negro.

Posteriormente durante la época arqueológica se tiene la presencia de arenas con tepalcates y restos de las civilizaciones que se asentaron en el Valle. De las últimas manifestaciones del vulcanismo son la del Xitli al pie del Ajusco que apareció hace 2400 años aproximadamente y varias erupciones del Popocatepetl, siendo la más reciente en enero del 2001.

La primer causa de que la cuenca del Valle de México ya no sea una cuenca cerrada es que en 1789 se abrió el tajo Nochistongo, más adelante, la aparición de la civilización moderna ha cambiado la naturaleza de la cuenca.

El Valle de México, sigue teniendo cambios geológicos tanto por razones meramente naturales como las erupciones de los volcanes que aún están activos como el Popocatepetl, así como por los cambios originados por el hombre.

De tal manera que el Valle de México está limitado hacia el Norte por las Sierras de Tepozotlan, Tezontlapan y Pachuca, al este por los llanos de Apan y la Sierra Nevada, al Sur por las Sierras de Cuauhtzin y Ajusco y al oeste por las Sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo (figuras II.1 y II.2). De los 7160 Km, 3080 corresponden a áreas montañosas y el D.F. ocupa 1480 Km. en la región suroeste del Valle.



Fig. II.1 Planta de la cuenca

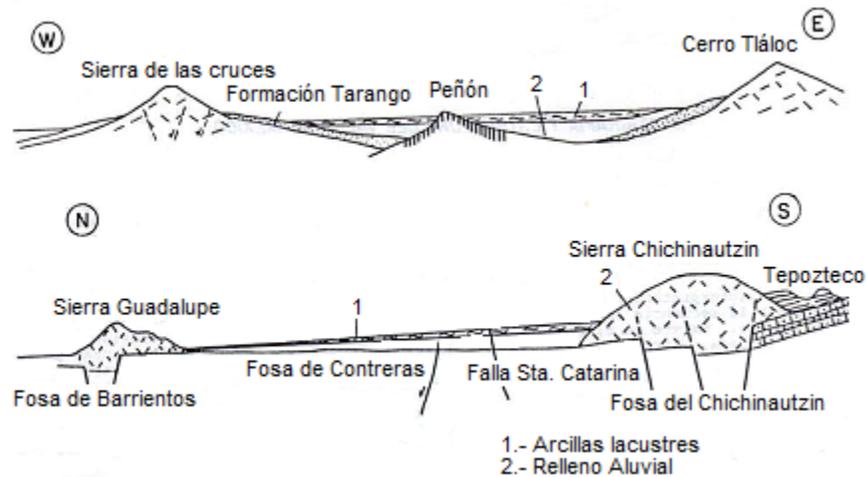


Fig. II.2 Corte de la cuenca

II.2 ZONIFICACIÓN DEL VALLE DE MÉXICO

En la Ciudad de México se distinguen tres zonas (figura II.3), de acuerdo al tipo de suelo:

La zona I, firme o de lomas. Parte de la ciudad esta asentada en las faldas del cerro de las Cruces, formadas por suelos compactos, areno limosos con alto contenido de gravas y tobas pumíticas bien cementadas. Al Sur de la ciudad, la urbe invade el derrame basáltico del Pedregal, zona que por su altitud relativa se denominará, de Lomas, la capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcilla compresibles. Sin embargo, debido a la explotación de minas de arena y grava, existen galerías a diferentes profundidades. En resumen, está formada por suelos de alta resistencia y poco deformables.

La zona II, o de transición. Presenta características intermedias entre la Zona I y III. En las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, se presenta una zona de transición. Las fronteras de la zona de transición las dictan, la parte centro y oriente de la ciudad.

La zona III, o de lago. Se localiza en las regiones donde antiguamente se encontraban los lagos de Texcoco y Xochimilco. El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y deformables con alto contenido de agua, favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

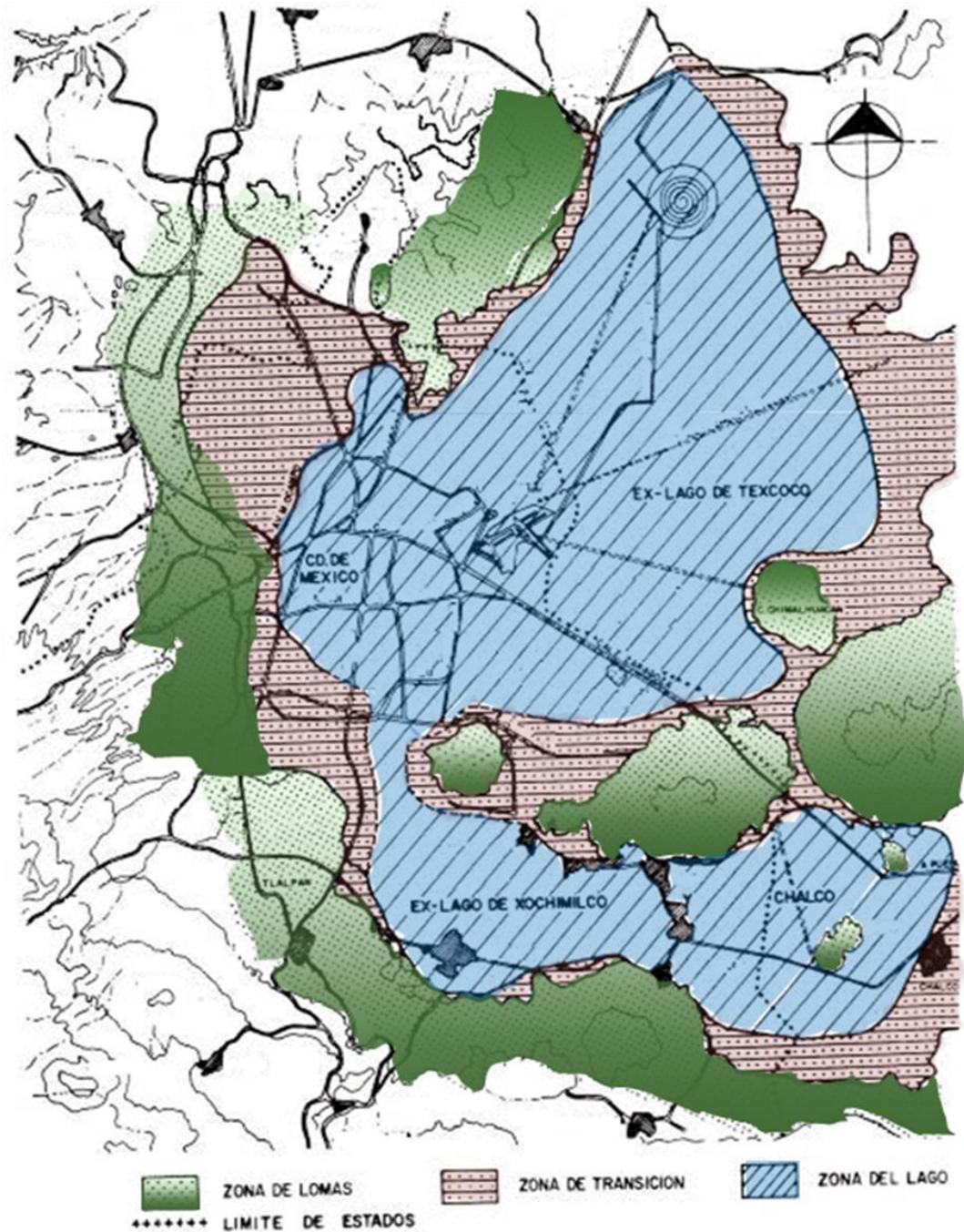


Fig. II.3 Zonificación del Valle de México

II.3 ESTRATIGRAFÍA DEL VALLE DE MÉXICO

Se han realizado diversos sondeos de la ciudad de México, especialmente de la zona de lago por lo que podemos afirmar que existen cinco capas representativas, a saber:

1. **Manto superficial.** Depósitos areno-arcillosos o limosos, con abundancia de restos arqueológicos o rellenos ratificales de 2 metros de espesor aproximadamente.
2. **Formación arcillosa superior.** Arcillas volcánicas altamente compresibles blandas y medias intercaladas con lentes de arena de 25 metros de espesor aproximadamente.
3. **Capa dura.** La primera capa dura de 3 metros de espesor constituida por suelos de arcilla o limo-arenosos compactos y rígidos. Cementados con carbonato de calcio, situada a unos 33 metros de la superficie.
4. **Formación arcillosa inferior.** Formada por arcillas volcánicas de características semejantes a las de la capa superior pero más comprimidas y por lo tanto resistentes, su espesor varía de 4 a 14 metros.
5. **Depósitos profundos.** Son depósitos de arena con grava separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

En algunos lugares se ha encontrado una capa de arcillas volcánicas, a 65 metros de profundidad.

La zona del lago se ha subdividido en dos regiones: la primera abarca lo que era antiguamente la Ciudad de México, donde las propiedades medias de los estratos arcillosos varían aún dentro del mismo predio y la segunda pertenece al área urbana actual.

Al oeste de la ciudad afloran los depósitos clásticos aluviales de la formación Tarango, los que tienen una pronunciada pendiente con la que llegan al centro de la ciudad y se encuentran cubiertos por las gravas y arenas del Pleistoceno Superior y los estratos compresibles constituidos por cenizas volcánicas sedimentadas en agua tranquila por lo que su espesor aumenta hacia el oriente del valle (figura II.4).

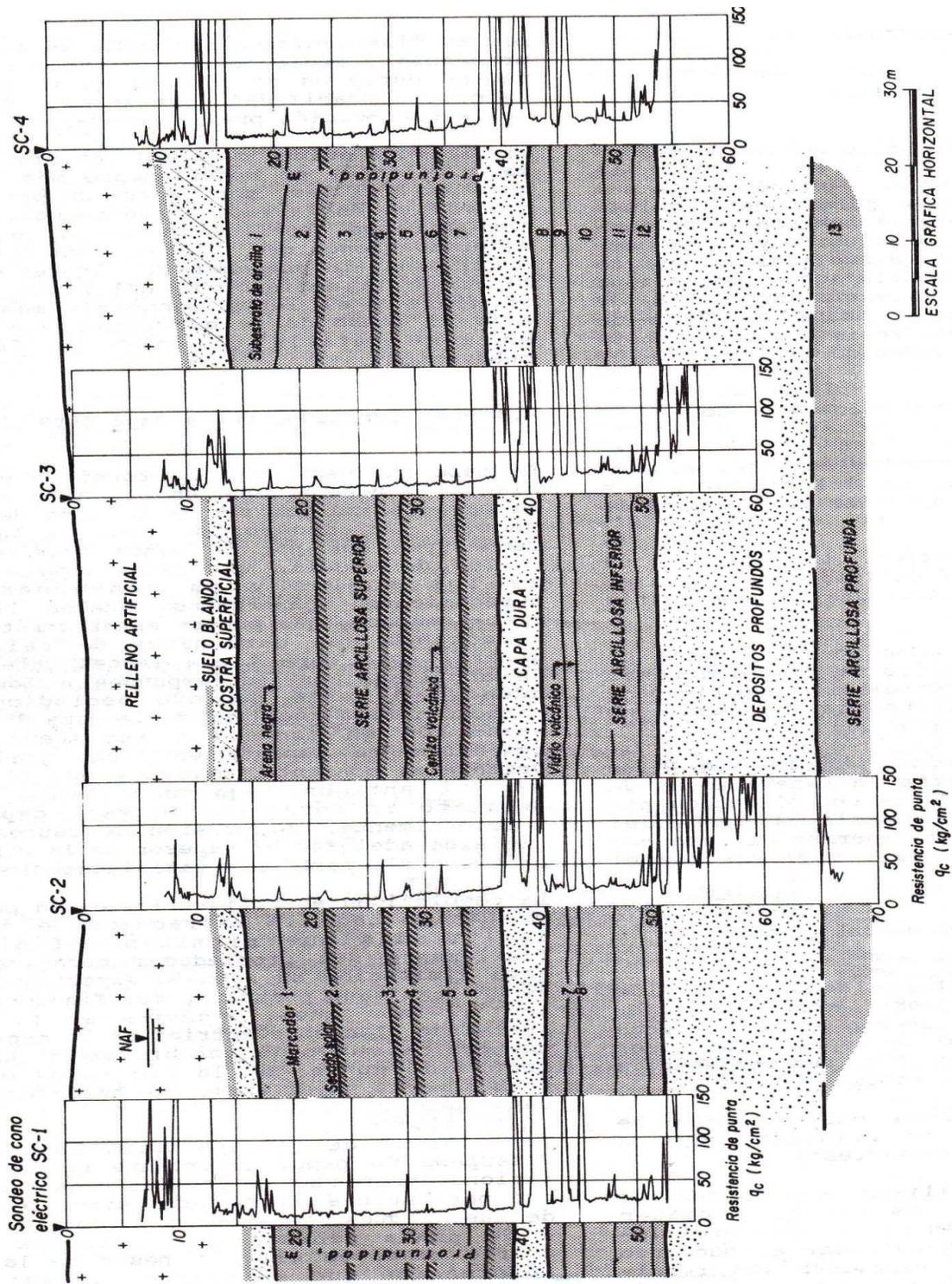


Figura II.4 Estratigrafía del Valle de México

II.4 PIEZOMETRÍA Y HUNDIMIENTO DEL VALLE DE MÉXICO

Gracias a la historia geológica, del Valle de México por mucho tiempo fue una cuenca cerrada; los depósitos aluviales o se evaporaban o bien se infiltraban en el subsuelo, que a su vez era enriquecido de agua subterránea dándonos por resultado un suelo en su mayor parte constituido por arcillas y limos de alto contenido de agua por lo que en algunas zonas del Valle, el nivel piezométrico estaba prácticamente a nivel del terreno superficial. Es un hecho comprobado que los acuíferos del subsuelo, y entre ellos mantos relativamente poco profundos, estuvieron sujetos a presiones artesianas en el pasado. El motivo por el que se ha abatido este nivel es la sobreexplotación del manto que empezó desde que el hombre apareció en el Valle de México ya que para el abastecimiento de agua potable recurría a los manantiales o bien, se construían pozos. En sus orígenes, en el siglo XIV, la ciudad azteca de Tenochtitlan utilizaba un elaborado sistema de acueductos para llevar agua de manantial desde la parte más alta de la porción sur de la Cuenca de México hasta la ciudad situada en tierra y ganada al lago salino de Texcoco. Tras vencer a los aztecas en 1521, los españoles reconstruyeron estos acueductos y continuaron utilizando agua de manantial hasta mediados del siglo XIX. El descubrimiento en 1846 de agua potable subterránea proveniente de los pozos artesianos, provocó un furor por la perforación de pozos (Orozco y Berra, 1864). Hacia estos años, la extracción creciente de agua de pozo, combinada con los métodos artificiales de drenado del valle, provocó que muchos manantiales naturales se secaran, que los lagos menguaran y que el agua del subsuelo perdiera presión, con la subsecuente consolidación de las formaciones de arcilla lacustre sobre las que se asienta la ciudad. Dando como resultado los primeros impactos del hundimiento de la ciudad: 5 centímetros por año, registrado entre 1861 y 1895. El consecuente hundimiento del terreno ha constituido un serio problema para el Valle de México desde principios del siglo XX.

En 1902 se iniciaron estudios para determinar la conveniencia de explotar mediante pozos los manantiales de Xochimilco. A partir de 1909 el agua se condujo desde ahí hasta los tanques ubicados en la Loma de Molino del Rey, a 26 kilómetros de distancia. Para ello se construyó un pozo de 9 metros de profundidad y se instalaron varias bombas con el fin de introducir el agua hasta un acueducto de concreto para conducirla hasta la estación de bombeo, ubicada en la colonia Condesa. De aquí se elevó a dichos tanques para después distribuirla a la ciudad. Así, en 1912 se comenzaron a bombear y conducir a la ciudad las aguas de Nativitas, Santa Cruz y la Noria, suprimiendo definitivamente las provenientes de Chapultepec, el

Desierto de los Leones y el río Hondo, que para entonces presentaban ya rasgos visibles de contaminación.

Durante los difíciles tiempos de la revolución y hasta 1924, el abastecimiento de agua de las regiones del sur tuvo infinidad de desequilibrios. En largas temporadas era común el desabasto durante el día. Hacia 1927 se construyeron más pozos artesianos con bombas de mayor capacidad ubicados en los manantiales de San Luis Tlaxialtemalco resolviendo así las demandas de agua.

Fue hasta 1936 cuando se vuelven a advertir deficiencias en las fuentes de abastecimiento; la población había aumentado en forma considerable hasta rebasar el millón de habitantes. Durante ese año se perforaron los primeros 18 pozos profundos, de entre 100 y 200 metros, lo que marco el inicio de la explotación intensiva del acuífero. De 1936 a 1944 se perforaron 93 pozos en el centro y en la periferia 93. Tal extracción de agua provoco hundimientos en el centro a razón de: 16 centímetros por año. El más drástico ocurrió entre 1948 y 1952; precisamente en 1951 la ciudad se hundió en promedio 46 centímetros.

En 1947 el doctor Nabor Carrillo demostró que la ciudad de México se hundía por la extracción de agua del acuífero, calculada en 7.2 metros cúbicos por segundo. Sus investigaciones fueron determinantes para imponer la veda sobre la explotación de los acuíferos en el centro en 1954. A partir de entonces los nuevos pozos se hicieron en el sur, principalmente en Chalco y Xochimilco; los más antiguos fueron reemplazados por otros cuya profundidad fue ya de 400 metros.

Como parte de los incrementos en el volumen de agua abastecida, en 1956 se concluyó el sistema de pozos Chiconautla, ubicados al norte de la ciudad; 40 de ellos se perforaron con una profundidad media de 150 metros. Para finales de 1957 se hechó a andar el programa de Abastecimiento de la Ciudad de México desde la cuenca del Lerma. En 1964 la población del Distrito Federal era de 5.8 millones con un abastecimiento de 22.2 metros cúbicos por segundo (mcs). La política de explotar más el subsuelo continuó a pesar de contar ya con el abastecimiento externo de Lerma: obtener más agua mediante la extracción del líquido en el Valle, pospuso acciones más enérgicas para tratar de crear una conciencia sobre el uso racional del agua y evitar fugas en las redes de distribución, detectadas desde entonces.

Desde 1964 y hasta 1975, se incrementaron los caudales con la perforación de 50 pozos profundos más en Xochimilco, Tláhuac y Ciudad Netzahualcoyotl, así como en la zona norte, en los Reyes y Teoloyucan. Con todos ellos se logro aumentar el caudal a 9.5 mcs para entonces el agua

disponible para consumo humano, la industria y los servicios ascendía a 32 mcs y era consumida también por la población de los municipios conurbados del estado de México y que, sumada a la del Distrito Federal, sumaba 11 millones de habitantes.

En las décadas de los ochenta y noventa, nuevos crecimientos de la ciudad y su zona metropolitana implicaron aumentar los abastecimientos. A partir de 1980 se logro, por fin, disminuir relativamente la extracción de agua del subsuelo, gracias al abastecimientos externo del Sistema Cutzamala. Pero como la población siguió aumentando, fue necesario incrementar los volúmenes de líquido. En 1994 se alcanzo el promedio más elevado de consumo por habitante: 337 litros. En los últimos tres años, los programas de ahorro de agua han disminuido en forma poco significativa dicho promedio. Hoy se tiene un consumo de 324 litros por habitante al día, incluyendo las pérdidas y fugas en el sistema de abastecimiento; esta cifra rebasa los registrados en otras grandes ciudades (Nueva York, Tokio y París), donde no se sobrepasa los 200 litros. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un mínimo de 150 para ciudades en países desarrollados. Un consumo mínimo para evitar problemas de salud lo establece el Banco Mundial en 50. Sin embargo, los promedios no reflejan necesariamente la realidad. Consumos mínimos de agua en la ciudad de México se registran en algunos asentamientos ilegales: alrededor de 28 litros diarios por habitante, mientras que la estimación para las zonas de sectores medios es entre 275 y 410 litros por habitante al día, y en los sectores de máximos ingresos entre 800 y 1,000.

Ahora analizaremos el hundimiento del Valle, cuyo período más crítico de hundimiento en la ciudad se presentó a mediados del presente siglo. Entre 1950 y 1980 la zona central se hundió 5 metros. En la zona lacustre del sur y en el ejido de San Gregorio, ubicado entre el canal de Chalco y Xochimilco, hubo en el mismo período, hundimientos de 4 metros.

Registros confiables muestran de 1983 a 1992 hundimientos anuales alrededor del Aeropuerto Internacional de entre 15 y 25 centímetros; de 10 en el Centro Histórico, de entre 10 y 15 centímetros en de Xochimilco y Tláhuac. Actualmente la situación no ha variado pues el hundimiento medio anual en el Centro Histórico es de 10 centímetros, en Xochimilco de 15; y de 20 a 25 en el Aeropuerto Internacional. El mayor se tiene en Ciudad Netzahualcoyotl: 30. Los ritmos de hundimiento se reducen en las zonas no lacustres, como Azcapotzalco a tan solo entre 2 y 5 centímetros anuales.

Una prueba visual reciente del hundimiento de la ciudad se aprecia en las siguientes fotografías una del Ángel de la Independencia y otra de un pozo en la zona del lago de Texcoco.

En 1910,
nótese que las torres laterales están a nivel del piso.



Época actual,
nótese que se han tenido que añadir escalones en la base del Ángel.



En síntesis, la parte central de la ciudad de México, específicamente la Catedral Metropolitana, se ha hundido 12.5 metros desde su construcción

iniciada a fines del siglo XVI. De ellos, 7.5 han sido en este siglo. Los estudios coinciden en que la ciudad ha sufrido en las partes más críticas hundimientos de entre 8 y 10 metros en los últimos 100 años, es decir casi un metro cada 10 años.

Según la Comisión Nacional del Agua, el año pasado oficialmente estaban registrados y en operación 910 pozos profundos en el D.F., en el estado de México 1,530, y en los territorios de Hidalgo y Tlaxcala pertenecientes a la cuenca, 306. Sin embargo, hay que hacer notar que a pesar de la mayor cantidad de pozos que existen en el estado de México respecto al D.F., se obtiene igual volumen de extracción de agua en ambas entidades. No se conoce con certeza si ello se debe a la mayor profundidad de los pozos en el D.F., o bien a una mayor disposición de agua en sus mantos freáticos.

De tal manera que si revisamos la historia de último siglo con las gráficas “años-población” y “años-demanda del agua” (figuras II.5 y II.6), observamos que a partir de que la población empezó a crecer rápidamente, esto es, cuando da inicio la década de los treinta, la demanda de agua también aumentó desmesuradamente.

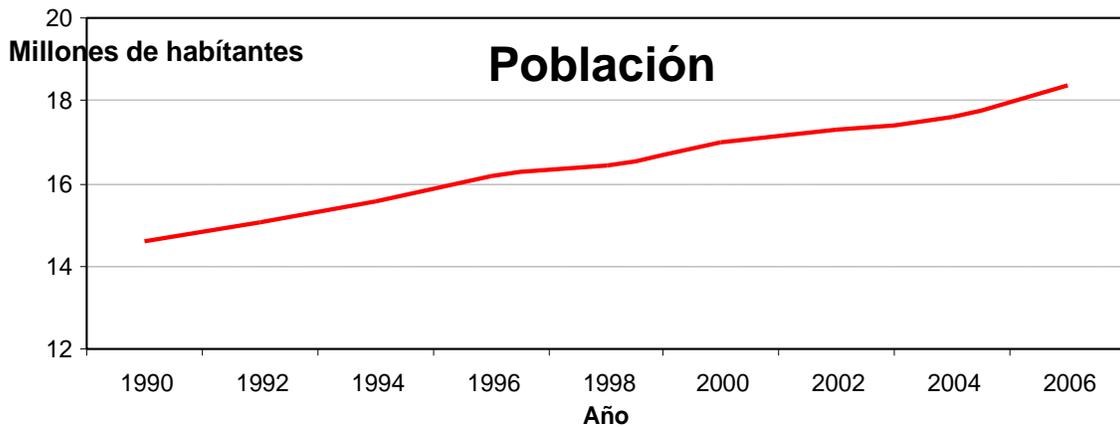


Fig. II.5 Gráfica años-población

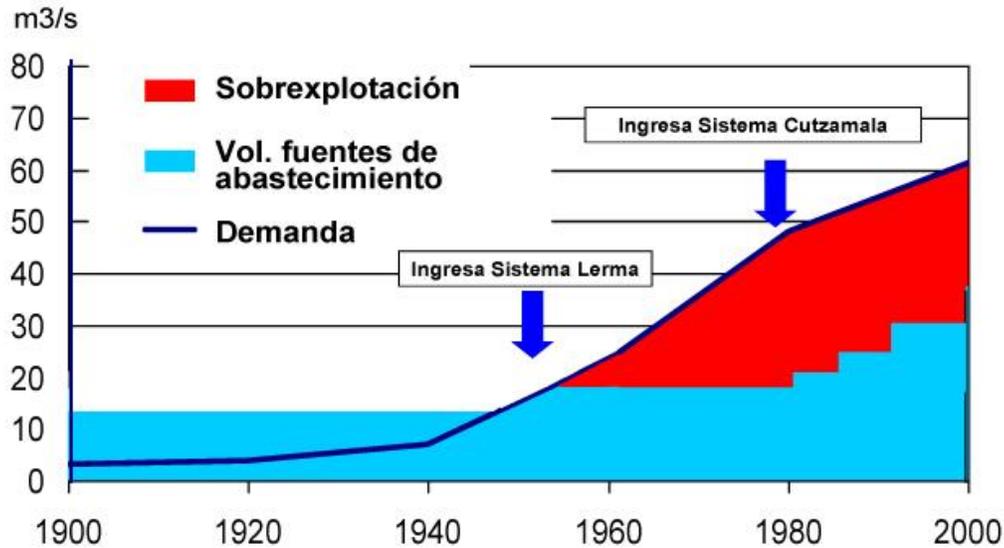


Fig. II.6 Gráfica años-demanda del agua

La extracción del agua subterránea está causando un abatimiento del nivel piezométrico, produciendo un hundimiento del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales; estos hundimientos, al ser diferenciales, provocan diversos problemas, entre ellos los agrietamientos de construcciones y vialidades, etc.

La velocidad de hundimiento de la ciudad no ha variado prácticamente en las últimas décadas como se observa en las figuras II.7 y II.8, con lo que podemos inferir que se comportará igual para los próximos 25 años por lo menos.

En la figura II.9, observamos la gráfica que muestra la relación entre el no. de años y el hundimiento en metros para diferentes puntos de la ciudad y en la figura II.10 se observa el hundimiento medio anual de la Ciudad de México el cual varía de 2 a 20 cm por año

La zona de la ciudad que ha sufrido mayores abatimientos es la localizada en la colindancia de las delegaciones Xochimilco, Coyoacán y Tlalpan, así como la zona del centro y del aeropuerto según las figuras II.7 y II.8, paralelamente las zonas donde se tienen los mayores hundimientos en la ciudad son las mismas, destacando que en la zona del aeropuerto registra la mayor velocidad de hundimiento. Por lo tanto existe una correlación entre zonas de mayor abatimiento del nivel estático con los mayores hundimientos. (Figuras II.11 y II.12)

HUNDIMIENTO REGIONAL DEL VALLE DE MÉXICO Y EL STC (ESTUDIO DE CASO, TRAMO TERMINAL AÉREA - OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO).

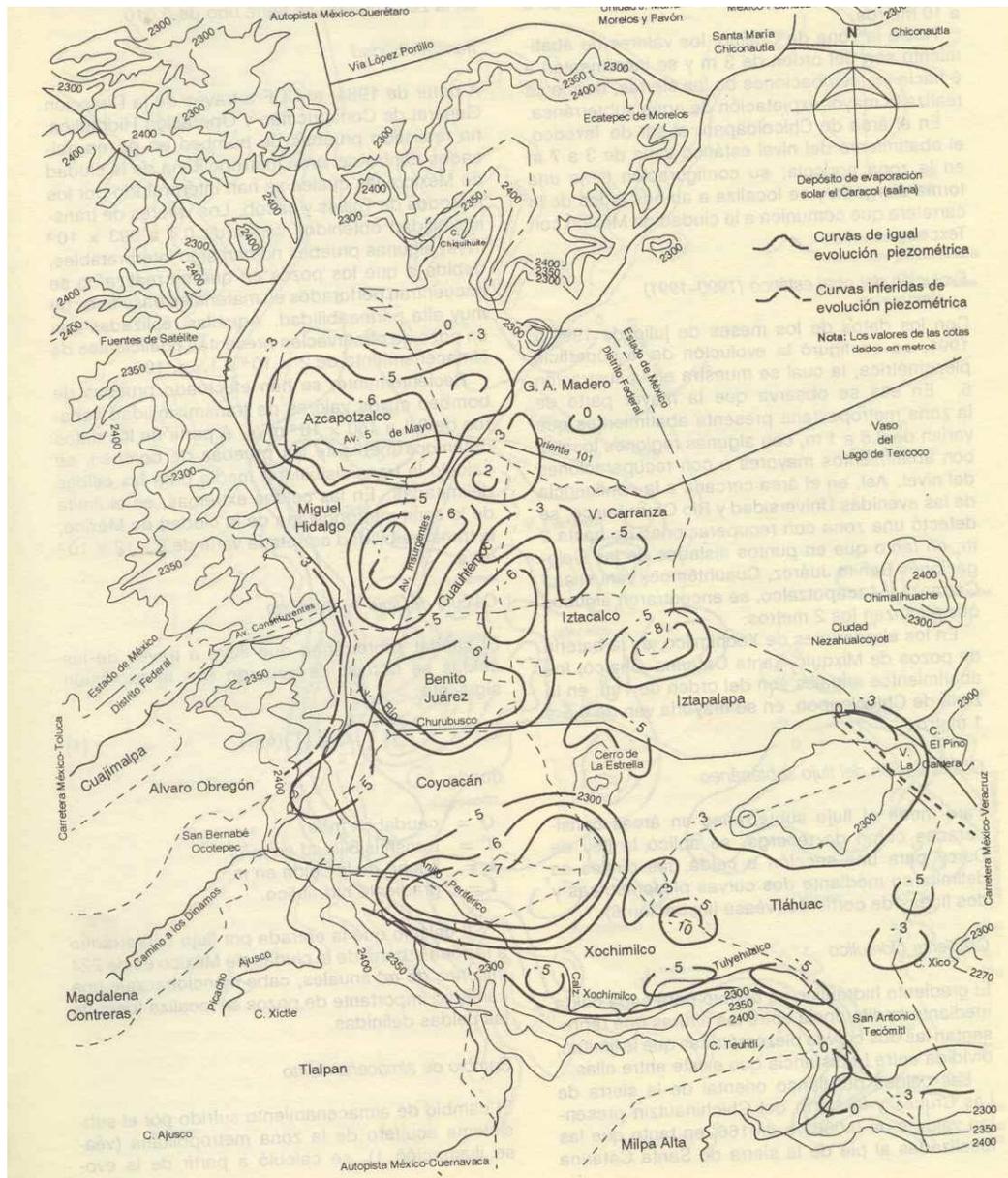


Figura II.7

Evolución 1986 – 1991. En este periodo los abatimientos fueron del orden de 3 a 5 m en un lapso de 5 años, lo que indica un ritmo de abatimiento de los niveles de 0.6 a 1.0 m/año.

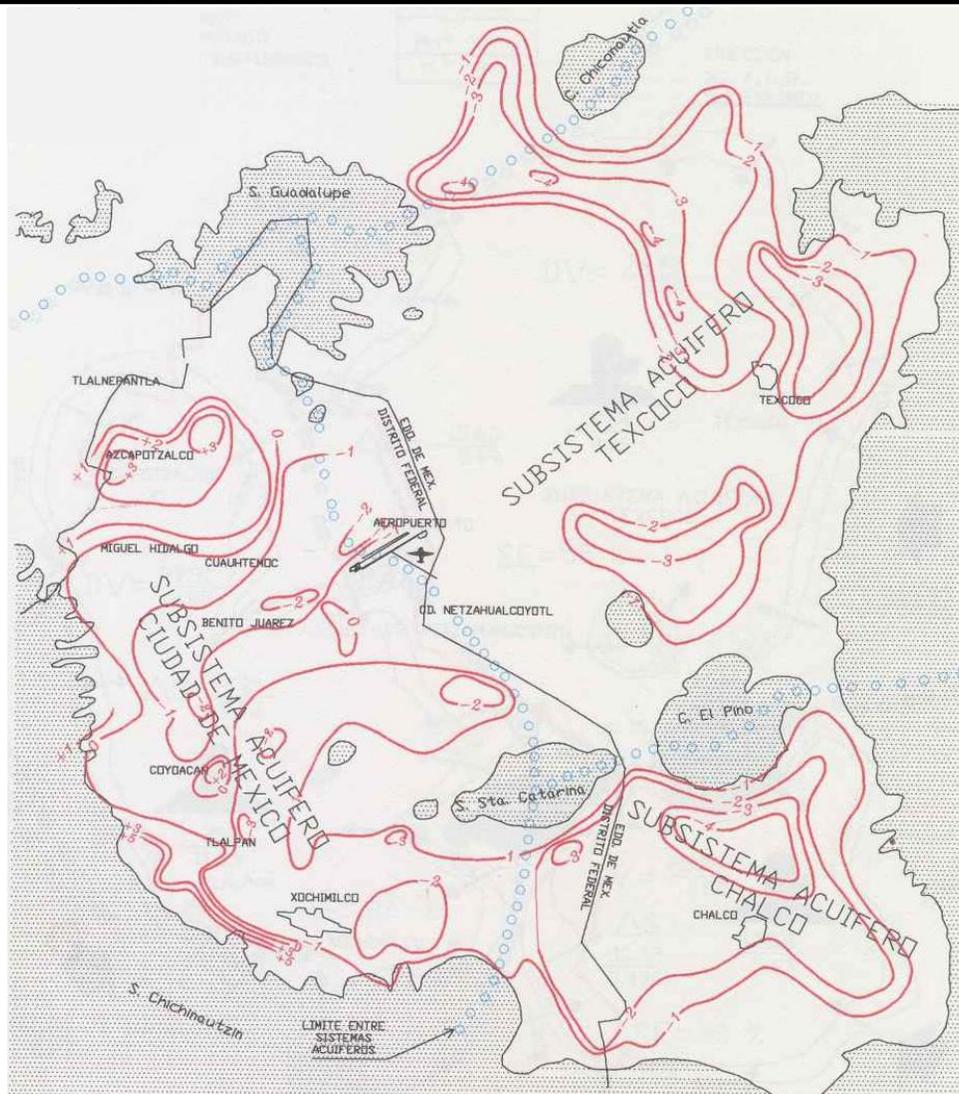


Figura II.8

Evolución 1994 - 1995. Para este lapso corto se tienen abatimientos de 1 a 2 m; lo que confirma los ritmos de descenso del orden de 0.5 a 1 m/año para esa zona.

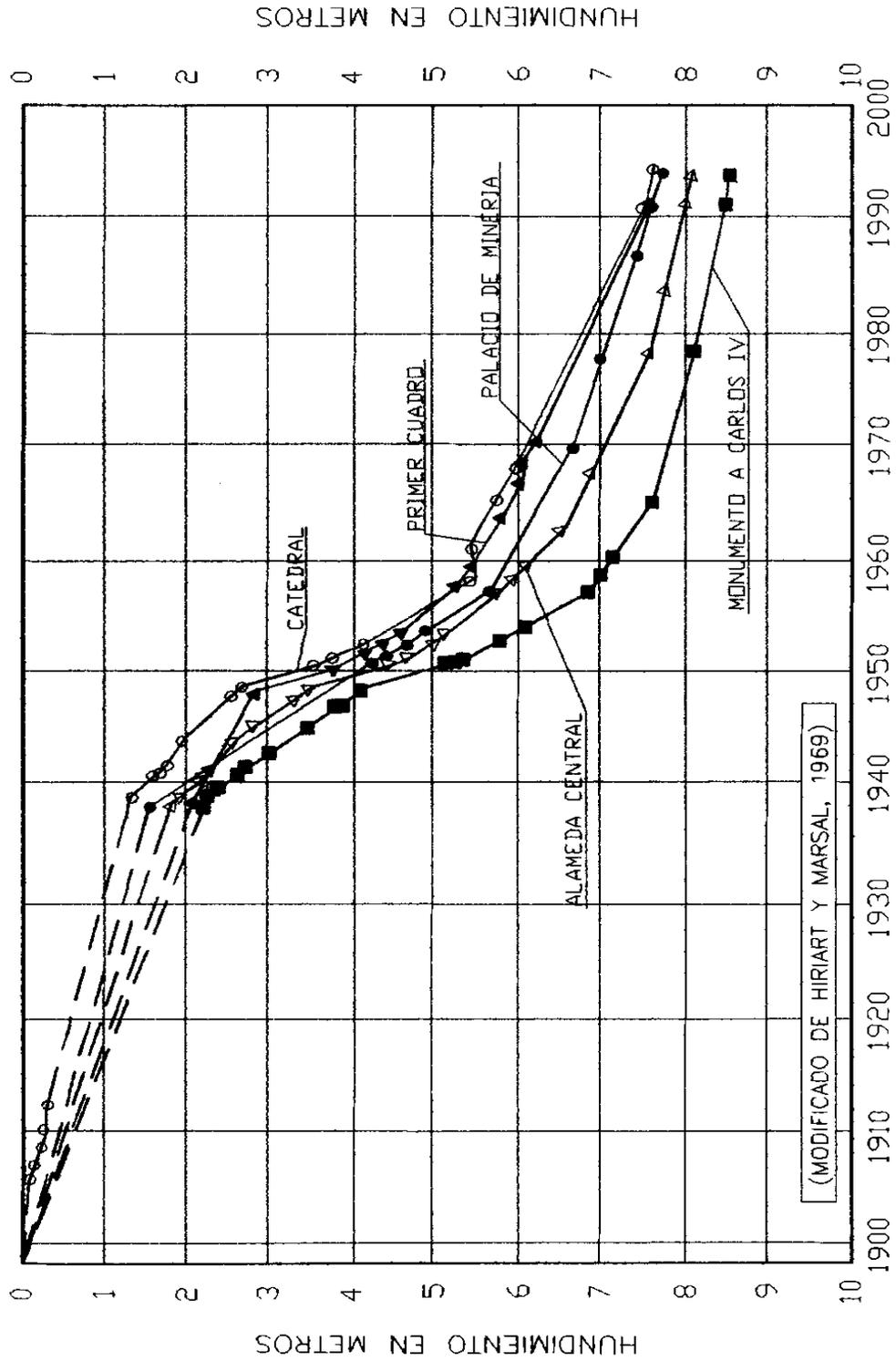


Fig. II.9 Gráfica años-hundimientos

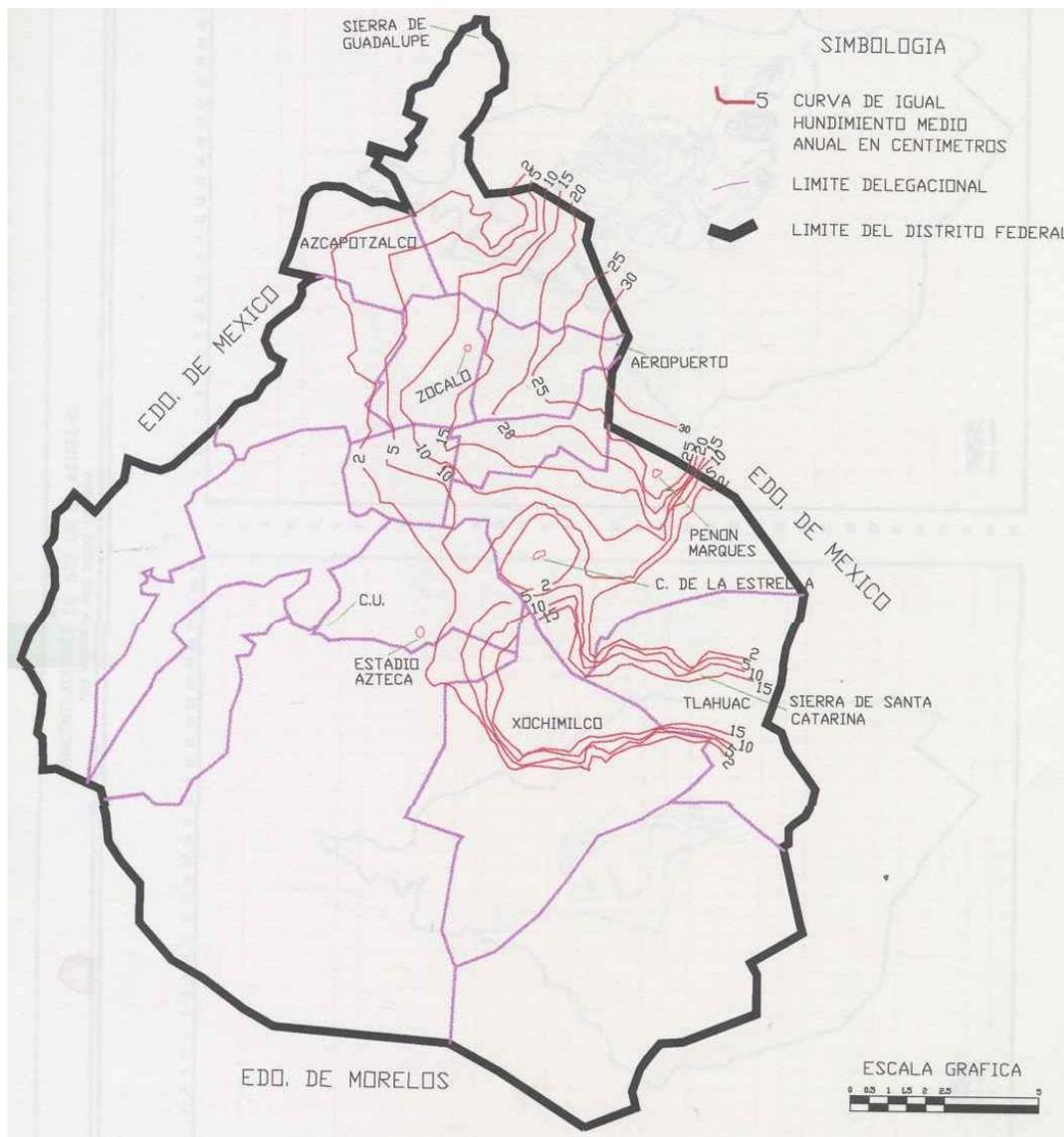


Figura II.10
Hundimiento medio anual en la ciudad de México.
Varía entre 2 y 20 cm/año

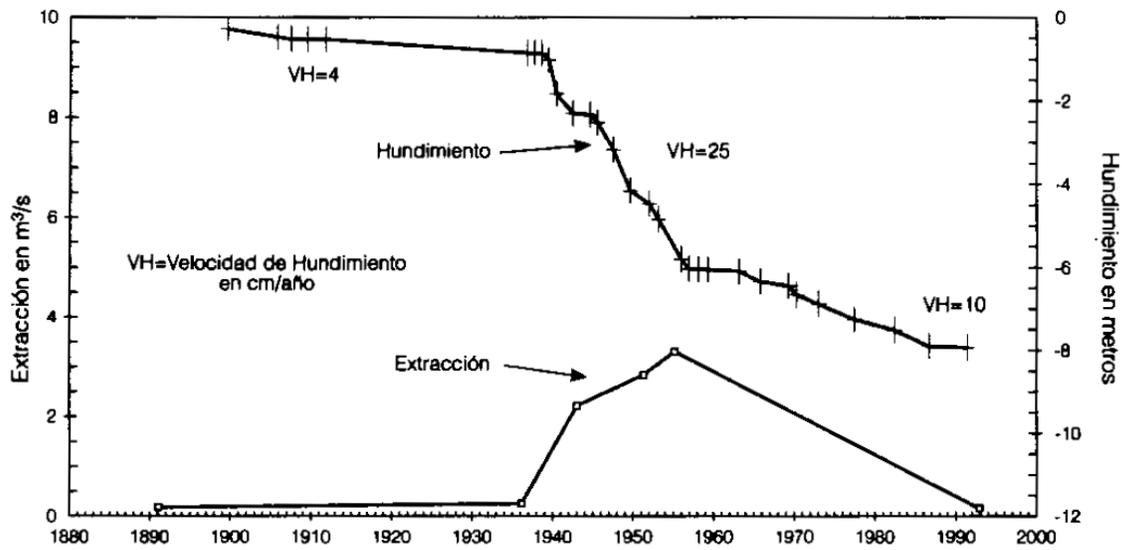


Figura II.11

EXTRACCIÓN DEL AGUA Y HUNDIMIENTO EN EL CENTRO DE LA CD. DE MÉXICO

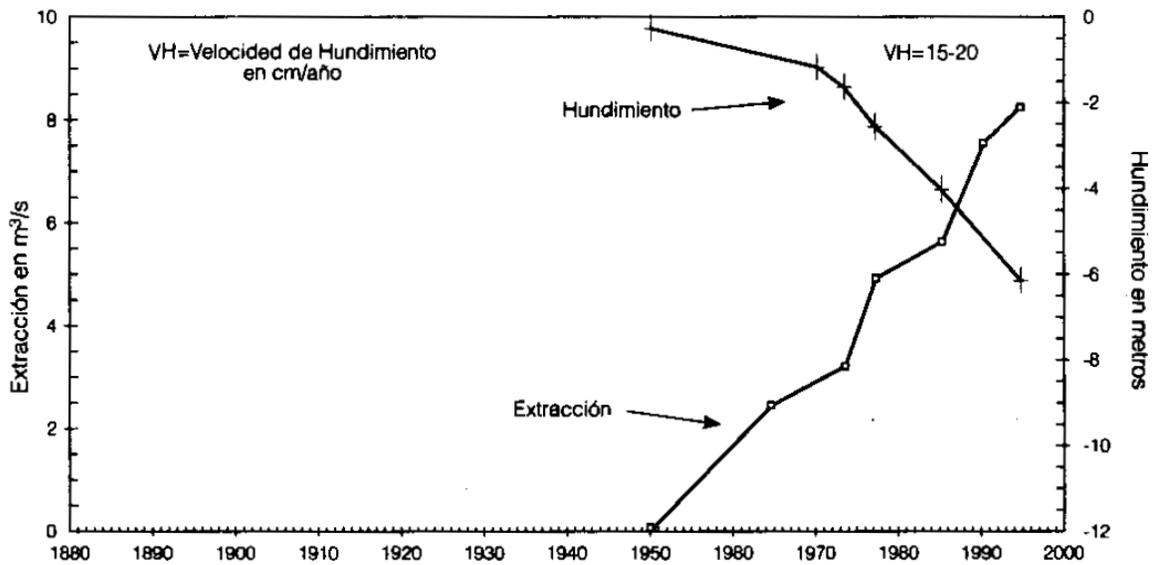


Figura II.12

EXTRACCIÓN DEL AGUA Y HUNDIMIENTO EN LA ZONA SUR (XOCHIMILCO Y CHALCO) DE LA CD. DE MÉXICO

CAPÍTULO III

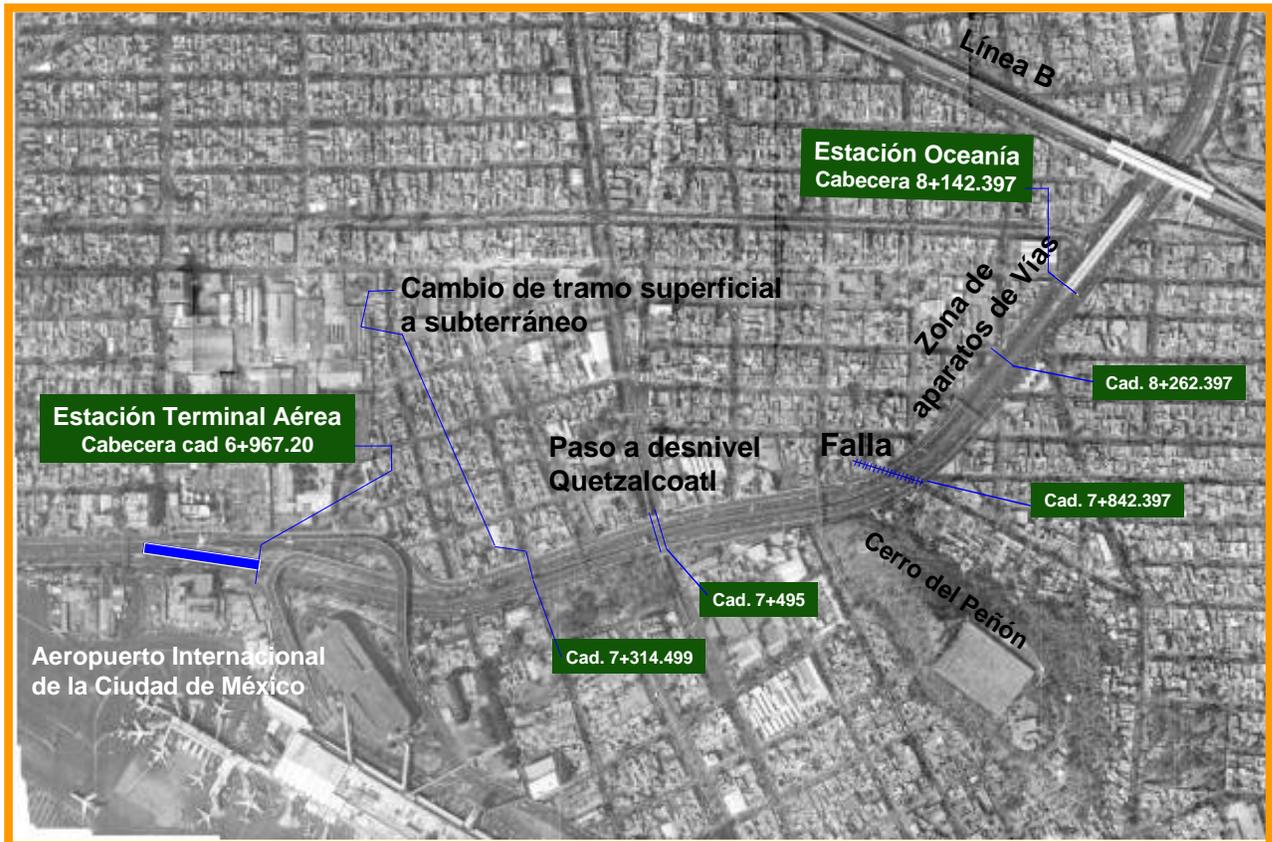
PROBLEMÁTICA EXISTENTE

III.1 PROBLEMA GEOTÉCNICO DEL TRAMO TERMINAL AÉREA – OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO (ESTUDIO DE CASO).

En el Capítulo anterior se enfatizó el tema del hundimiento regional del Valle de México, como consecuencia de la demanda de agua por el incremento de población, así mismo en el Capítulo I se observó la relación del aumento poblacional con el incremento de alternativas de transportación en la Ciudad de México, con estos antecedentes en el presente capítulo se plasmará uno de los muchos problemas en el sistema de transporte colectivo metro, derivados principalmente de las características del suelo, en este lugar en particular donde, en medio de un suelo de arcillas de alta compresión, emerge un manto rocoso, a la vez que no solo afecta a este tramo si no que a todo un sistema como es el denominado “metro”.

Dicho tramo, en su parte media, cruza el cerro del Peñón de los Baños, lugar que se puede considerar, desde el punto de vista geotécnico, como una zona dura que no se desplaza con el hundimiento general del Valle de México. En cambio las estaciones que lo limitan sí se encuentran apoyadas en las arcillas blandas de la Zona del Lago y, por tanto, sometidas a dicho hundimiento. Por estas razones, durante los 21 años de vida operativa de la estructura, se han presentado deformaciones importantes, mayores entre el cerro del Peñón de los baños y la Estación Oceanía que en el tramo complementario, lo que ha obligado a renivelaciones constantes y cambios de pendiente que se han podido realizar gracias al espesor excedente de balasto que se proyectó desde el principio, justamente para estos fines.

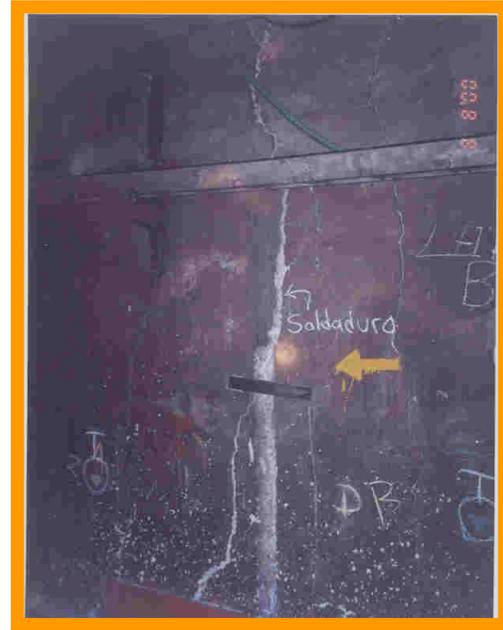
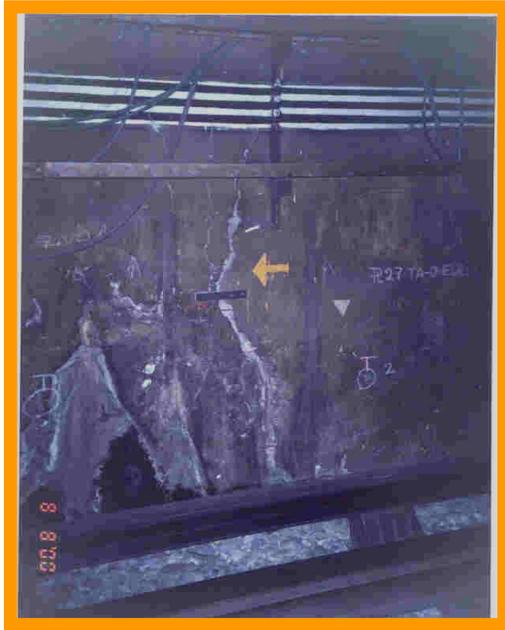
En la siguiente fotografía aérea se especifican los puntos más importantes del tramo Terminal Aérea – Oceanía y sus cadenamientos, de igual manera observamos claramente la localización del cerro del peñón y la incrustación de la vía en el mismo.



Como consecuencia del cambio abrupto de suelo, se han alcanzado pendientes en el tramo superficial que impiden la adecuada circulación de los trenes, ya que en época de lluvias se mocan las pistas de rodamiento y los neumáticos patinan antes de alcanzar su fuerza de tracción.

Este es el problema principal que presenta este tramo, problema que ha originado otros adicionales como fracturas y desplazamientos excesivos de las juntas de expansión, que si bien no ponen en peligro el comportamiento de la estructura, sí requieren reparación adecuada.

Los efectos causados por los hundimientos de las arcillas del Valle de México en las estructuras del Metro, se reflejan en los cambios de configuración de las pistas de rodamiento (al igual que de las vialidades laterales). Ello lleva a que las longitudes de las estructuras cambien, incrementándose y presentando, consecuentemente, desplazamientos en las juntas de expansión dejadas y originando grietas en algunos puntos (fotografía III.1 Y III.2).



Fotografía III.1 y III.2
Grietas existentes en zona de cajón (cerrada)

Por otro lado la estación Oceanía está resuelta con andén central, por lo que en las cabeceras se presentan curvas horizontales para situar las vías en la posición adecuada para la circulación de los trenes, adicionalmente existen aparatos de vía inmediatamente después de las curvas (los aparatos de vía permiten la ramificación y el cruce de los itinerarios del ferrocarril). Esta zona, que mide aproximadamente 188 metros también ha sido afectada por los movimientos, produciendo geometrías que quedan fuera de especificación.

Todo lo anterior ha ocasionado la necesidad de realizar renivelaciones constantes por parte del personal del Sistema de Transporte Colectivo (STC).

III.1.1 AGRIETAMIENTOS DEL TERRENO

En la zona de transición entre el talud norte del Cerro del Peñón y la zona de planicie, se han venido presentando una serie de agrietamientos en el terreno, que han ocasionado rompimiento y deformación de vialidades y construcciones a lo largo de la traza de la zona de fracturamiento.

- **Características de las grietas**

La zona con mayores evidencias de agrietamientos se manifiesta principalmente a lo largo de la calle Emiliano Zapata, al oriente del Circuito Interior, en donde se presentan serias deformaciones de la vialidad y agrietamientos de los muros de casas habitación; en donde las grietas se alinean preferentemente en dirección NW-SE.

También al poniente del Circuito Interior se puede seguir la traza del fracturamiento por las calles Norte 182 y 180; ya que las casas muestran agrietamientos y deformaciones en sus muros y bardas; y se encuentran alineadas en la misma dirección NW-SE.

- **Origen de las grietas**

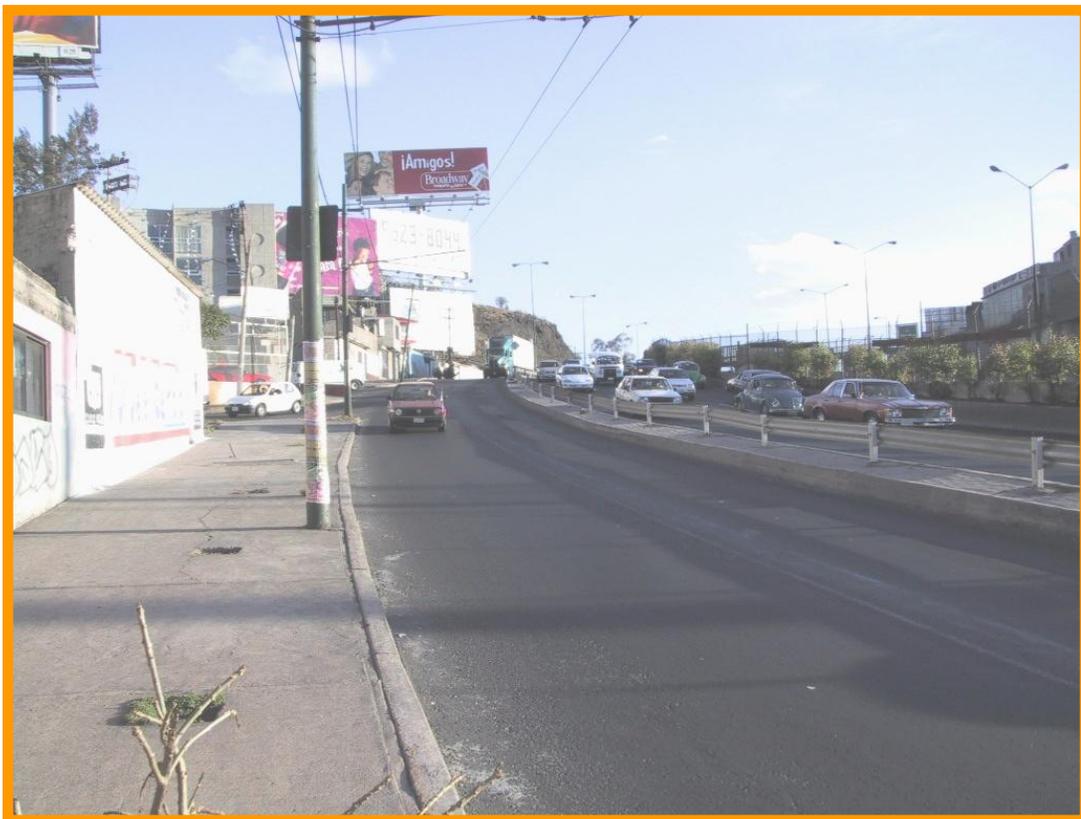
Las franjas de agrietamiento del terreno se presentan con una orientación similar a la que tiene el talud norte del Cerro del Peñón; y su ubicación coincide con la zona en donde la pendiente de la roca presenta un mayor grado de inclinación.

A partir de esta zona abrupta de transición topográfica, el espesor de los suelos aumenta rápidamente. El tipo de suelos de esta zona es básicamente arcilloso de consistencia muy blanda en la parte superior, y de media a blanda por debajo de los 30 m de profundidad.

Existe, por lo tanto, una conjugación de factores topográficos y geológicos que dan lugar a que se presenten fuertes agrietamientos del terreno; ya que en esta zona de transición abrupta, la presencia de fuertes espesores de suelos arcillosos muy compresibles, con una gradual y continua disminución del nivel de agua en los poros, esta generando fuertes desplazamientos diferenciales que provocan ese agrietamiento de la superficie del terreno a lo largo del cambio de pendiente de la roca.

PUNTUALIZANDO

- El tramo Terminal Aérea – Oceanía, cruza por el cerro del Peñón de los Baños, lugar que representa una zona inamovible.
- Esta zona se encuentra emergiendo de mantos de arcilla que sí se desplazan según el hundimiento regional del Valle de México.
- En el contacto entre los dos tipos de suelo en los niveles superiores de los mantos de arcilla, y los niveles superiores del propio cerro, a ambos lados del cerro, es decir en la traza de la intersección de las dos superficies, sobre la pista de rodamiento se presentan “**puntos de pivoteo**”, desde donde empiezan los desplazamientos verticales. (ver fotografía III.7).



Pendiente actual con dirección Politécnico.
Fotografía III.7

- Esta diferencia de desplazamientos origina cambios de pendiente y deterioro de los perfiles adecuados de vía, mismos que se analizarán el capítulo IV.
- Ambos problemas se han ido subsanando mediante renivelaciones de vía, sin embargo, en el caso de las pendientes, se ha llegado a un punto donde ya no es posible hacerlo con los mismos recursos que tiene el tramo.
- La separación de las juntas de expansión y la presencia de grietas adicionales requieren un tratamiento especial.
- Las pendientes han llegado a tal punto en la zona de cajón a cielo abierto que, en época de lluvia los neumáticos de los trenes del Metro patinan sobre las pistas de rodamiento.

Atendiendo a esta problemática es que se enfocaron los planteamientos, análisis y conclusiones que se presentan en esta tesis

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LA PROBLEMÁTICA DEL TRAMO TERMINAL AÉREA – OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO.

En este capítulo, mezclaremos los datos obtenidos en el pasado con los datos recientes, los cuales son los resultados del programa de estudios topográficos (la topografía), para proyectar el comportamiento de la vialidad a futuro (2027).

IV.1 TOPOGRAFÍA

Para realizar un estudio geotécnico de este tipo, se tiene que implementar un programa de estudios topográficos consistente en el levantamiento de la zona, la instalación de referencias de control y el monitoreo de éstos elementos de control.

a) LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

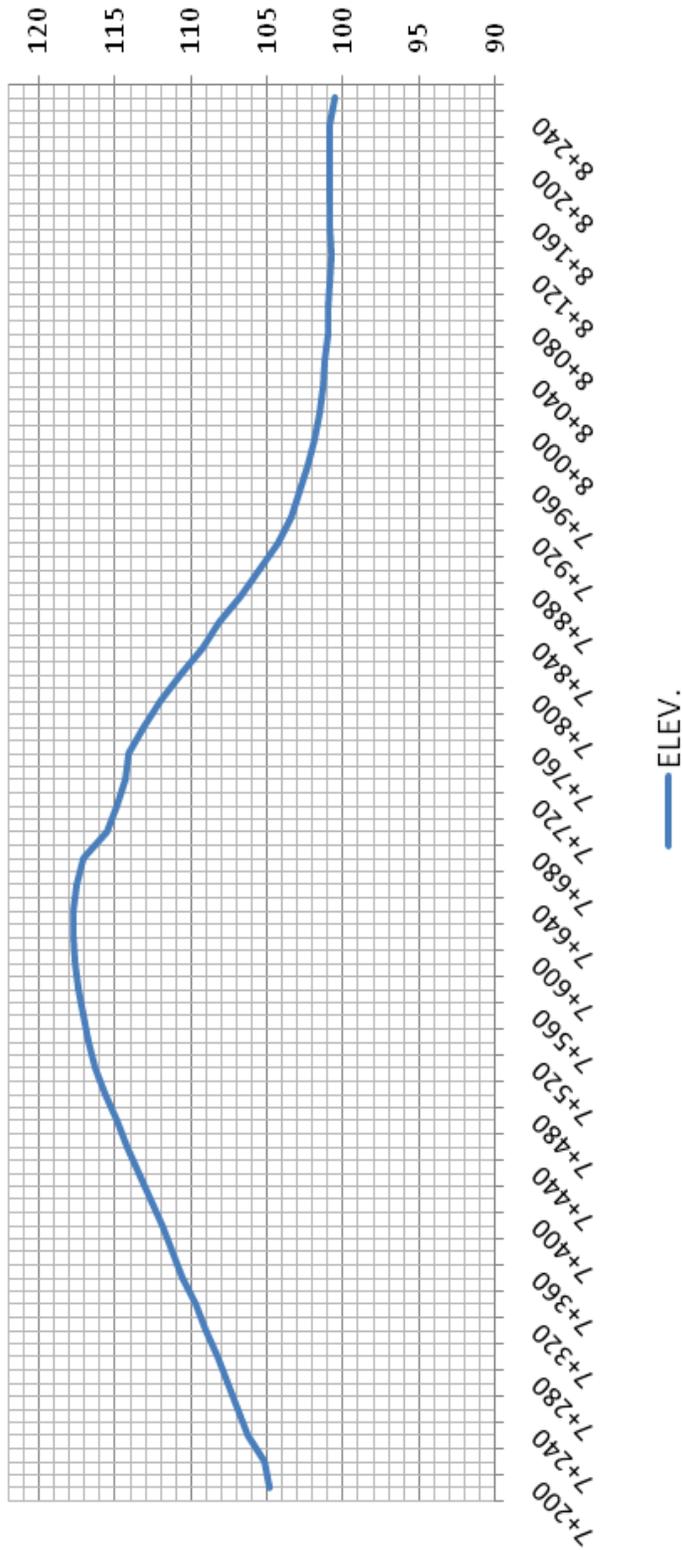
Como se mencionó en la introducción del presente trabajo, la información topográfica obtenida consistió en los perfiles de vías 1 y 2 que se tenían en 1991 y los que se tenían de las vialidades en 1980.

Se decidió realizar perfiles, tanto de las vialidades como de una pista de rodamiento, la exterior de la vía 2 (gráfica IV.1.1), para tener la situación actual de ellas. Como los perfiles de las vialidades presentaron diferencias de pocos centímetros, a pesar de ser muy parecidos, se optó por obtener un perfil medio de ambos (gráfica IV.1.2), considerando hipotéticamente que sus valores corresponderían a los que habría en el centro de las vialidades, si no hubiera existido el Metro, situación que se presentaba cuando se hizo el levantamiento vial en 1980.

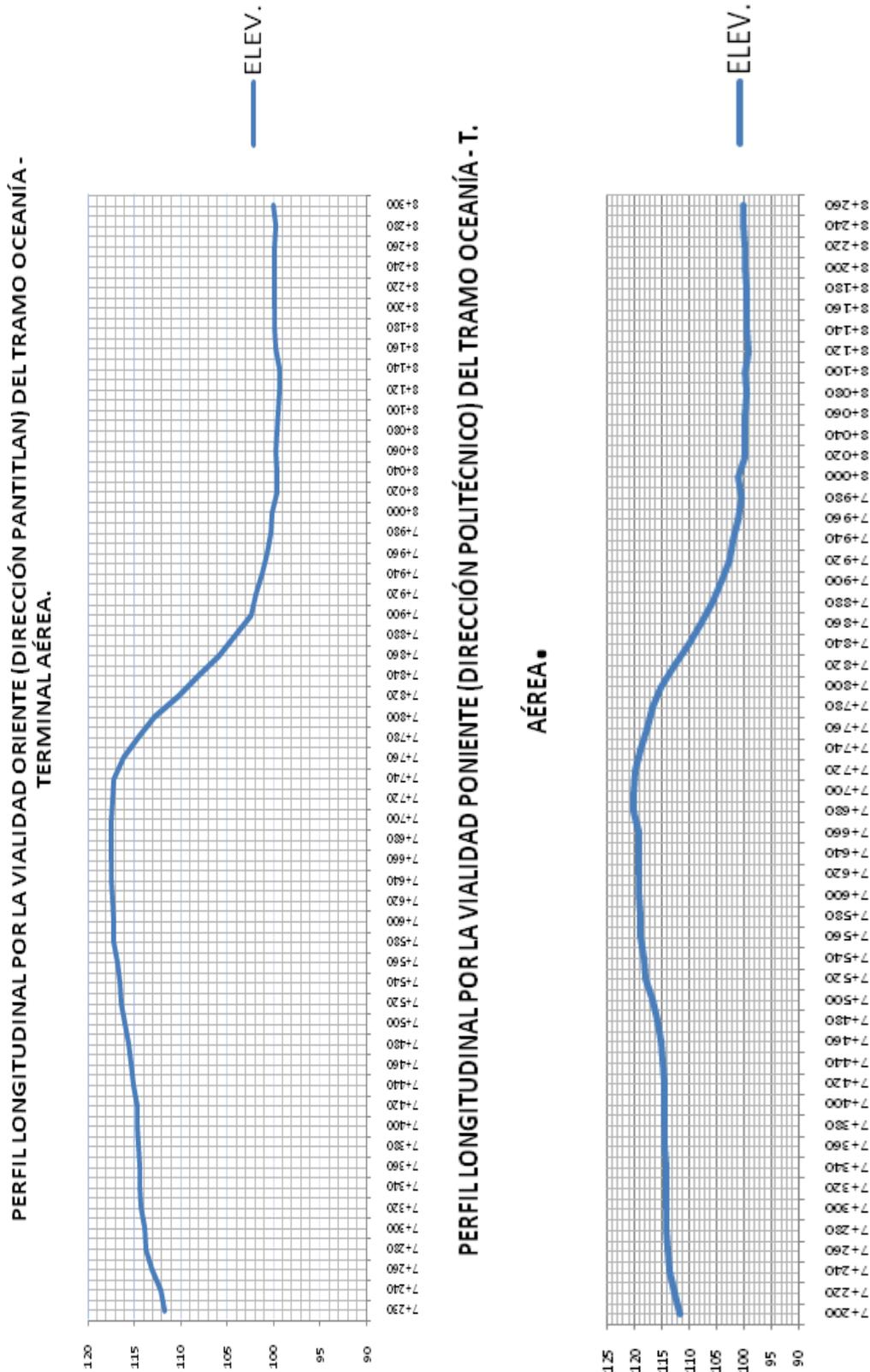
Con los dos datos anteriores se obtuvo la deformación existente desde 1980 hasta 2001. Se consideró también que los desplazamientos sufridos por las vías del metro debían ser igual al sufrido por las vialidades.

Conocidos, pues, los desplazamientos totales entre 1980 y 2001, inferido aquel como se explicó anteriormente y obtenido este por medio de levantamiento de la pista de rodamiento externa de la vía 2 y teniendo el correspondiente a la vía 2 en el año 1991, se logró encontrar qué deformación se presentó en los primeros 11 años y cual fue la de los siguientes 10 años (gráfica IV.1.3).

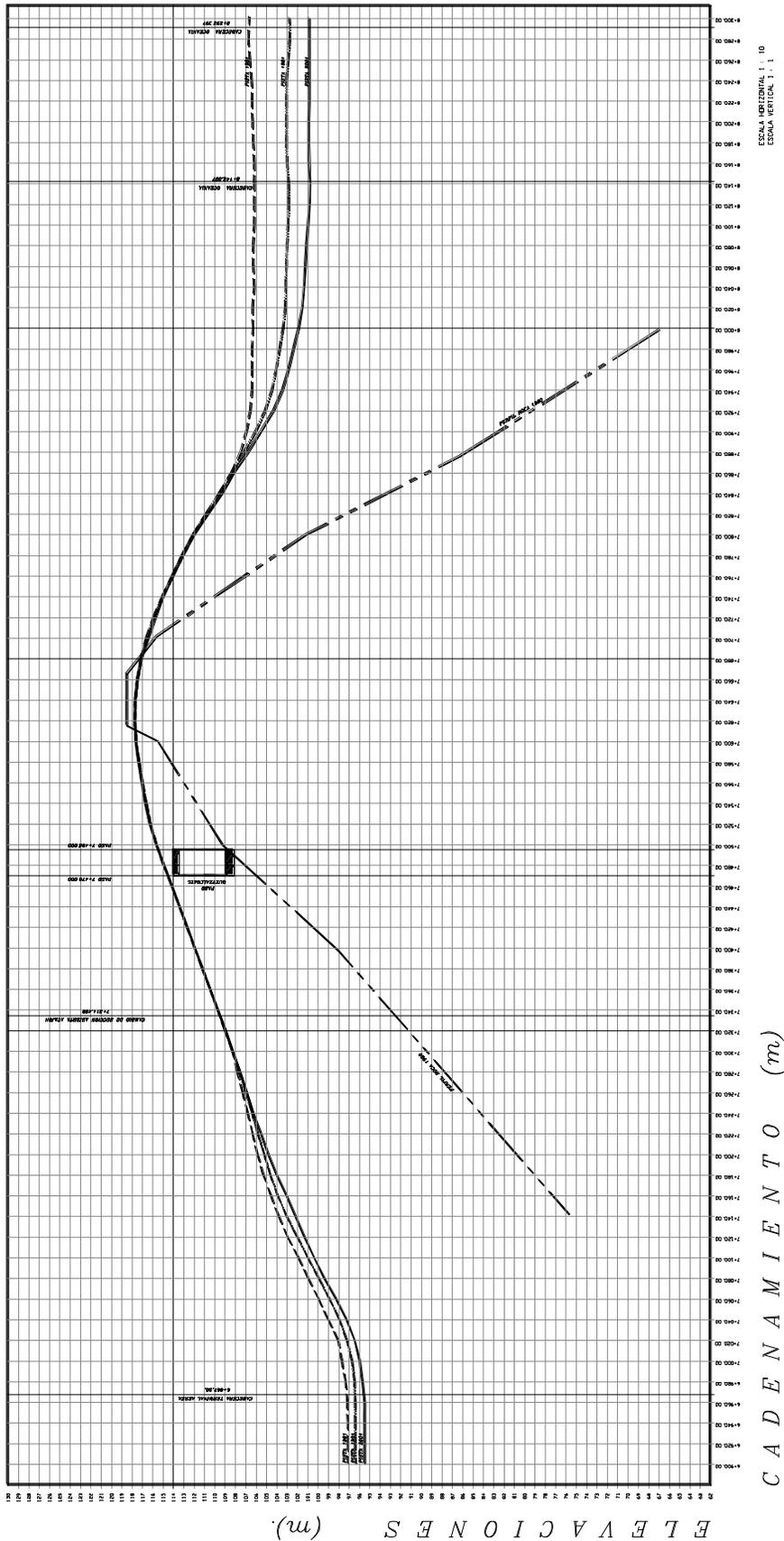
Estos perfiles también mostraron que en la zona del cerro del Peñón de los Baños no existían desplazamientos y que, por lo tanto, se presentaban puntos de coincidencia de las tres curvas anteriores; en la dirección Terminal Aérea entre los cadenamientos 7+280 y 7+300 y en la dirección Oceanía entre los cadenamientos 7+840 y 7+860.



Perfil de la pista de rodamiento exterior.
Gráfica IV.1.1



Perfil de la pista de rodamiento exterior.
Gráfica IV.1.2



Perfil de la pista de rodamiento en los años 1981, 1991 y 2001.

Gráfica IV.1.3.

Se encontró también que la pendiente máxima obtenida alcanza 6.1 % entre los cadenamientos 7+860 y 7+900 y después se reduce a valores de 5.8 %, y menores hacia la Estación Oceanía. En cambio, hacia la estación Terminal Aérea, la pendiente máxima es de 3.7 % en el tramo superficial y del orden de 5.3 % en el tramo subterráneo. Estas últimas pendientes no son muy diferentes a las originales gracias a las nivelaciones que se han hecho apoyadas en un espesor adicional de balasto que se dejó desde el inicio de su operación, justamente para esos fines.

Como conclusión fundamental de los levantamientos realizados está que se tiene un conocimiento muy certero del comportamiento de todo el tramo con el paso del tiempo y que ello permite extrapolarlo a horizontes futuros.

IV.2. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA Y SONDEOS

Con objeto de dar solución a largo plazo a los problemas que se han presentado en la zona de las juntas del cajón del Metro, en el tramo Terminal Aérea – Oceanía de la Línea 5 del Metro, en su parte subterránea, y en las juntas del tramo superficial, en las zonas de transición, donde actualmente se han manifestado desplazamientos relativos entre secciones completas del cajón estructural, generadas por los hundimientos diferenciales entre la roca del Cerro del Peñón y las arcillas compresibles del valle, en las zonas vecinas, a ambos lados del Cerro del Peñón, se realizó una exploración geotécnica.

El programa de exploración consistió en realizar once sondeos con profundidades de investigación entre 11 y 46 m.; 4 de ellos fueron sondeos mixtos, de muestreo alterado con penetración estándar y con muestreo inalterado con tubos Shelby y dentado de pared delgada (SM-1 a SM-4); los 7 restantes se efectuaron con broca tricónica sin muestreo hasta llegar a la roca o suelos duros, en donde se muestreo el material con barril NXL o tubo partido.

Los sondeos se ubicaron a los lados de la avenida Circuito Interior; los realizados en la vialidad oriente se les agregó al final la letra N; mientras los ejecutados en la vialidad poniente se denominaron con una S.

DESCRIPCIÓN DE LOS SONDEOS:

- Ejecución de cuatro sondeos de tipo Mixto denominados SM-1S, SM-2S, SM-3S y SM-4N a diferentes profundidades, que estuvieron regidas por la localización de la roca o máximo 45.00 m, lo que ocurriera primero. Estos sondeos se perforaron con extracción de muestras alteradas e inalteradas; para las primeras se utilizó el Método de Penetración Estándar (SPT) el cual consiste en hincar a golpes en el suelo, mediante un martinete de peso y altura especificados, un muestreador de pared gruesa (“tubo partido”) midiendo el número de golpes necesarios para penetrar 30 cm. Las muestras inalteradas se obtuvieron utilizando un muestreador de pared delgada tipo Shelby o Denisson, según la consistencia de los suelos muestreados.
- Perforación de siete sondeos o barrenos de avance, sin recuperación de muestras (ciegos), denominados SC-1S, SC-2S, SC-3S, SC-4S, SC-5S, SC-6N y SC-7N, con objeto de detectar la profundidad, a partir de la

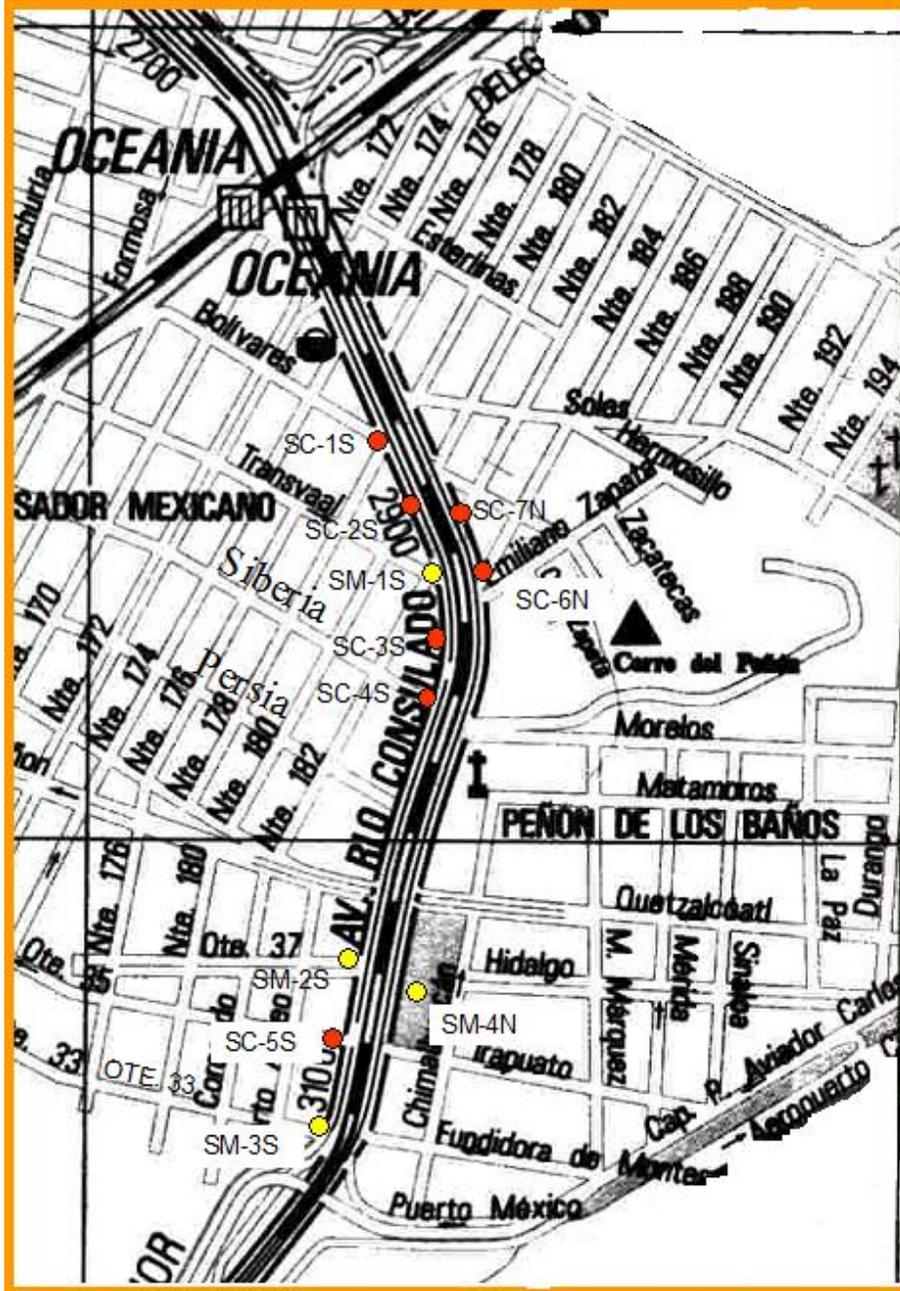
superficie del terreno, a la que se encuentra el contacto suelo-roca, por la influencia del Cerro del Peñón.

En la siguiente tabla se indica el tipo, longitud y la localización de cada sondeo.

SONDEO	LOCALIZACIÓN	Tipo de Sondeo	Longitud (m)	Tipo de roca encontrada
SM-1S	Norte 182 esq. Circuito Interior	mixto	41.80	Basalto
SM-2S	Oriente 37 esq. Circuito Interior	mixto	17.45	Basalto
SM-3S	Oriente 33 esq. Circuito Interior	mixto	16.70	Basalto
SM-4N	Interior Parque Niño Quemado	mixto	38.85	Basalto
SC-1S	Norte 178 esq. Circuito Interior	avance	46.00	No hubo roca
SC-2S	Norte 180 esq. Circuito Interior	avance	46.35	No hubo roca
SC-3S	Transvaal esq. Circuito Interior	avance	16.80	Basalto
SC-4S	Siberia esq. Circuito Interior	avance	11.00	Conglomerado
SC-5S	Oriente 35 esq. Circuito Interior	avance	25.00	Limo cementado
SC-6N	Emiliano Zapata esq. Circuito Interior	avance	28.00	Basalto
SC-7N	Norte 182 esq. Circuito Interior	avance	45.60	No hubo roca

Tabla IV.2

Los sondeos se localizaron en las calles adyacentes al tramo en las esquinas lados norte y sur. Su ubicación se indica en las figuras adjuntas. (Ver figura IV.2.1)



Croquis de localización de sondeos.
Figura IV.2.1

SONDEO SM-1S

Por lo que respecta al subsuelo se puede mencionar que en el sondeo SM-1S los estratos encontrados se presentan como sigue:

Desde la superficie del terreno hasta 3.60 m de profundidad se encuentra el Manto Superficial constituido por limos arenosos de color gris oscuro y 40% de contenido natural de agua.

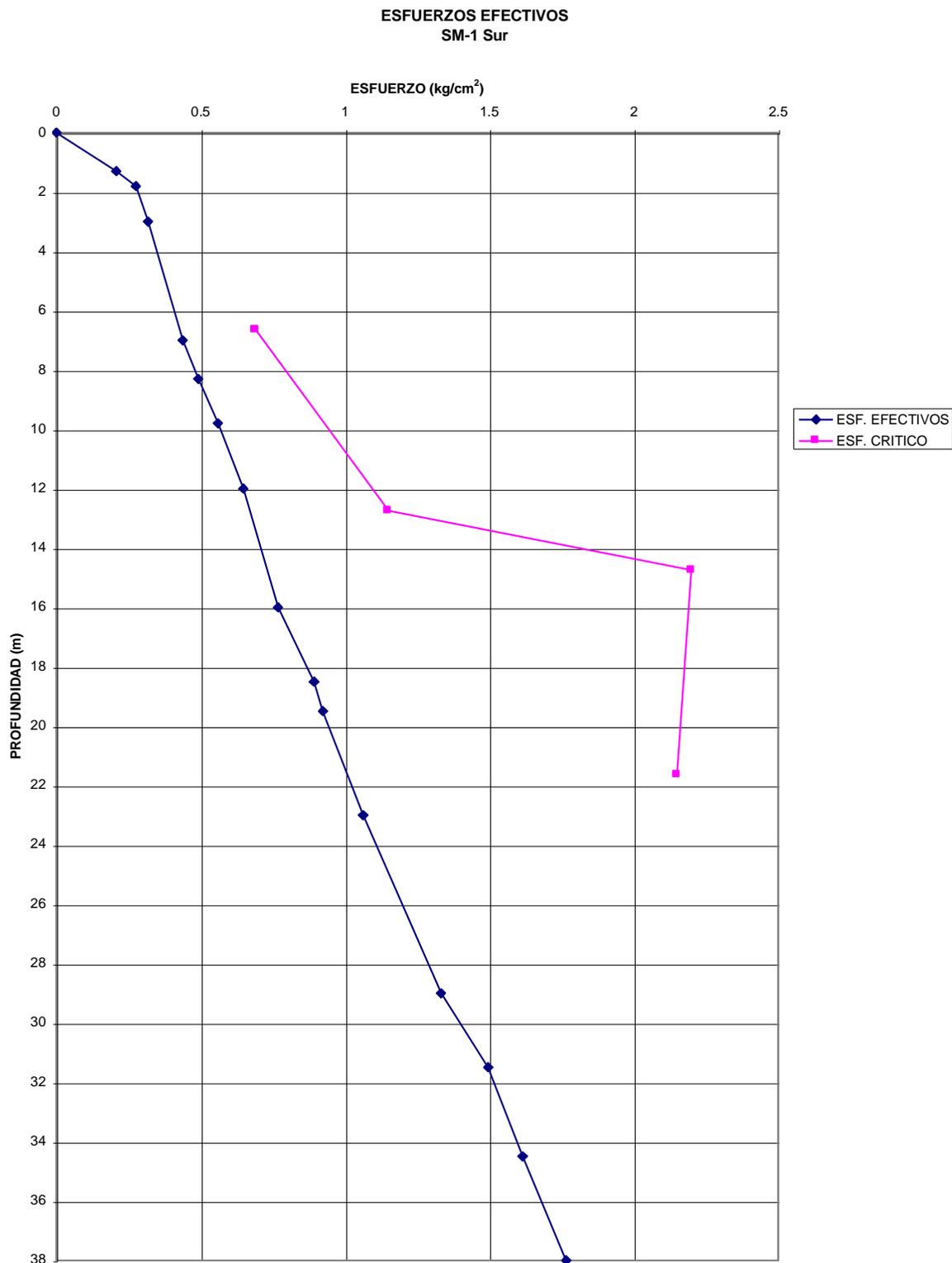
Entre 3.60 m y 29.00 m, se encuentra la Formación Arcillosa Superior constituida por arcillas compresibles cuyo contenido de agua varía entre 100% y 200%. Estos valores son bajos en comparación con los que presentan las arcillas de la zona de la Estación Oceanía, (450 m distante de este punto); lo que indica que estas arcillas están muy preconsolidadas, según se observa en la gráfica IV.2.1, en la que se han dibujado los Esfuerzos Efectivos versus a la Profundidad y se han adicionado las Cargas de Preconsolidación.

De 29.00 m a 31.50 m se encontró la primera Capa Dura formada por una arena limosa gris, con intercalaciones de carbonato de calcio.

De 31.50 m hasta 41.80 m se encontró arcilla volcánica color gris olivo de consistencia media, de 100% de contenido de agua en promedio, muy preconsolidada.

A 41.80 m de profundidad se detectaron fragmentos de basalto de la roca perteneciente al Cerro del Peñón.

Los sondeos ciegos SC-1S, SC-2S, SC-3S y SC-6N detectan la roca a 41.80 m, 17.45 m, 16.70 m y 28.00 m de profundidad respectivamente, excepto el sondeo SC-7N que no detectó la roca.



Gráfica IV.2.1
Gráfica de esfuerzos efectivos del sondeo SM-1S

Esta zona considera la estratigrafía entre la calle Oriente 33 del lado oriente y Fundidora de Monterrey del lado poniente (cerca del puente de retorno del Aeropuerto) y la cima del cerro del Peñón, aproximadamente en el paso a desnivel Quetzalcóatl, que es donde aflora la roca.

En este tramo se encuentran ubicados los sondeos mixtos: SM-2S, SM-3S, SM-4N y los sondeos ciegos SC-4S y SC-5S.

SONDEO SM-2S

Desde la superficie del terreno hasta una profundidad aproximada de 4.50 m se encontró el llamado Manto Superficial, formado por una arcilla limosa de consistencia blanda, de color café con grumos de carbonato de calcio, y un contenido natural de agua promedio de 60%.

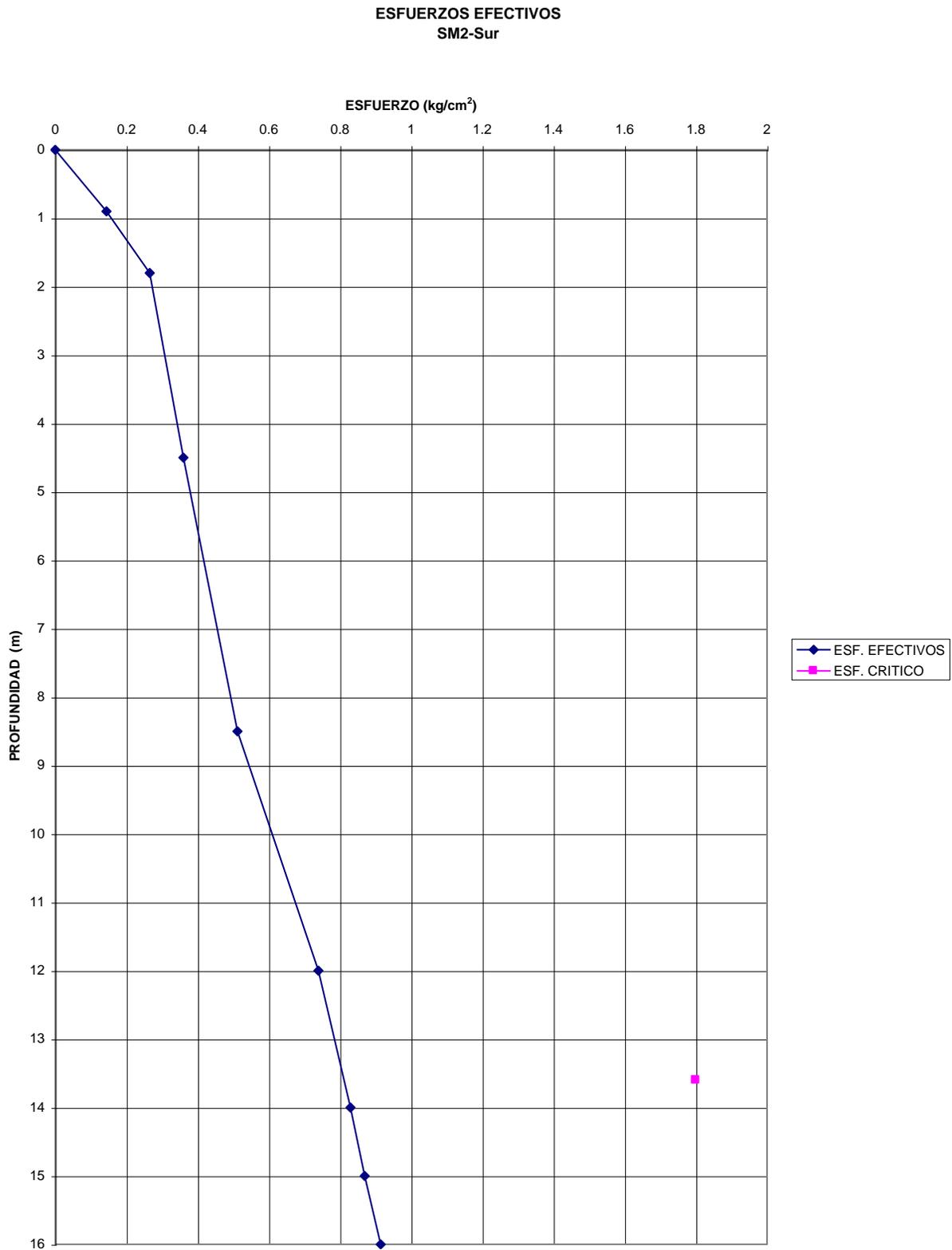
De 4.50 m hasta 8.80 m se encontró la arcilla volcánica del Valle de México, muy preconsolidada, cuyo contenido natural de agua varió entre 100% Y 160%. En la gráfica IV.2.2 de esfuerzos efectivos contra la profundidad, se dibujó el único valor de la Carga de Preconsolidación que se pudo hacer en el laboratorio (13.60 m de profundidad) y se confirma que la arcilla está muy preconsolidada.

Entre 8.80 m y 12.00 m se encontró un estrato de arena limosa con microfósiles con un contenido de agua del orden de 35% en promedio. Esta lente hace que la arcilla presente valores bajos de hundimientos ante la presencia de cargas externas, comparadas con las arcillas normalmente consolidadas de la zona de la Estación Oceanía.

Entre 12.20 y 14.50 se encontró nuevamente arcilla blanda con un contenido natural de agua variable entre 100% y 150%.

De 14.50 m a 16.40 m se encontró un limo arenoso con vidrio volcánico muy compacto, la resistencia a la Penetración Estándar arroja más de 50 golpes.

A los 17.45 m se encontraron fragmentos de roca basáltica del Cerro del Peñón.



Gráfica IV.2.2
Gráfica de esfuerzos efectivos del sondeo SM-2S

SONDEO SM-3S

Este sondeo, ubicado en la calle Oriente 33, es el más cercano a la estación Terminal Aérea y se encuentra francamente en la zona del Valle, su estratigrafía puede resumirse de la siguiente forma.

Entre la superficie del terreno y 8.00 m de profundidad se encontró una capa de arcilla y limo arenosos de consistencia media a muy firme, color café olivo, con grumos cementados de carbonato de calcio, su contenido natural de agua es en promedio de 60 % y su resistencia a la penetración estándar es variable entre 5 y 25 golpes.

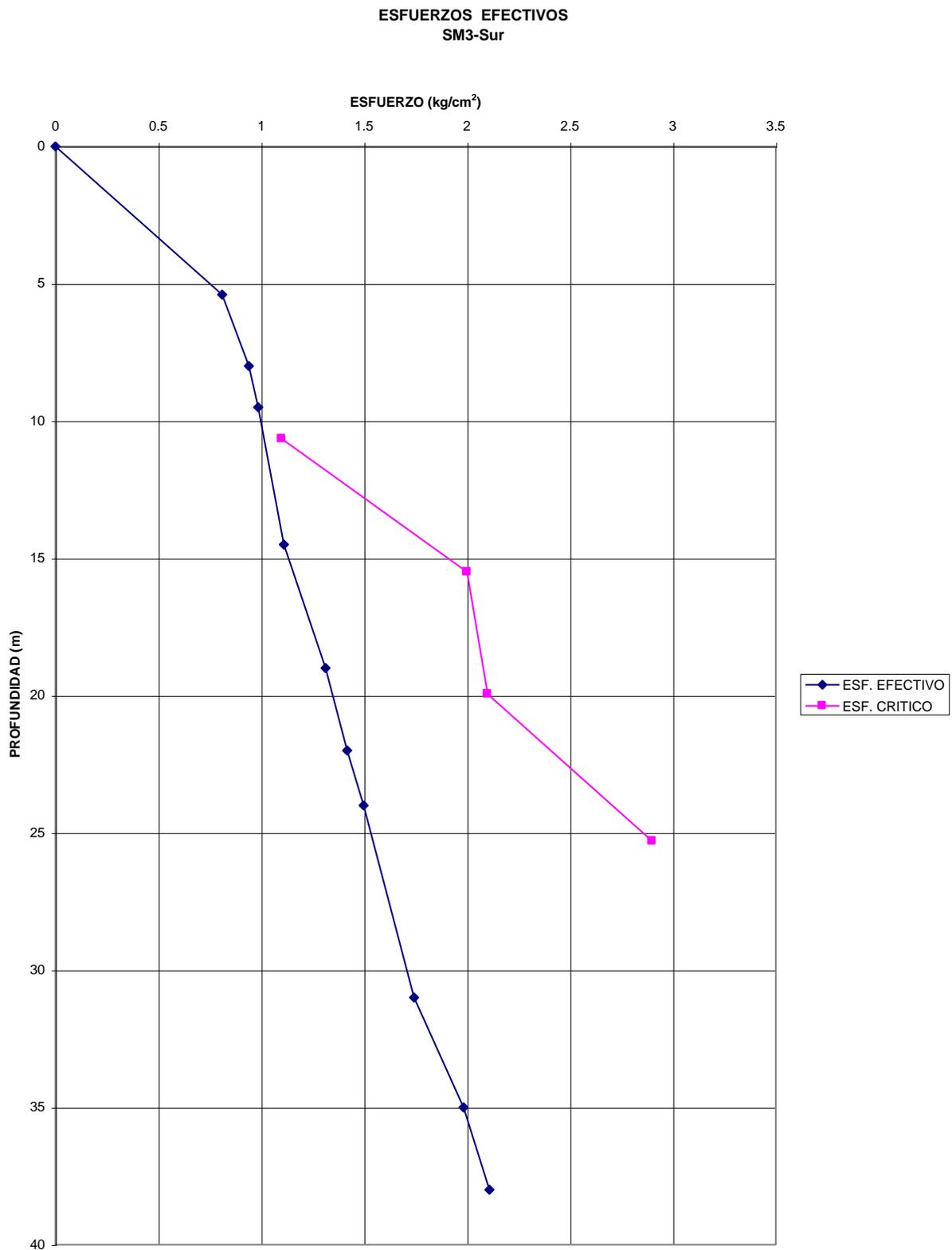
Entre 8.00 m y 31.50 m se encuentra la formación arcillosa superior cuyo contenido natural de agua varía entre 100% y 250%, con valores excepcionales de 283%. La arcilla se encuentra preconsolidada desde 10.00 m según puede observarse de la gráfica IV.2.3 donde se comparan los esfuerzos efectivos con la carga de preconsolidación derivadas de las pruebas de laboratorio de Consolidación.

Esta formación está intercalada por cuatro lentes de arena limosa incrustada por carbonatos de calcio, localizadas a 15.90 m, 22.00 m, 23.60 m y 28.20 m de profundidad. Estas intercalaciones hacen que la arcilla presente valores bajos de hundimientos ante la presencia de cargas externas, comparadas con las arcillas normalmente consolidadas de la zona de la Estación Oceanía.

Entre 31.50 m y 35.00 m se encontró la capa dura formada por limos arenosos de color café oscuro muy compactos, con 50% de contenido natural de agua en promedio, y una resistencia a la penetración estándar de más de 50 golpes.

Entre 35.00 m y 38.85 m se encontró un segundo estrato de arcilla de color gris oscuro, de 100% de contenido de agua promedio, muy preconsolidada, con una resistencia a la penetración estándar de 30 golpes.

En 38.85 m de profundidad se encontraron fragmentos de basalto del Cerro del Peñón.



Gráfica IV.2.3.
Gráfica de esfuerzos efectivos del sondeo SM-3S

SONDEO SM-4N

Este sondeo, localizado en el parque del “Niño Quemado” se encontró la siguiente estratigrafía.

Entre 0.00 y 1.80 m apareció un estrato de arena arcillosa compacta con carbonatos de calcio (CaCO_3) y contenidos de agua de 45%.

De 1.80 m hasta 13.40 m se encontró arcilla blanda con contenidos de agua variables entre 90% y 150%.

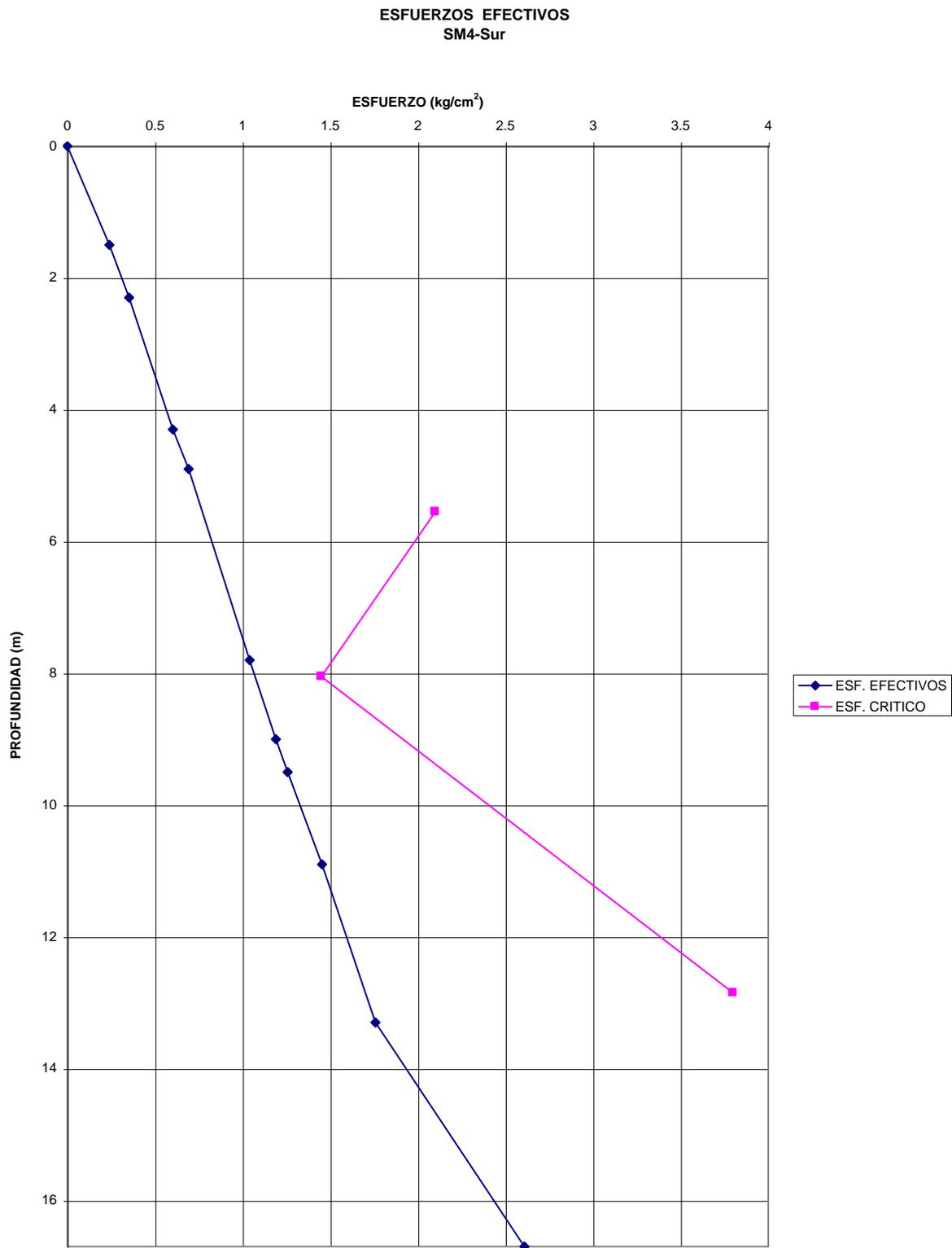
La arcilla se encuentra muy preconsolidada de acuerdo con la ubicación de las cargas de preconsolidación con respecto a los esfuerzos efectivos que se observan en la gráfica adjunta.

La arcilla está intercalada por cuatro lentes de arena limosa con grumos de CaCO_3 , localizadas a 4.50 m, 7.90 m, 8.80 m, 9.50 m y 10.80 m. Estas intercalaciones hacen que la arcilla presente valores bajos de hundimientos ante la presencia de cargas externas, comparadas con las arcillas normalmente consolidadas de la zona de la Estación Oceanía.

De 13.40 m hasta 16.70 m, que fue la máxima profundidad explorada, se encontró basalto fracturado, de color gris

En el sondeo ciego SC-4S se encontró un conglomerado muy cementado a los 11.00 m de profundidad, y en el sondeo SC-5S se encontró un limo arenosos cementado (tipo toba) a 25.00 m de profundidad, según puede observarse de la gráfica IV.2.4.

Como ya se explicó anteriormente, con toda la información de los sondeos se elaboró el plano de curvas de nivel de la roca subyacente en todo el tramo.



Gráfica IV.2.4
Gráfica de esfuerzos efectivos del sondeo SM-4N

NIVEL FREÁTICO

El nivel freático en los sondeos se detectó en las siguientes profundidades:

<u>Sondeo</u>	<u>Profundidad</u>
SM-1S	1.80 m
SM-2S	1.80 m
SM-3S	5.40 m
SM-4N	No se detectó

IV.2.1 GEOLOGÍA DEL LUGAR

El tramo Oceanía Terminal Aérea de la Línea 5 del Metro, se ubica dentro de la Cuenca del Valle de México, que es el resultado de procesos geológicos, volcánicos y tectónicos que se inician a partir del Mioceno con la emisión de un conjunto de rocas volcánicas que forman la moderna Faja Volcánica Transmexicana.

TECTÓNICA DE LA CUENCA DE MÉXICO

En el mapa geológico -tectónico de la Cuenca de México (De Czerna, et. al, 1988, Referencia 1), se presentan los materiales que afloran en la cuenca y la ubicación de los rasgos tectónicos y sísmicos obtenidos en ese estudio.

Con base en el estudio antes mencionado del Instituto de Geología de la UNAM, realizado después del sismo de 1995, se definió que el área urbana metropolitana esta atravesada por 14 fallas mayores

Estas fallas tiene una orientación preferencial NE-SW y se considera que son rasgos tectónicos modernos y varias de ellas pueden considerarse activas (por desplazamientos recientes y/o por la sismicidad somera, local y reciente asociada a ellas). Por la naturaleza del desplazamiento se consideran como fallas de desplazamiento lateral. A lo largo de algunas de ellas se localizan las áreas mas dañadas por los sismos de 1985.

Con relación a su repercusión en la zona del tramo Terminal-Aérea Oceanía de la Línea 5, se destaca que existen dos fallas inferidas de este tipo, que pasan cercanas a la zona del Peñón de Los Baños; sin embargo, la atraviesan con una dirección NE-SW, y no presentan evidencias de sismicidad en esta zona, debido a la ausencia de sismos recientes y de afectaciones importantes en las edificaciones del área.

LITOLOGÍA

En la zona de estudio afloran básicamente dos unidades litológicas:

- 1.- Las rocas volcánicas terciarias que conforman el Cerro del Peñón, y
- 2.- Los depósitos lacustres cuaternarios que se distribuyen en sus inmediaciones.

1.- ROCAS VOLCÁNICAS TERCIARIAS (TV)

El basamento volcánico más antiguo de la cuenca esta representado por las rocas volcánicas terciarias (Tv), formado por tobas, brechas y derrames de rocas de composición andesítica, que se encuentran profundamente erosionados, y están situados en algunas partes de la sierra de Guadalupe, en el cerro de Chapultepec y en el Peñón de los Baños.

Los estudios realizados en esta unidad indican que está afectada por dos sistemas de fallas y fracturas; la más antigua e importante corre en dirección NE-SW y otro subsecuente NW-SE; ambos han creado hundimientos escalonados. Sin embargo, es muy difícil definir con claridad estructuras individuales en este tectonismo, en vista de la escasez de afloramientos de rocas de esta edad en la cuenca.

2.- DEPÓSITOS LACUSTRES (QL)

En los alrededores del Cerro del Peñón se acumularon materiales granulares aluviales y depósitos superficiales de formación lacustre, principalmente arcillosos, con intercalaciones delgadas de pómez, arena negra y vidrio volcánico. Estos suelos se caracterizan en general por ser muy compresibles, de baja resistencia al corte y contenidos de agua muy altos.

En la zona del lago aparecen en general cinco estratos principales que conforman esta unidad, denominados a partir de la superficie del terreno, como: manto superficial, formación arcillosa superior, capa dura, formación arcillosa inferior y depósitos profundos.

MARCO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

El acuífero del Valle de México ha sido subdividido en tres sub-sistemas: Zona Metropolitana, Ex-lago de Texcoco y Valle de Chalco. La zona del Peñón se encuentra en los límites entre los dos primeros sub-sistemas.

El primer subsistema esta constituido esencialmente por materiales granulares de permeabilidad media a baja, con una gran cantidad de aprovechamientos y cuya recarga proviene de las sierras de Las Cruces y Chichinautzin. Mientras que el segundo se forma con materiales de baja permeabilidad, no existen extracciones considerables y el gradiente es casi

nulo, sin embargo en la zona del aeropuerto hay un flujo subterráneo en dirección este -oeste.

Las condiciones geohidrológicas en la zona cercana al aeropuerto son las siguientes:

PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO

Para ilustrar la profundidad del nivel estático en el acuífero del Valle de México se presentan dos configuraciones realizadas para los años de 1991(DGCOH, 1992) y 1997(DGCOH, 1997), las cuales ponen de manifiesto el grado de variación que han sufrido los niveles de agua en la zona de estudio.

La figura IV.2.1.1, de 1991, muestra que las profundidades en la zona cercana al aeropuerto eran menores de 30 m. Mientras que la figura IV.2.2.2, de 1997, la misma zona presenta valores entre 30 y 40 m.

EVOLUCIÓN DE NIVEL ESTÁTICO

El estudio de las configuraciones piezométricas en diferentes fechas, permite deducir las variaciones que ha sufrido el acuífero como consecuencia de la extracción por bombeo, por lo que la DGCOH ha realizado diversos análisis de la evolución en varios periodos de medición. A continuación se comentan los resultados de algunas configuraciones para la zona cercana al aeropuerto.

Evolución 1985 - 1996 (figura II.8, CAPITULO 2).- Se manifiestan abatimientos de 10 m para ese lapso de tiempo, lo que arroja velocidades de descenso del nivel de 1 m/año para esa zona.

Evolución 1986 - 1991 (figura II.9 CAPITULO 2).- En este periodo los abatimientos fueron del orden de 3 a 5m en un lapso de 5 años, lo que indica un ritmo de abatimiento de los niveles de 0.6 a 1.0 m/año.

Evolución 1994 - 1995 (figura II.10 CAPITULO 2).- Para este lapso corto se tienen abatimientos de 1 a 2 m; lo que confirma los ritmos de descenso del orden de 0.5 a 1 m/año para esa zona.

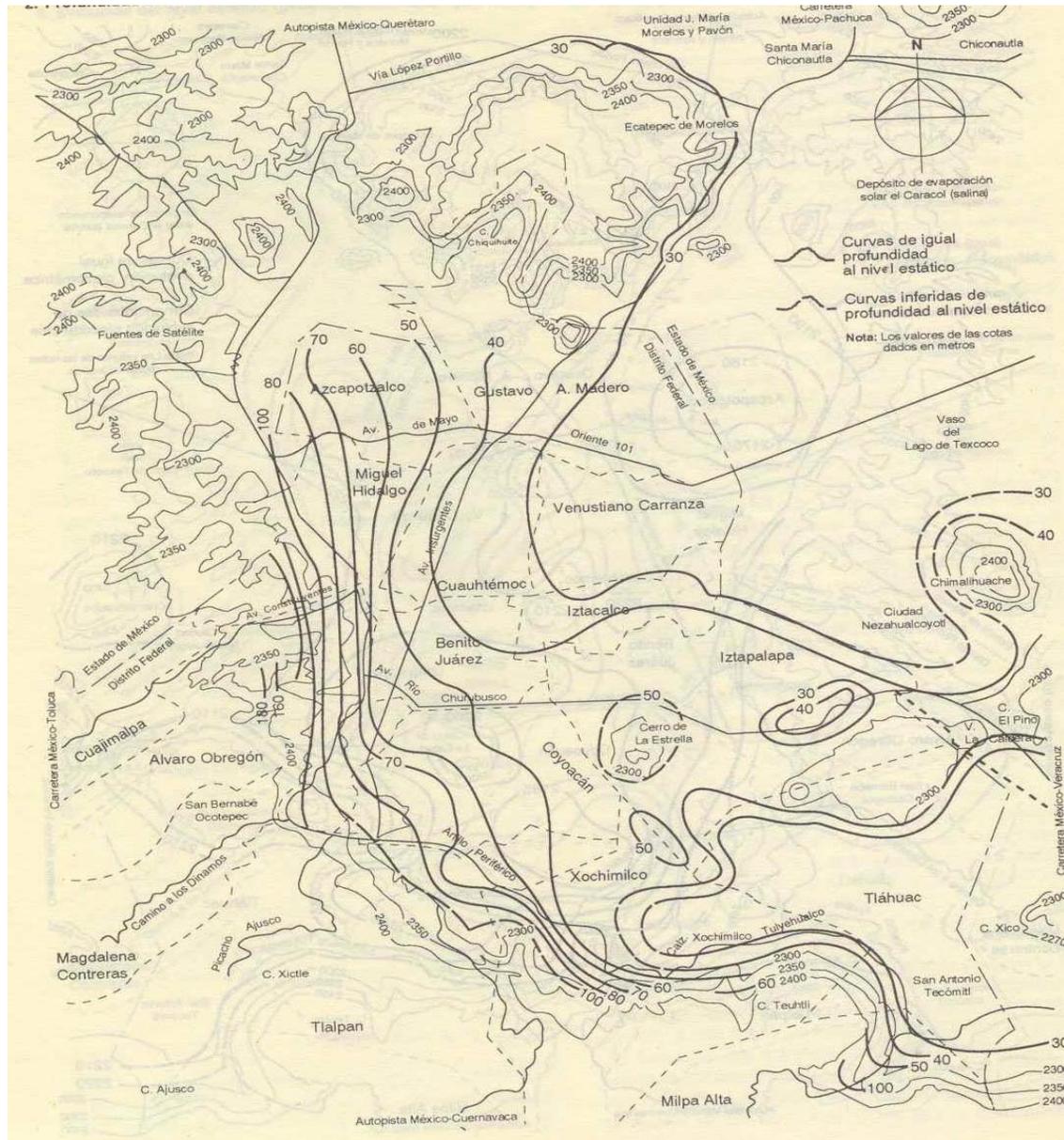


Figura IV.2.1.1
PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO EN 1991

Esta figura muestra que las profundidades en la zona cercana al aeropuerto eran menores de 30 m.

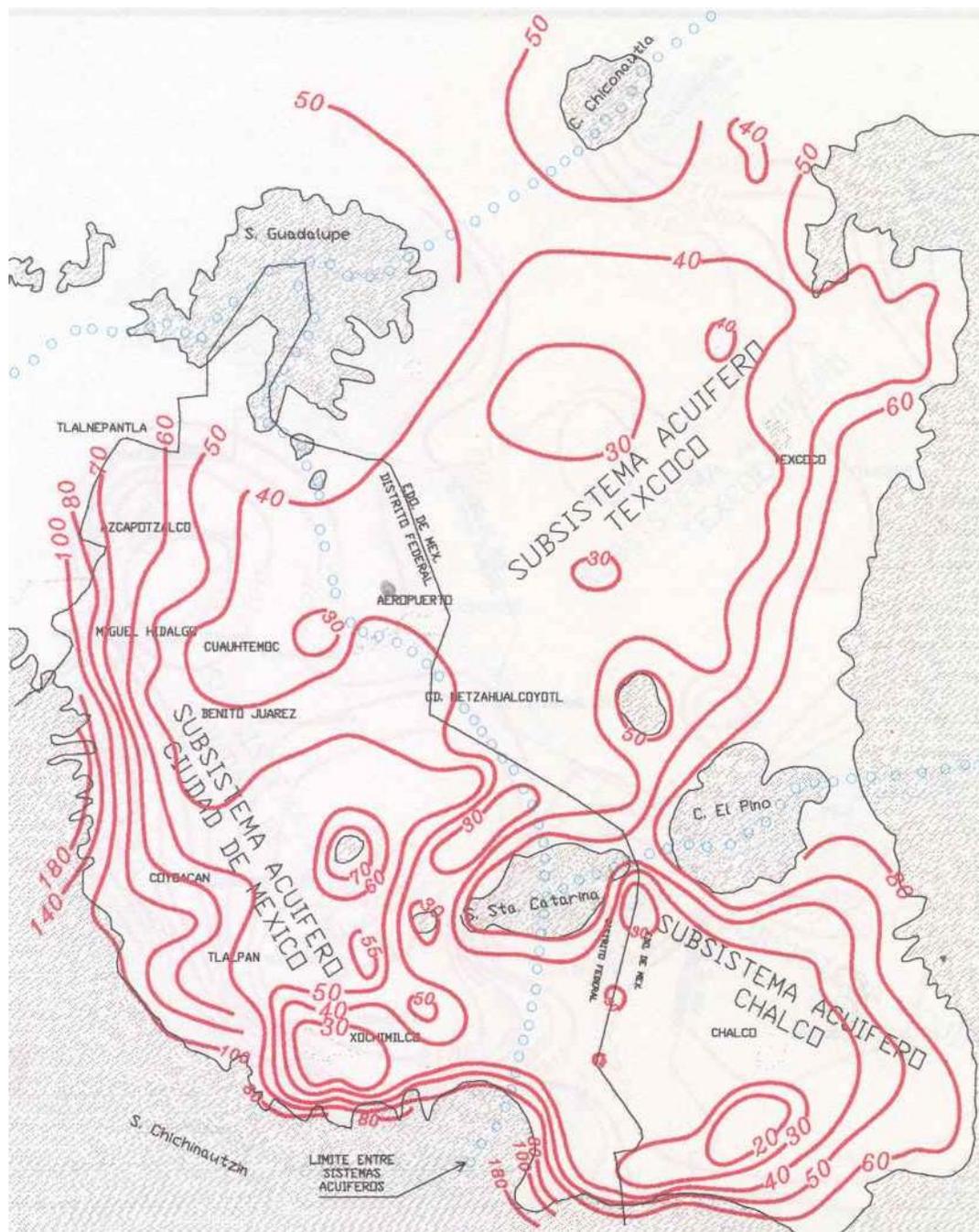


Figura IV.2.2
PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO EN 1997

Esta figura muestra que las profundidades en la zona cercana al aeropuerto eran entre 30 y 40 m.

IV.2.2 ESTRATIGRAFÍA DEL LUGAR

El tramo en estudio se ubica de acuerdo con la zonificación estratigráfica de la Ciudad, propuesta por R. Marsal y M. Mazari, y la zonificación propuesta por el Reglamento de las Construcciones del D. F. en la denominada Zona del Lago, aunque la presencia del Cerro del Peñón en la parte intermedia del tramo hace que la estratigrafía tenga condiciones especiales marcadas específicamente por la presencia de una zona dura y dos zonas (hacia Terminal Aérea y hacia Oceanía) que sufren el hundimiento del Valle.

Esta situación imprime una problemática no solo al comportamiento del Metro sino al de las vialidades adyacentes que con el tiempo presentan pendientes cada vez mayores para cruzar la cima del cerro del Peñón.

De acuerdo con los resultados de los sondeos de exploración ejecutados en la actualidad, y con la información de los sondeos ejecutados para realizar el proyecto hace poco más de 20 años, se pueden destacar los siguientes puntos importantes:

- I. La pendiente de la arcilla hacia la zona de Terminal Aérea es más suave que hacia la zona de Oceanía.
- II. La estratigrafía del subsuelo hacia la zona de Terminal Aérea está constituida por arcillas volcánicas compresibles, intercaladas por varias lentes de arena limosa de espesor variable que fueron producto de los depósitos aluviales producidos en diferentes épocas, en las pendientes del cerro. Lo anterior genera que el hundimiento regional de la arcilla en esta zona sea menor que en el tramo hacia Oceanía.
- III. En el tramo hacia Oceanía, no existieron depósitos aluviales francos (que conformaran lentes de arena limosa) debido a la topografía abrupta de la roca basal y a la presencia de una falla geológica, que no está activa, pero que produce deformaciones importantes en el tiempo, debido al hundimiento regional de la arcilla que está encima de ella.
- IV. La topografía de la roca y el corte estratigráfico mostrado en el estudio geológico, indican con claridad la presencia de esta falla, que es la que ocasiona los mayores daños en el cajón superficial del Metro.

A continuación se describirá brevemente la estratigrafía encontrada a ambos lados del Cerro del Peñón, ya que su conformación, como ya se

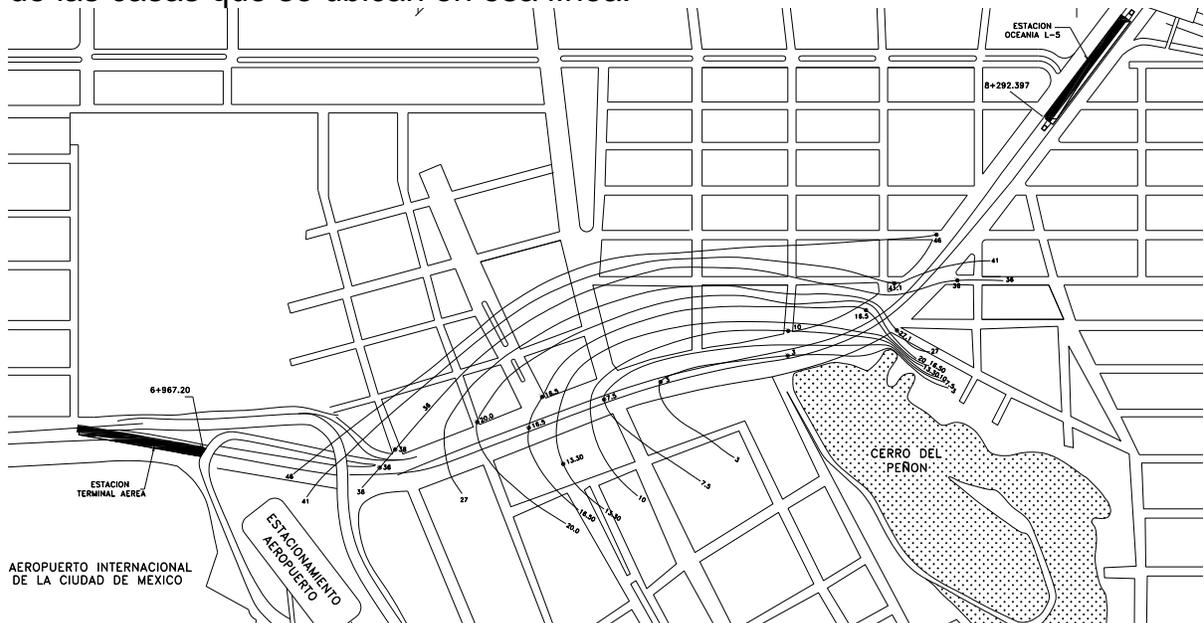
explicó en párrafos anteriores, es diferente en la dirección Terminal Aérea que en la dirección Oceanía.

ESTRATIGRAFÍA CERRO DEL PEÑÓN-OCEANÍA

Esta zona considera la estratigrafía entre la estación Oceanía y la calle Transversal por el lado oriente y Emiliano Zapata por el lado poniente, que es donde el cerro se manifiesta en forma más superficial.

En este tramo se encuentran ubicados los sondeos SM-1S, SC-1S, SC-2S, SC-3S, SC-6N y SC-7N.

En la figura IV.2.3, se pueden apreciar las curvas de nivel de la roca del fondo en la zona de la falla (E. Zapata y Transvaal), y en él se observa la forma en que se “aprisionan” las curvas de nivel, por lo que se infiere, que en esa zona existe un “cantil” que provoca que la arcilla que se encuentra por encima, se asienta en forma diferencial, provocando un agrietamiento en la superficie que se manifiesta por medio de un fracturamiento en la estructura del cajón a cielo abierto del Metro, así como en los pavimentos de la vialidad del Circuito Interior y de las calles adyacentes y en agrietamientos de las casas que se ubican en esa línea.



Curvas de igual Profundidad de la Roca.
Figura IV.2.3

ESTRATIGRAFÍA TERMINAL AÉREA-OCEANÍA

Para conocer las condiciones estratigráficas del subsuelo en el tramo de la Línea 5 del Metro, ubicado entre la Terminal Aérea y Oceanía se llevó a cabo un programa de exploración del subsuelo que permitiera definir la estratigrafía y propiedades de los materiales del subsuelo; así como para determinar con mayor precisión la profundidad y distribución del contacto suelo-roca.

Con la información de las exploraciones realizadas en este estudio, así con los cortes litológicos de los sondeos ejecutados en el estudio de COVITUR, 1980, se procedió a elaborar una sección estratigráfica que permitió definir la distribución de las unidades estratigráficas en el subsuelo, a lo largo de la traza del Metro en el tramo de Terminal Aérea a Terminal Oceanía. Ver Figura IV.2.4

Como resultado de la interpretación del perfil se definió la presencia de cuatro unidades estratigráficas, con las siguientes características:

- **MATERIAL DE RELLENO Y LIMOS ARENOSOS SUPERFICIALES**

Esta unidad se presenta en la parte superficial del terreno y a todo lo largo del trazo; la parte superior esta constituida por materiales de relleno, con un espesor de 0.5 a 1.5 m; y por debajo aparece un horizonte de limos arenosos de color café y gris, de consistencia muy blanda a blanda y con un espesor entre 3 y 4 m.

- **SUELOS ARCILLOSOS Y LIMO-ARENOSOS INTERCALADOS**

En la parte sur del Cerro del Peñón se presenta una intercalación de suelos arcillosos y limo-arenosos, los cuales tiene espesores de 2 a 3 m, con una buena continuidad lateral, los cuales están inclinados hacia el sur cubriendo a la roca, con una pendiente similar al basamento rocoso.

Las arcillas son de consistencia media, color gris y verde, con lentes de arena y vidrio volcánico, con contenidos de agua entre 100 y 500 %; mientras que los limos-arenosos, son firmes y tienen contenidos de agua entre 30 y 100%. En la parte basal se encontraron zonas con mayor predominio de arenas e incluso gravas

SECCION ESTRATIGRAFICA DEL TRAMO TERMINAL AEREA - OCEANIA

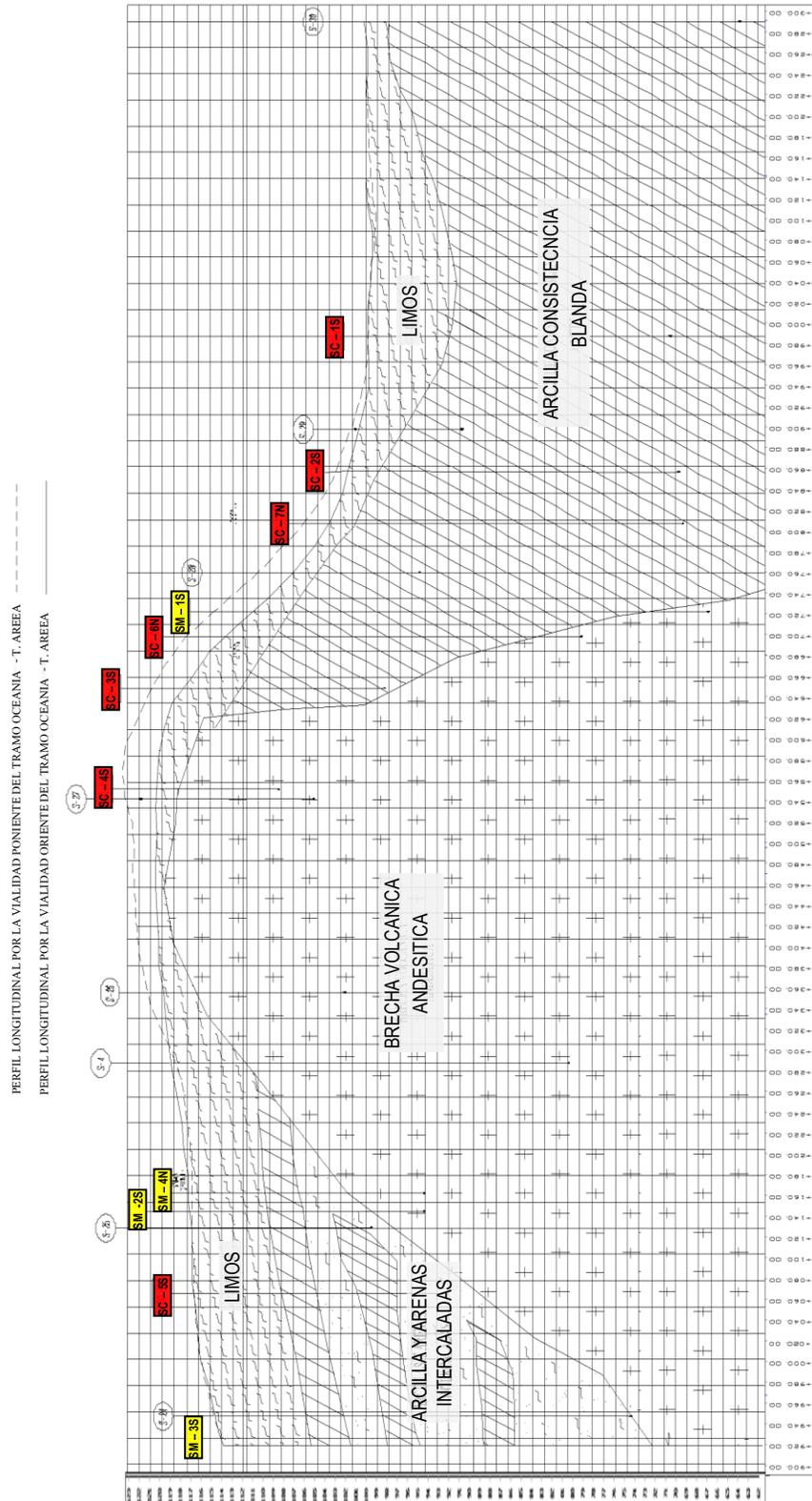


Figura IV.2.4
Sección estratigráfica a lo largo de la traza del metro en el tramo de Terminal Aérea - Oceanía

- SUELOS ARCILLOSOS

Hacia la parte norte del Cerro del Peñón se encontró un grueso paquete de suelos arcillosos lacustres; cuyo espesor aumenta rápidamente en virtud de que la roca basal se profundiza con una fuerte inclinación hacia el norte; ya que al pie del cerro se llegaron a detectar espesores de 40 a 50 m.

Las arcillas son de consistencia blanda a media, en colores café, verde olivo y gris, con lentes pequeñas de arena. Por debajo de los 30 m, se encuentran capas duras de 1 a 2 m de limos-arenosos duros y por debajo continúan las arcillas gris olivo de consistencia media con lentes de arena y vidrio.

- BRECHA VOLCÁNICA

En el cerro del Peñón aflora una brecha volcánica que corresponde con la denominada Formación de Rocas Volcánicas Terciarias (Tv), que tiene una amplia distribución en el subsuelo de la Cuenca del Valle de México. Esta roca aflora en la parte central del cerro del Peñón, que se encuentra alargado en sentido NW-SE sin embargo en el subsuelo su comportamiento es diferente en dirección N-S, ya que hacia el Sur, en dirección al Aeropuerto, la roca se va profundizando con una pendiente relativamente suave y constante; además los suelos que la cubren son en general de granulometría arenosa y de gravas. Mientras que al norte, la roca se profundiza rápidamente y con una pendiente muy fuerte; y está cubierta básicamente por fuertes espesores de suelos arcillosos de la zona del ex-Lago de Texcoco.

La roca es una brecha volcánica formada por fragmentos de roca andesítica, en tamaños de gravas a boleos, muy bien cementada, muy dura y resistente.

IV.2.3. HUNDIMIENTO REGIONAL

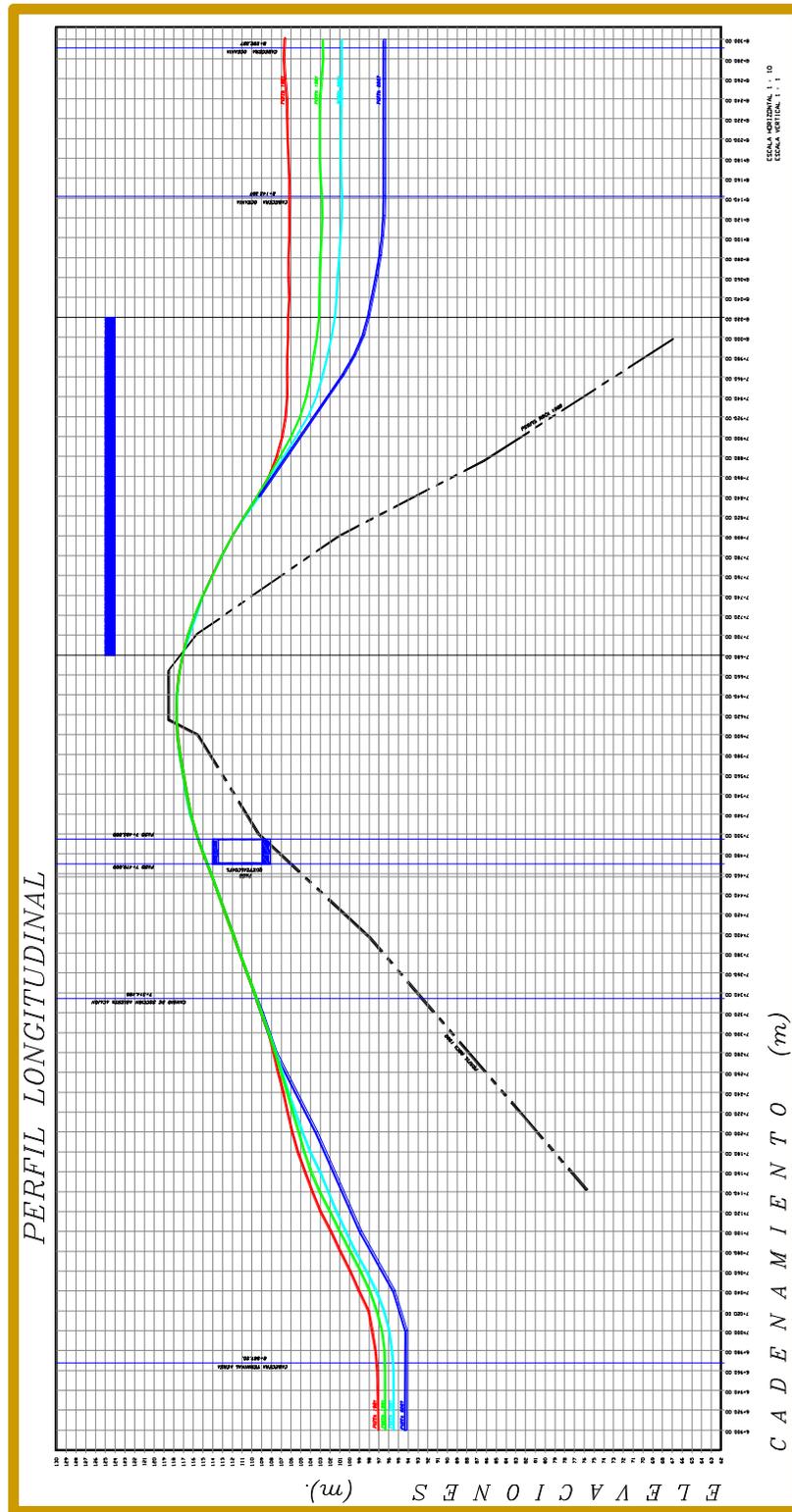
En este tramo, el hundimiento regional que sufre la arcilla circundante al Cerro del Peñón, es el fenómeno que ha causado la problemática de los hundimientos del tramo y las fracturas del cajón del metro.

La información editada por la Secretaría de Obras del Departamento del D. F. en su Plano Único de fecha octubre de 1994 denominado “*Hundimiento Medio Anual Período 1983-1994*”, el hundimiento medio anual en la zona aledaña al Cerro del Peñón, varía entre 20 y 25 cm/año. Sin embargo, por las nivelaciones que se han efectuado en años posteriores (1991 por el STC) se sabe que la velocidad de hundimiento regional es muy diferente en cada lado del Cerro.

En la zona cercana a la Estación Terminal Aérea, se midieron hundimientos regionales de 1.75 m, (usando como banco de nivel profundo el punto más alto del Cerro del Peñón, sobre el perfil del metro), lo que da una velocidad media de hundimiento regional de 8.3 cm/año; en cambio, con esas misma nivelaciones, el hundimiento promedio entre 1991 y 2000, en la zona cercana a la cabecera de la Estación Oceanía, fue de 1.98 m, lo que da una velocidad media de hundimiento regional de 20 cm/año

De acuerdo con la información anterior, se puede comprender que las deformaciones del cajón del Metro en la zona subterránea, (hacia Terminal Aérea) son menores que las producidas en la zona a cielo abierto (hacia Oceanía).

En la Figura IV.2.5, se puede observar que las nivelaciones que se han efectuado sobre la pista de rodamiento del Metro, en las fechas de 1980, 1991 y diciembre de 2000, indican que los movimientos del Valle a ambos lados del Cerro del Peñón, presentan dos puntos de convergencia, el primero de ellos se presenta a la mitad de las calles de Fundidora de Monterrey e Irapuato, en el **cadnamiento aproximado 7+280** y el segundo en la “zona de la falla”, en la calle Emiliano Zapata por el lado poniente y en la Calle Transval por el lado oriente, correspondiente al **cadnamiento aproximado 7+880**.



Comportamiento de la pista de rodamiento en entre los años 1981,1991 y 2001.
Fig. IV.2.5

Estos puntos, denominados “**puntos de pivoteo**” corresponden a la zona del Cerro del Peñón que no se hunde, es decir representan un tramo fijo, no sujeto al hundimiento del valle, de una longitud aproximada de 600 m.

A partir de ambos lados de estos “puntos de pivoteo”, tanto la rasante del Metro, como la de las vialidades, se hundén gradualmente hasta alcanzar las velocidades de hundimiento descritas en el párrafo anterior.

Las variaciones en los niveles estáticos antes descritos permiten relacionar el efecto provocado por la sobreexplotación de los mantos acuíferos con el hundimiento gradual que ha venido sufriendo la ciudad de México, el cual varía de una zona a otra debido a la constitución del suelo y a los volúmenes de extracción del agua subterránea.

La extracción del agua subterránea esta causando un abatimiento del nivel piezométrico, produciendo un hundimiento del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales; estos hundimientos, al ser diferenciales, provocan diversos problemas, entre ellos los agrietamientos de construcciones y vialidades, etc., y como se ha visto a lo largo del desarrollo de la presente tesis, el abatimiento piezométrico es proporcional al crecimiento demográfico, para el cual ya se han planteado soluciones que veremos en el capítulo siguiente.

En la zona del aeropuerto se presentan hundimientos entre 20 y 25 cm anuales para el periodo 1983 – 1992; y de acuerdo a predicciones efectuadas por la DGCOH si se mantienen los esquemas actuales de explotación del acuífero, la predicción del hundimiento para el periodo 1994-2000 era entre 125 y 150 cm en ese periodo.

CAPITULO V.

DIAGNÓSTICO DEL TRAMO TERMINAL AÉREA – OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO

V.1 DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA RESULTADO DEL ANÁLISIS TOPOGRÁFICO

En los capítulos anteriores de la presente tesis, se ha planteado que en el tramo de la Terminal Aérea-Oceanía, existen hundimientos diferenciales y que desde el inicio de operación de la línea ha causado hundimientos en promedio de 25 cm. por año.

Sin embargo, durante los primeros 11 años, el hundimiento en la cabecera sur-oriente de la estación Oceanía fue de un total de 3.1 m., lo que arroja un promedio en ese lapso de 28 cm. por año.

En el siguiente período de 10 años, el hundimiento fue de 2.1 m. en esa misma cabecera, lo que indica un promedio de 21 cm. por año. Se aprecia que hay una reducción importante en la velocidad de movimiento de la zona.

No se puede predecir cual será la velocidad de hundimiento a partir de ahora, pero no parece razonable pensar que se incrementará, más parece haber una tendencia a la reducción.

Con todo ello se llegó a la conclusión, que desde el cerro del Peñón de los Baños y en dirección Instituto Politécnico (tramo B) (fig.V.2), se han presentado hundimientos, algo mayores a 5m en el lapso comprendido de 21 años; entre el inicio de operación de la línea y la fecha de estudio, lo que arroja un promedio, en ese período de 25 cm. por año.

Sin embargo, en las cercanías del cerro, a medida que el manto de arcilla va reduciendo su espesor, estos hundimientos se reducen hasta alcanzar un punto que es el contacto con la roca del cerro, en el que ya no hay movimiento. Este es el punto que se le llama de “pivoteo” (figura V.1), a partir del cual inician los desplazamientos de las arcillas en la dirección señalada. Por consecuencia alcanza una pendiente del 6.1 % (fig. V.2); entre las

estaciones 8+020 y 8+880 del tramo "B", en dirección del instituto politécnico.



Figura V.2
PLANTA
TRAMO TERMINAL AÉREA-OCEANÍA

En esta fotografía se observan los puntos de pivoteo, el paso a desnivel Quetzalcoatl, el cambio de tramo de superficial a subterráneo, la "falla", la zona de aparatos de vía y el Cerro del Peñón

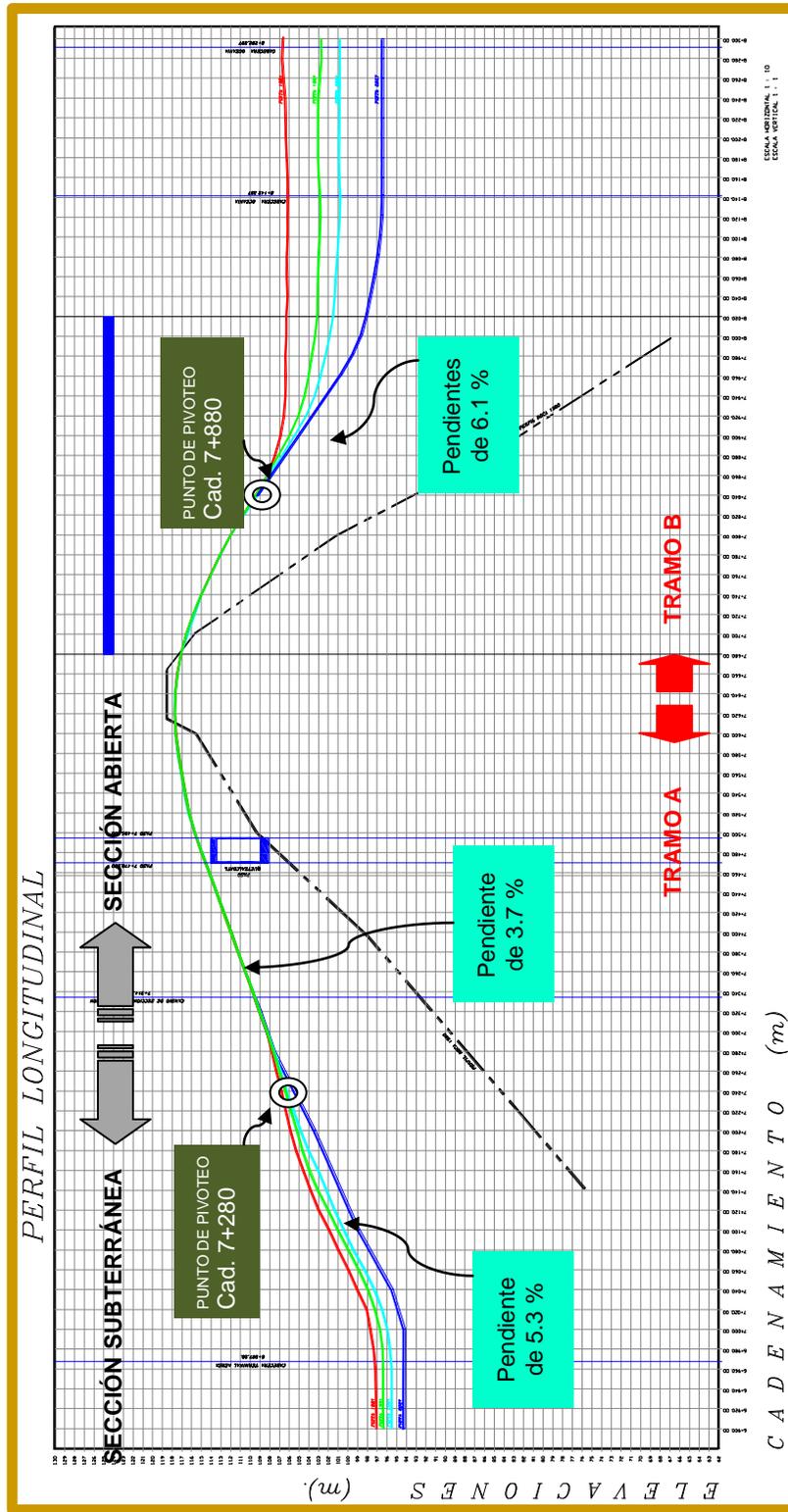


Figura V.2
PERFIL
ESTADO REAL DE LA PISTA DE RODAMIENTO EN TODO EL TRAMO
ANTES DE LA SOLUCIÓN

En cuanto a la otra dirección, es decir, del cerro del Peñón de los Baños hacia la estación Pantitlán, (tramo A), el fenómeno es similar, sólo que los desplazamientos han sido menores, del orden de 1.75 m. en el mismo lapso de 21 años, es decir, 8.3 cm. por año aproximadamente.

Las pendientes máximas son de 5.3 % en el tramo subterráneo y de 3.7 % en el tramo superficial (ver gráfica V.2). También en esta parte de la línea se puede hablar de un punto de “pivoteo”, que se presenta por las mismas razones señaladas para el anterior tramo de la línea.

Por otra parte, el problema fundamental que se presenta es la dificultad que tienen los trenes para remontar las cuestas en época de lluvias, cuando la pendiente es mayor de 4 % en tramos descubiertos, por razón de que los neumáticos no tienen la suficiente fricción con la pista de rodamiento y patinan. En contraparte, en los tramos subterráneos o cubiertos, en los que no existe el efecto nocivo de las lluvias, los trenes pueden circular con una pendiente máxima de hasta 7 %. De ninguna manera este es un valor óptimo de la pendiente, pero sí es el máximo aceptable.

De acuerdo a los resultados tenemos para el caso de sección abierta las pendientes máximas obtenidas en cada tramo que son 3.7 % y 6.1 % y si la pendiente máxima de diseño para estos espacios es de 4 %, ya se tiene una pendiente crítica y en el tramo B, ya se sobrepasa por mucho. En el caso de la sección subterránea o de cajón, tenemos una pendiente de 5.3 % y la máxima permisible es de 7 % por lo tanto tenemos una holgura relativa.

También observamos en esta misma gráfica que en donde la pendiente es mayor se encuentra lo que denominamos la zona de falla o agrietamiento regional que se debe al cambio abrupto de material del suelo en esta zona.

El cambio abrupto de pendiente del talud Norte del Cerro del Peñón puede explicarse de varias maneras:

- I. La erosión natural que sufrieron las rocas por efecto del intemperismo al paso de los años, posiblemente dio lugar a que el talud norte quedara más escarpado.
- II. Hay evidencias fotográficas y morfológicas de que en esta zona se abrieron bancos de material para extracción de material pétreo, que también debieron influir en la modificación de la topografía original del terreno en esta zona.
- III. Existe también la posibilidad de que el cambio abrupto de pendiente sea debido a la existencia de una falla geológica de tipo normal, que haya

desplazado lateralmente a la roca volcánica en épocas geológicas pasadas.

Sin embargo, en la bibliografía geológica de la región no se encontraron referencias sobre fallas con esta orientación que pasen por la zona de estudio

Tampoco hay evidencias tectónicas de que se trate de una falla geológicamente activa, ya que, el patrón de fallamiento regional que se considera activo se encuentra alineado en dirección NE-SW; y las evidencias de sismicidad reciente de estas fallas se presentan principalmente hacia la zona poniente del Valle de México

Siguiendo con las condiciones extremas aceptables para el funcionamiento de los trenes del Metro, en lo que se refiere a radios de curvatura en curvas verticales, el mínimo aceptable es de $R = 1250$ m. y la pendiente máxima aceptable en zona de aparatos de vía es de 2 %.

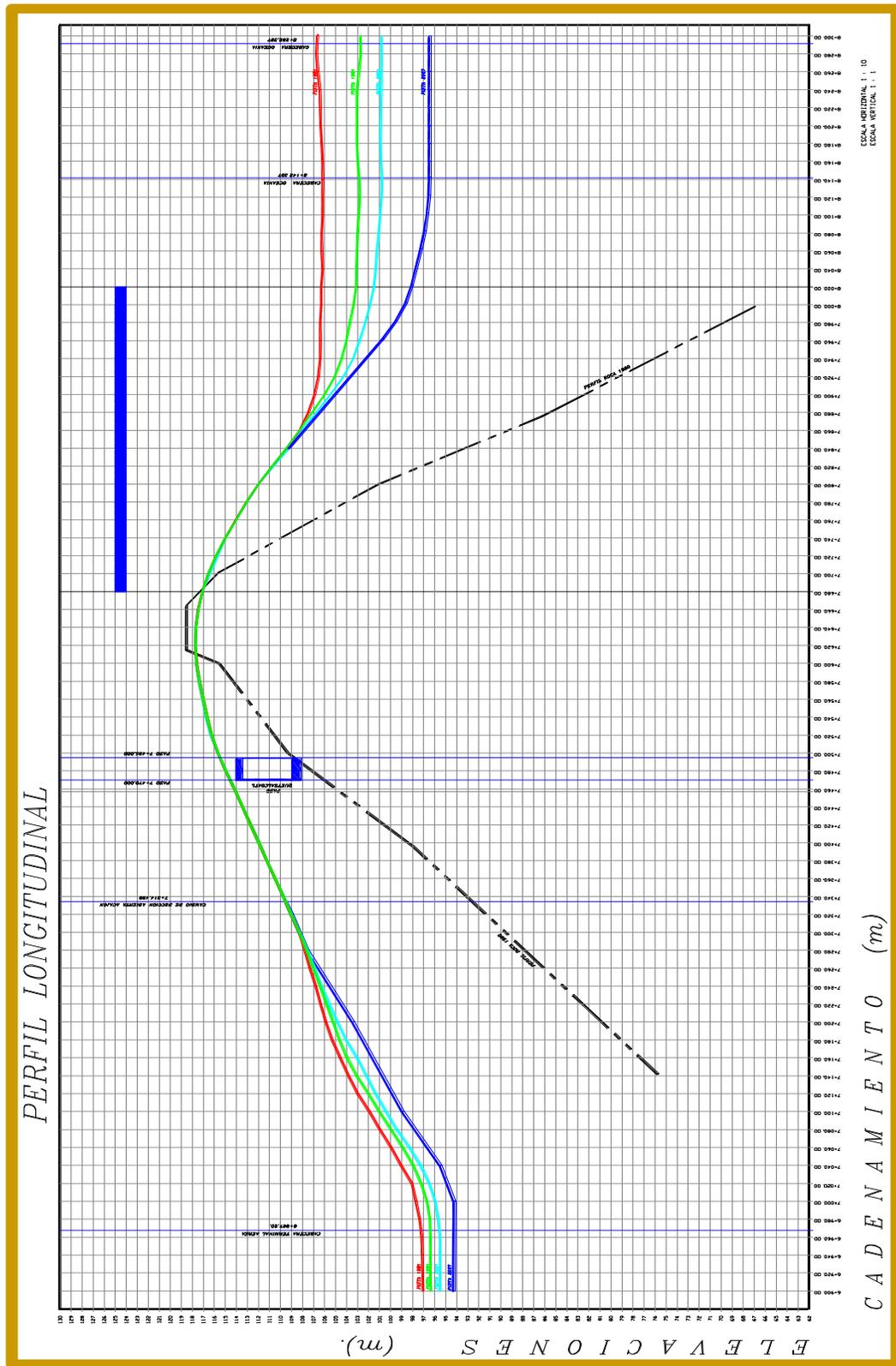
Utilizando esta información se puede llegar a una configuración aceptable de las vías, alcanzada en el tiempo, bajo las condiciones normales de hundimiento del Valle de México en esa zona.

En la figura V.3 se presenta el perfil longitudinal de cada uno de los distintos años, de cómo se ha presentado el perfil del tramo de línea del metro en estudio y también se presenta la línea de cómo estaría hasta el año de 2027.

En esta figura tenemos cuatro líneas de diferentes colores, cada una representa la pista del tren en sus diferentes años que a continuación se enlistan para la comprensión del perfil que viene a continuación:

-  Pista del año 1981
-  Pista del año 1991
-  Pista del año 2001
-  Pista del año 2027

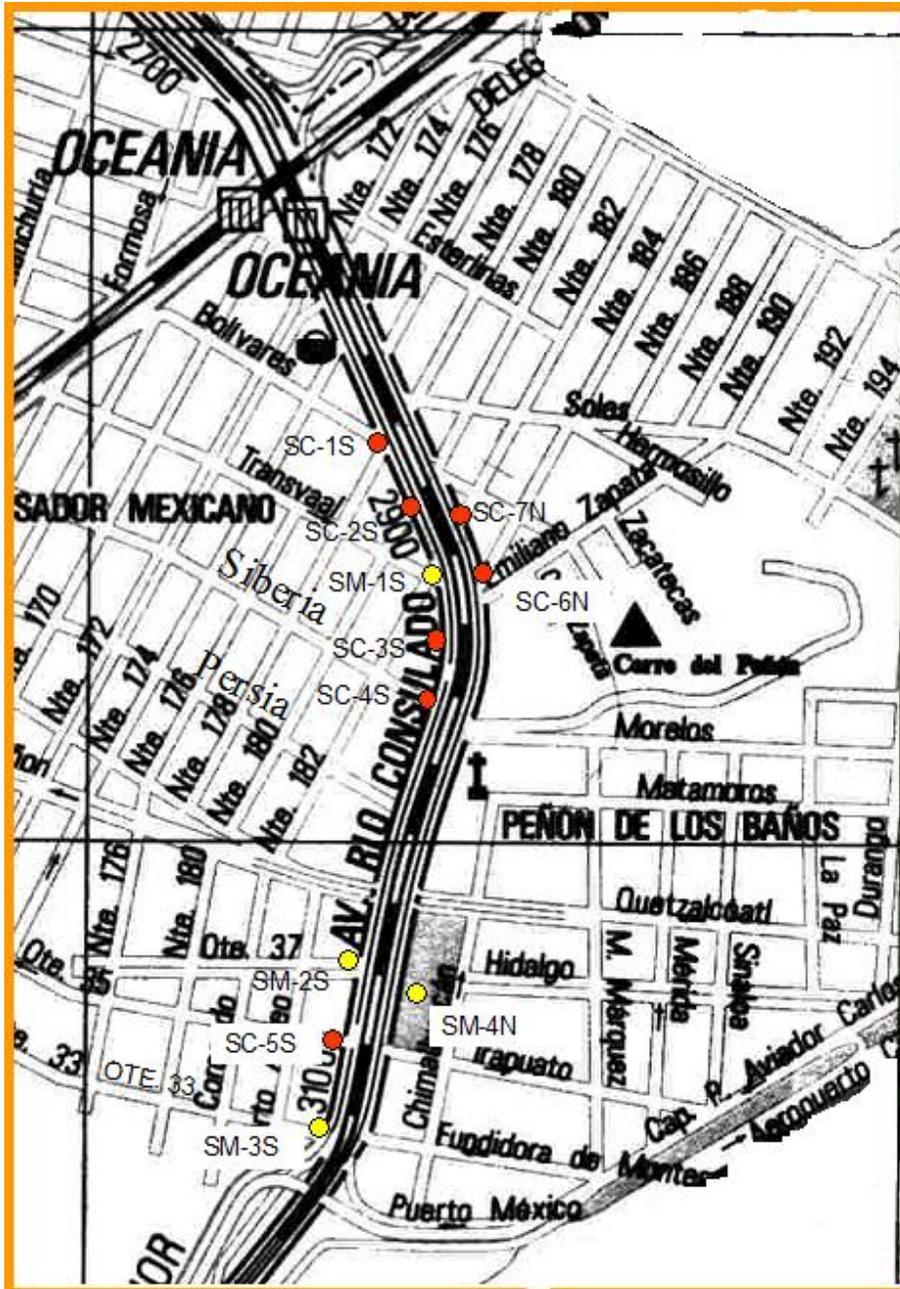
De acuerdo con estas líneas se observa el desplazamiento histórico y la proyección al 2027 de acuerdo al hundimiento regional que se siga teniendo con el paso de los años, y esto nos sirve para tomar una solución al efecto del hundimiento de esta zona.



Perfil longitudinal del tramo Terminal Aérea –Oceanía
Gráfica V.3

V.2 DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA RESULTADO DEL ANÁLISIS GEOTÉCNICO.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la exploración geotécnica de acuerdo a la tabla IV.2, del capítulo IV y con base en la ubicación de los sondeos (figura V.4), se corroboran los análisis de la parte topográfica para poder dar un diagnóstico de acuerdo a los estudios realizados.



Croquis de localización de sondeos.

Figura V.4

De la figura anterior se observa la distribución de los sondeos que se realizaron para detectar el tipo de suelo que actualmente está trabajando en la zona, con esto podremos saber la resistencia y compresibilidad del suelo en cuestión y hacer una extrapolación de su comportamiento para los siguientes años.

Los resultados que arrojan las pruebas son muy inconsistentes de acuerdo a la tabla IV.2 del capítulo IV, pues podemos ver, que en algunos puntos existe roca a cierta distancia relativamente cercana a la superficie y en otros que se encuentran localizados a pocos metros no se encontró roca, es por eso, que existen hundimientos diferenciales muy grandes.

Por ejemplo, en los sondeos SC-1S y SC-2S (puntos rojos), se penetró hasta los 46 metros de profundidad y nunca encontraron roca, mas delante de estos sondeos se hizo uno que es el SM-1S (punto amarillo) en donde si se encontró roca a los 41 metros aproximadamente, en el otro lado de estos estudios se realizaron dos pruebas más, tratando de respetar la misma distancia, estas pruebas son SC-7N y SC-6N (puntos rojos), en donde los resultados de ambos fueron: en el primero a los 28 metros se encontró basalto y en el segundo llegaron a los 45 metros y nunca encontraron roca, en este tramo tenemos la denominada “falla”, debido a que el cambio de material sucede en un tramo muy corto, por lo que lo denominamos: “cambio abrupto de materiales”, esto puede ser probablemente a que en años anteriores el cerro del peñón de los baños, fue banco de materiales, y se desbastó en este punto en el cual presenta la falla del tramo: Terminal Aérea – Oceanía.

En esta falla se tienen hundimientos mayores con respecto al resto del tramo, mismos que son causados por el tipo de suelo y la extracción de agua, esto produce que el cuerpo de concreto de la línea del transporte colectivo, tenga grietas y se vaya deformando estructuralmente, para evitar estas situaciones se tienen que diseñar cajones para tramos específicos donde se encuentren puntos críticos para evitar desplazamientos. Los ejemplos más claros de estos puntos críticos son los “puntos de pivoteo”, donde la estructura del cajón correspondiente al lado del cerro, poco a poco se va quedando en un nivel superior al resto de la estructura, por lo tanto se tendría que pensar en una solución que contemple este comportamiento para minimizar estos efectos y el cuerpo trabaje uniformemente.

Por otro lado se tendría que pensar en soluciones para contrarrestar los efectos causados por el abatimiento de la piezometría del Valle de México,

para minimizar el riesgo de futuras consolidaciones del suelo, al mismo tiempo se tendrían que revisar de manera integral los proyectos derivados del plan maestro del sistema de transporte, haciendo más amplios los estudios de mecánica de suelos, tanto para las futuras líneas como para las existentes, con la finalidad de hacer más longeva la vida de este sistema, ya que la tendencia de las necesidades de la población va hacia la utilización de estos medios de transportación.

CAPITULO VI.

PROPUESTAS DE SOLUCIÓN DEL TRAMO TERMINAL AÉREA –OCEANÍA DE LA LÍNEA 5 DEL METRO

Se plantearon dos soluciones para este problema, mismas que a continuación se exponen brevemente:

VI.1 SOLUCIÓN CONSISTENTE EN RENIVELACIONES PERIÓDICAS

Permitir que el suelo se siga deformando de acuerdo al hundimiento general del Valle, e ir haciendo renivelaciones periódicas para ajustar el perfil de las vías. Para esto será necesario que previamente se haya techado la zona de pendientes máximas, que corresponden a los cadenamientos comprendidos entre el 7+314 y 8+020, dentro de este intervalo las pendientes son mayores al 4 %, al mismo tiempo se tendrá que estriar la vía para incrementar el coeficiente de fricción, para impedir que las llantas del tren deslicen. Con esto y las renivelaciones periódicas se podrá alcanzar una vida útil adicional del tramo sin hacer mayores reparaciones. Figura VI.1

VI.2 SOLUCIÓN CONSISTENTE EN DEPRIMIR EL CAJÓN Y RELLENARLO CON BALASTO

Realizar una obra mayor consistente en la excavación de un tajo por el Cerro del Peñón de los Baños, que inicie en el paso a desnivel Quetzalcóatl, como punto más alejado para no dañarlo, en el cadenamiento 7 + 495, y de esta manera deprimir el piso del cajón hasta el cadenamiento correspondiente al punto de “pivoteo”, que es el 7 + 880. Este nuevo cajón tendría que rellenarse, posiblemente con balasto, para alcanzar los niveles actuales de vía, e irle retirando balasto con el paso del tiempo, para obtener los niveles adecuados. Otro tanto tendría que hacerse entre el punto de “pivoteo” y la cabecera sur-oriente de la Estación Oceanía, sólo que en este caso habría que rellenar el cajón con un material muy ligero para no sobrecargar el suelo, y también realizar renivelaciones periódicas para obtener la configuración adecuada de las vías. En esta solución también

habría la necesidad de estriar vías y techar el tramo para evitar los efectos ya señalados. Figura VI.2

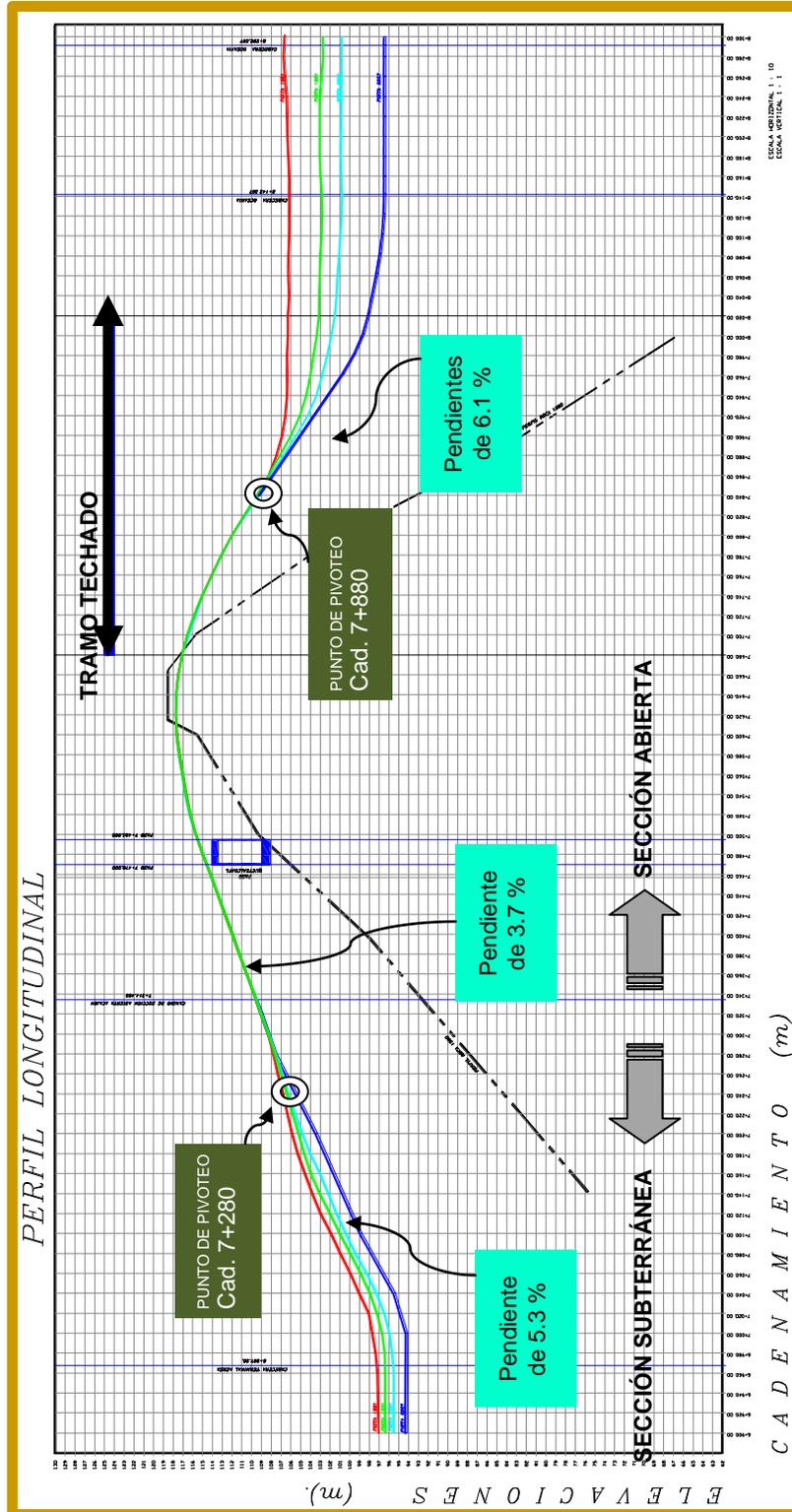


Figura VI.1
SOLUCIÓN 1: TECHADO EN LA ZONA DE PENDIENTES MÁXIMAS

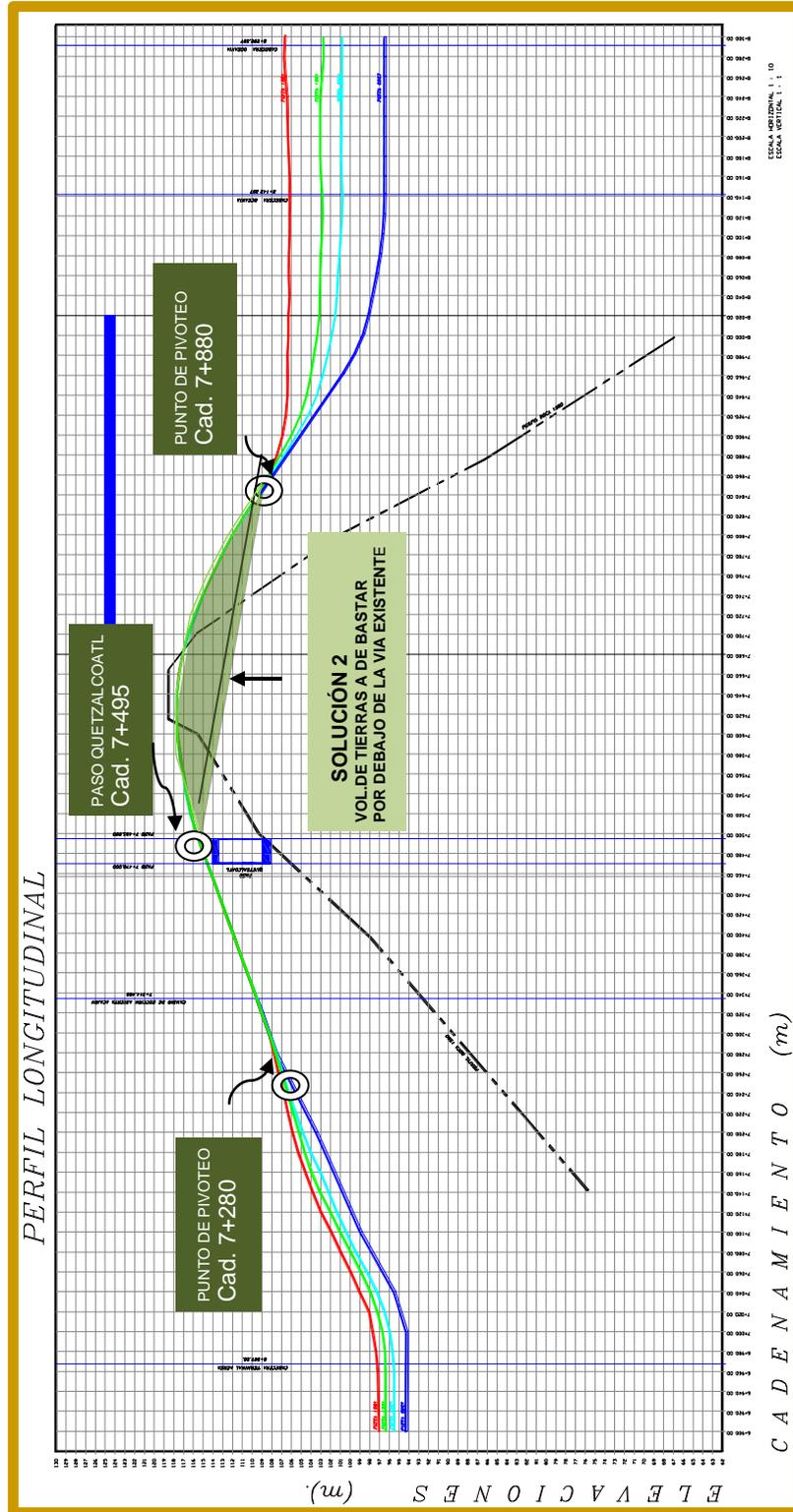


Figura VI.2
SOLUCIÓN 2: VOLUMEN DE EXCAVACIÓN

VI.3 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DEFINITIVA

Entre estas dos soluciones planteadas, las autoridades de STC y DGCOSTC decidieron aceptar la primera por diferentes razones, las que son, entre otras: que no requiere interrupciones importantes en la operación de la línea, si acaso algún fin de semana y trabajos nocturnos; que cubre un período suficientemente grande de tiempo de operación, mínimo del orden de 20 años; que la inversión es pequeña y que, en todo caso, permite diferir la aplicación de la segunda opción por lo menos en ese período, con las evidentes ventajas financieras.

El planteamiento general de la solución aceptada es el siguiente:

Puesto que la pendiente actual es superior a la máxima aceptable en tramos descubiertos pero menor a la máxima aceptable en tramos cubiertos, en determinadas zonas, se propone cubrir el tramo con una estructura ligera que impida el ingreso de agua a las vías en esas.

De esta manera queda una reserva de pendiente, por así llamarla, la que se puede ir dando con el paso del tiempo como consecuencia de los movimientos del suelo en esa región.

Esos movimientos del suelo se darán desde la Estación Oceanía hasta el punto de “pivoteo” en el Cerro del Peñón de los Baños con alguna variación como consecuencia del espesor del manto de arcilla subyacente.

Se puede aceptar que la Estación Oceanía tiene un comportamiento adecuado, obedeciendo este a un desplazamiento general uniforme, a pesar de haber sufrido ciertos movimientos diferenciales dentro de su horizontalidad.

Suponiendo que desde la cabecera sur-oriente de la Estación Oceanía hasta el punto de “pivoteo”, en el Cerro del Peñón, los hundimientos tienen un comportamiento variable, con tendencia a ser lineal, se puede llegar a una configuración del perfil de la línea que no rebase la pendiente de 7 % y que no tenga radios de curvatura vertical menor a 1250 m. Fig. VI.1

Debido al comportamiento errático del suelo, será necesario hacer renivelaciones periódicas en las vías para ajustar su perfil a la geometría adecuada.

El hecho de existir aparatos de vía a 188 m. aproximadamente de la cabecera sur-oriente de la Estación Oceanía representa un inconveniente más, ya que su pendiente no puede ser mayor al 2 %.

Para solucionar este último problema existen dos posibilidades:

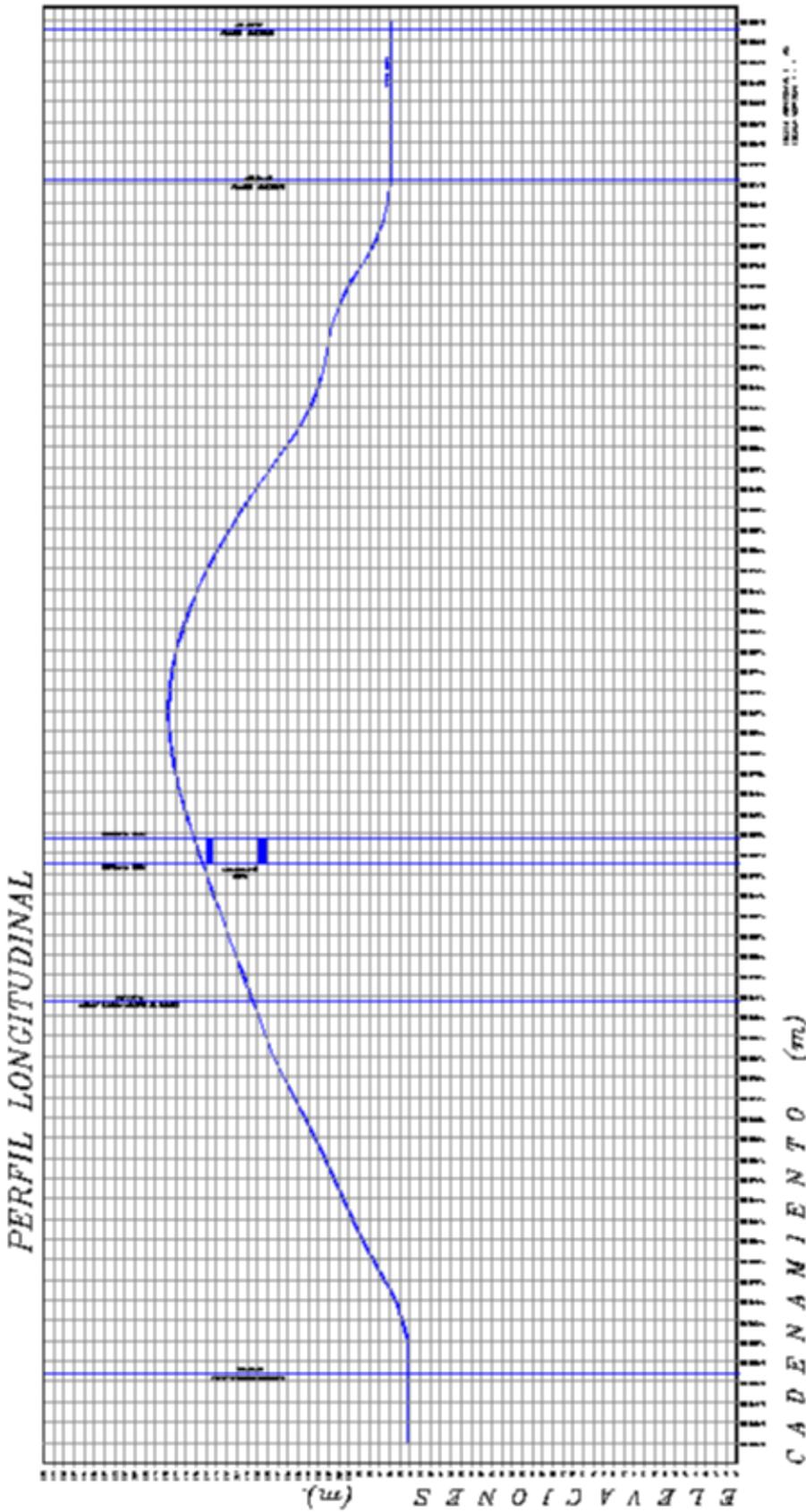
- a) Hacer las nivelaciones con materiales ligeros, como concreto celular, para que el espesor de balasto no sea superior a 70 cm., y de esta manera forzar a que la pendiente no exceda del 2 % en los 40 m. aproximadamente.
- b) Eliminar el aparato de vía de esa zona, reubicándolo en otra.

Ambas soluciones se plantean en las gráficas VI.1 y VI.2, en las que quedan dibujados los perfiles a los que se puede llegar.

Suponiendo, que el suelo en esta zona mantiene un comportamiento uniforme y que los hundimientos se mantienen con una velocidad constante de 20 cm. por año, sin reubicar los aparatos de vía, la solución tiene una vida del orden de 25 años. Si los aparatos de vía se retiran, puede alcanzar 50 años.

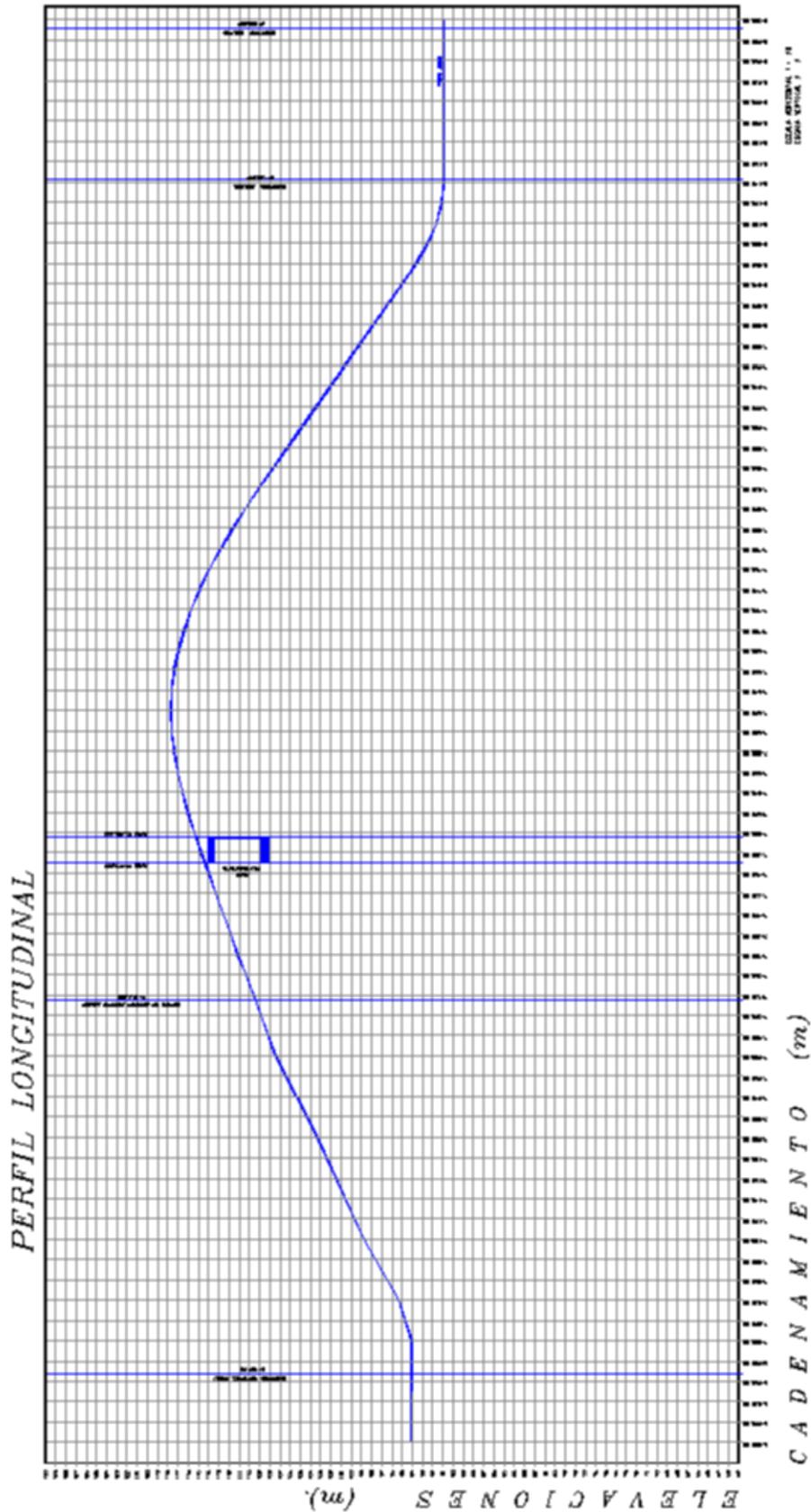
Estos valores de las velocidades de hundimiento futuras no pueden precisarse y por lo tanto, tampoco los de la vida útil de las soluciones; sin embargo el comportamiento del suelo en el futuro será muy similar al esperado.

Este conjunto de deformaciones tiene una influencia en la estructura del cajón, pues sufrirá alargamientos entre 65 y 70 cm. aproximadamente, ya que las curvas inferidas para largo plazo son de mayor longitud que las actuales. Sin embargo este efecto queda absorbido por las juntas de construcción que ya existen y lo único que requieren es un trabajo de mantenimiento adecuado para su buen funcionamiento. También habrá que realizar trabajos de reparación en las grietas que se presenten.



Perfil de la pista de rodamiento, el cual considera aparatos de vía; lo cual implica hacer las nivelaciones y de esta manera forzar a que la pendiente no exceda del 2% en los 40 m.

Grafica VI.1.



Perfil de la pista de rodamiento, el cual considera eliminar el aparato de vía de esa zona, reubicándolo en otra.
Grafica VI.2.

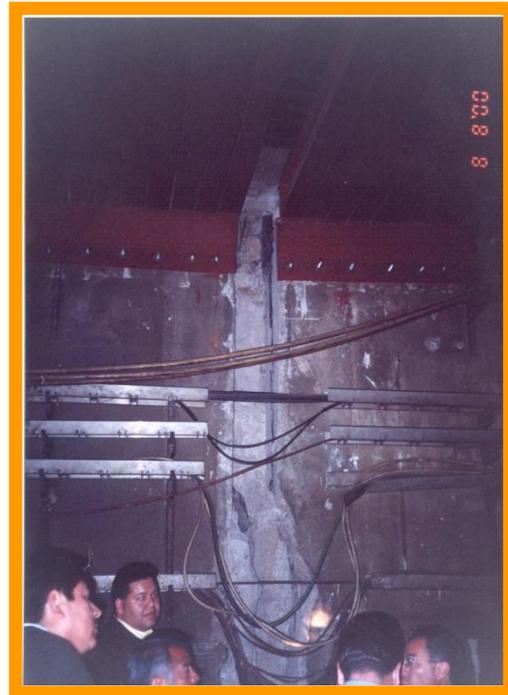
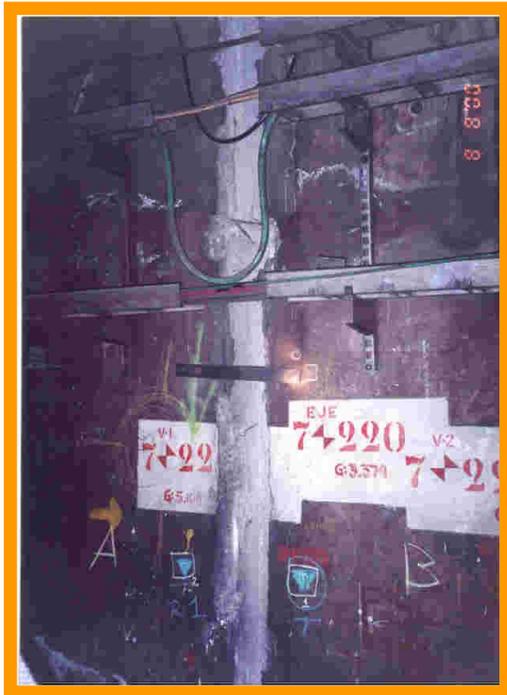
La otra zona del tramo: entre el Cerro del Peñón de los Baños y la estación Terminal Aérea, también ha sufrido hundimientos, pero estos han sido menores a los ya comentados de la zona complementaria. Dada la magnitud de estos movimientos, la velocidad con la que se desarrollan y la situación actual de los perfiles de las vías, se considera que los desplazamientos que se produzcan hasta llegar a los límites extremos aceptables, tanto para el tramo superficial como para el subterráneo, requerirán de un tiempo suficientemente amplio como para no realizar en ellos más trabajos que los de nivelación.

La parte superficial queda dentro del manto que no ha sufrido movimientos apreciables, entre el punto de “pivoteo” y el Cerro del Peñón. Por otra parte, el tramo subterráneo tiene posibilidades de desplazamiento vertical, con nivelaciones de vía, por un período de 75 años aproximadamente.

Se han aplicado en el pasado soluciones al problema de las juntas (fotografías VI.1, VI.2, VI.3 y VI.4), que funcionan bien y que permiten reducir los daños a la estructura, sin embargo falta solucionar los problemas que generan los agrietamientos que han aparecido.



Tapajuntas existentes en sección tajo (abierto)
Fotografía VI.1 y VI.2



Zona de junta en sección cajón, dichas secciones se encuentran desplazadas tanto en muros como losas.

Fotografía VI.3 Y VI.4

Para solucionar este problema de agrietamientos sólo requerirá los mantenimientos de tapajuntas y se deberán hacer nivelaciones periódicas para estar en condiciones adecuadas de operación. Las figuras siguientes detallan esquemáticamente esta solución figuras VI.1, VI.2, VI.3, VI.4, VI.5 Y VI-6.

En la figura VI.3 se tiene la planta y cortes para la solución de grietas que se presenta en la estructura como se mencionó anteriormente y consiste en cubrir las grietas con tapajuntas, esto es, para permitir el movimiento en la misma y ya no sufra ninguna fractura, este trabajo se realizará en la sección tipo canal en la zona abierta en el cadenamiento 7+765, 7+780 7+815.

Dentro de esta figura se observa la planta señalando la proyección del cajón que es donde esta agrietado por el peso propio y por los hundimientos diferenciales que se ha tenido en los últimos tiempos.

En este cajón se colocarán las tapajuntas, en las dos direcciones: horizontal y vertical para evitar movimientos fuertes, por lo tanto, en el corte 1-1, se observa, que se coloca las tapajuntas en la losa inferior y en el muro, lo que sería los cortes tres y dos respectivamente.

A lo que se refiere el corte 2-2, se observa la manera en que se instalan los accesorios dentro del muro atacando las grietas para que tenga un mejor trabajo el muro, con posibles movimientos verticales, lo mismo sucede en el corte 3-3, solo que las tapajuntas son colocadas en la losa, la diferencia entre los dos trabajos es que en la losa las juntas aparte de que las colocan dentro de la plantilla, las anclan en los muros de concreto laterales a manera de que el trabajo sea uniforme y en cambio en los muros solo se ancla en la losa.

Por otro lado, en la figura VI.4 se muestran los detalles de placas de acero, que se mencionan en la figura VI.3, en donde aparecen como accesorios 1, 2,3 y 4.

Estos accesorios se montan de la siguiente manera:

El accesorio 3, es una junta tipo canal “U”, en el cual sus dimensiones en su base inferior es de 10cm, en la abertura tiene 20cm y tiene una ligera pendiente de 1:5, el espesor de la placa en esta pendiente es de 9.53 mm y en sus pestañas es de 6.35 mm, esta junta va colocada sobre la plantilla y su longitud total es la que tenga el cajón hasta donde se requiera.



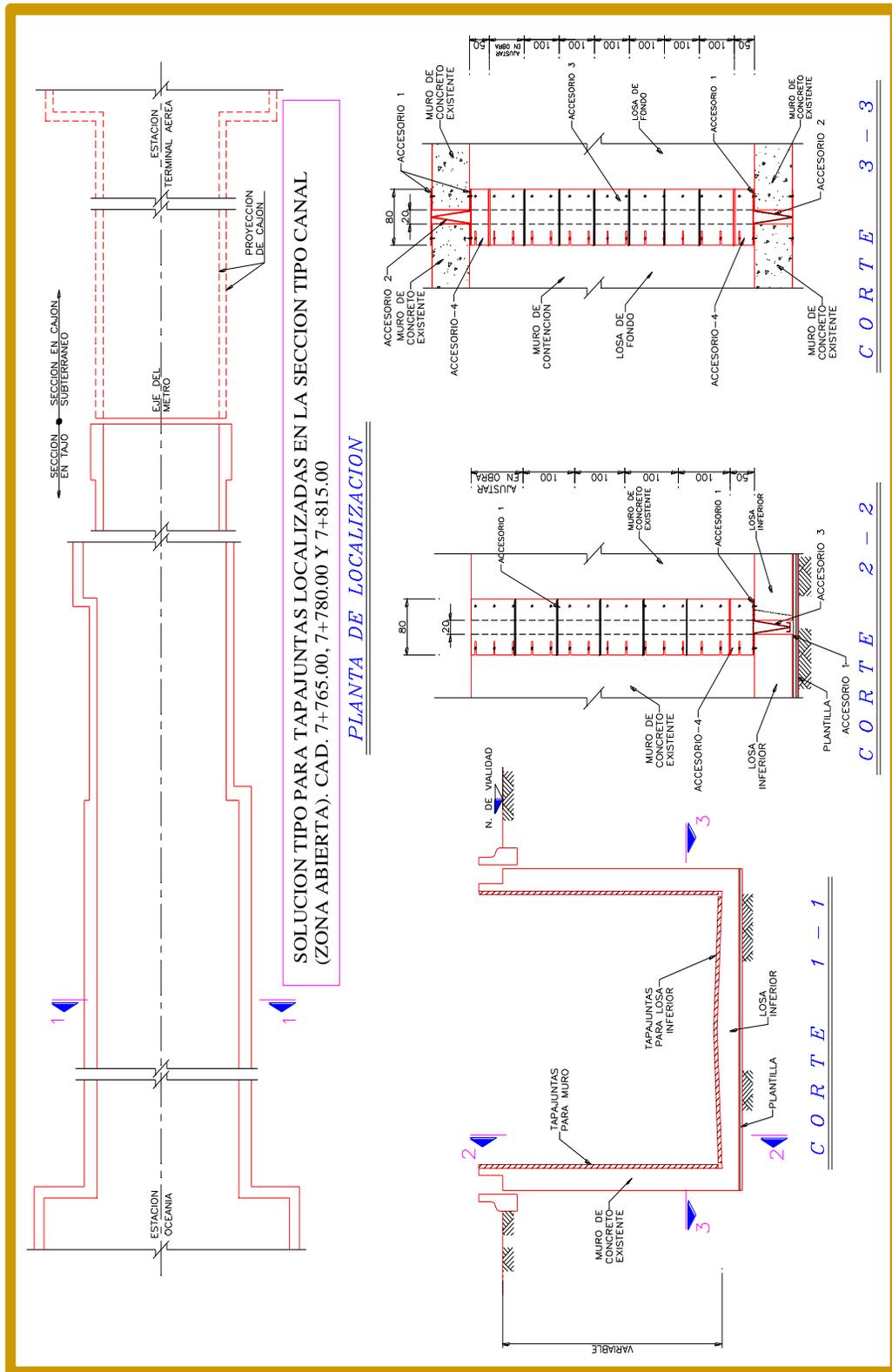
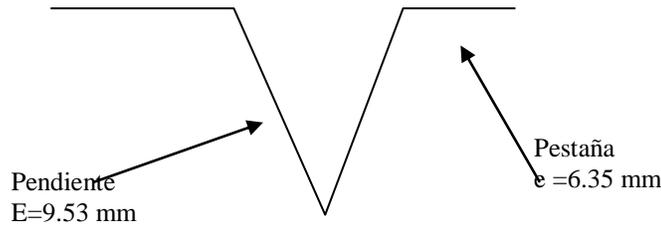


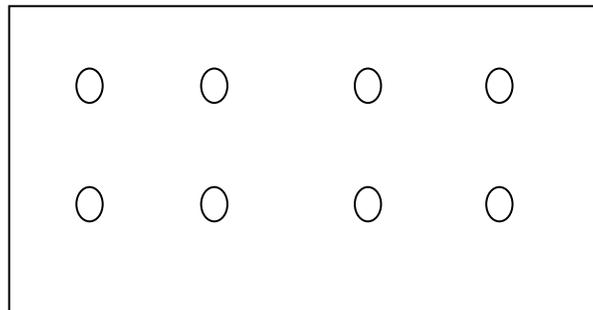
FIG. VI.3
Planta y cortes para la solución de grietas o juntas en la sección en tajo

El accesorio 2, es una junta en forma de “V”, esta va colocada sobre el muro, tiene una abertura de 20cm con una pendiente de 45 grados, su longitud depende de la altura del muro en donde se van a corregir las grietas, el espesor de la placa en la pestaña es de 6.35 mm y de la pendiente es de 9.53 mm.



Accesorio 2

Para fijar estos dos accesorios en su correspondiente lugar se necesita del accesorio 1, el cual es una placa en forma rectangular plana, endone tiene pequeños orificios, donde se colocan los pernos que van a cada 30 cm en toda su longitud, dejando un espacio de exterior al interior de 10 cm y así poderlo fijar al muro o a la plantilla, el espesor de esta placa es de 6.35 mm, de igual manera se utiliza para fijar al accesorio número 4.



Accesorio 1

Por último el accesorio 4 “unión de junta”, es el que une en forma de 90 grados a los dos elementos, a la plantilla y al muro esto es, para que no tengan movimientos no uniformes, este elemento es una combinación de los accesorios 2 y 3.

De igual forma es fijado con el accesorio 1, con sus respectivos pernos a su distancia correspondiente.

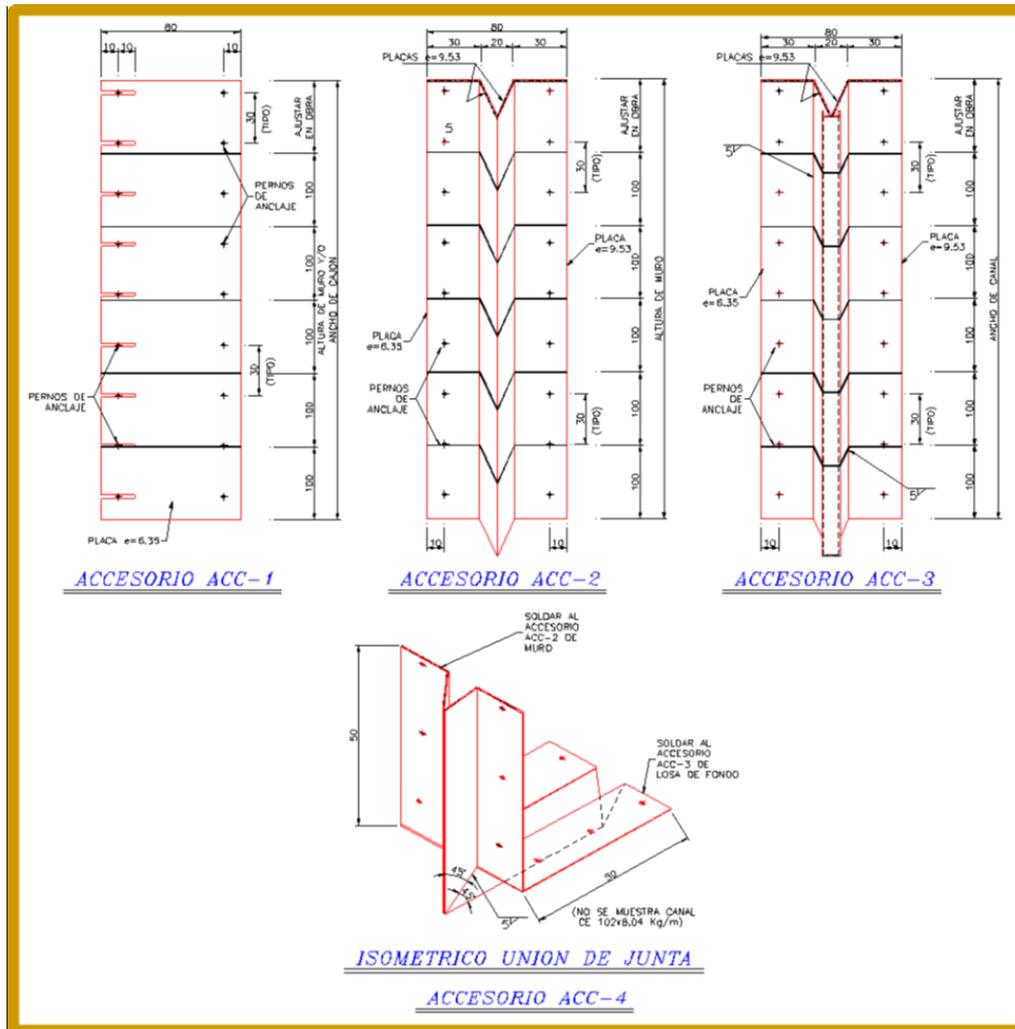


Figura VI.4
Detalles de placas de acero (accesorios) para la solución de grietas o juntas en la sección en tajo

En la figura VI.5, se muestra la manera en que se van a colocar las juntas, el procedimiento es el siguiente: marcar en el muro y losa, la zona afectada y luego trazar un ancho de 20 cm, dejando al centro la grieta.

Posteriormente, se empieza a demoler las zonas marcadas, la profundidad que se maneja para la losa a demoler es toda la profundidad menos 5 cm, para así dejar un pequeño colchón en la misma.

En el muro, la profundidad a demoler es todo el ancho del mismo. Una vez que se tienen estos huecos, se inicia a colocar las juntas, como se mencionan en las dos figuras anteriores.

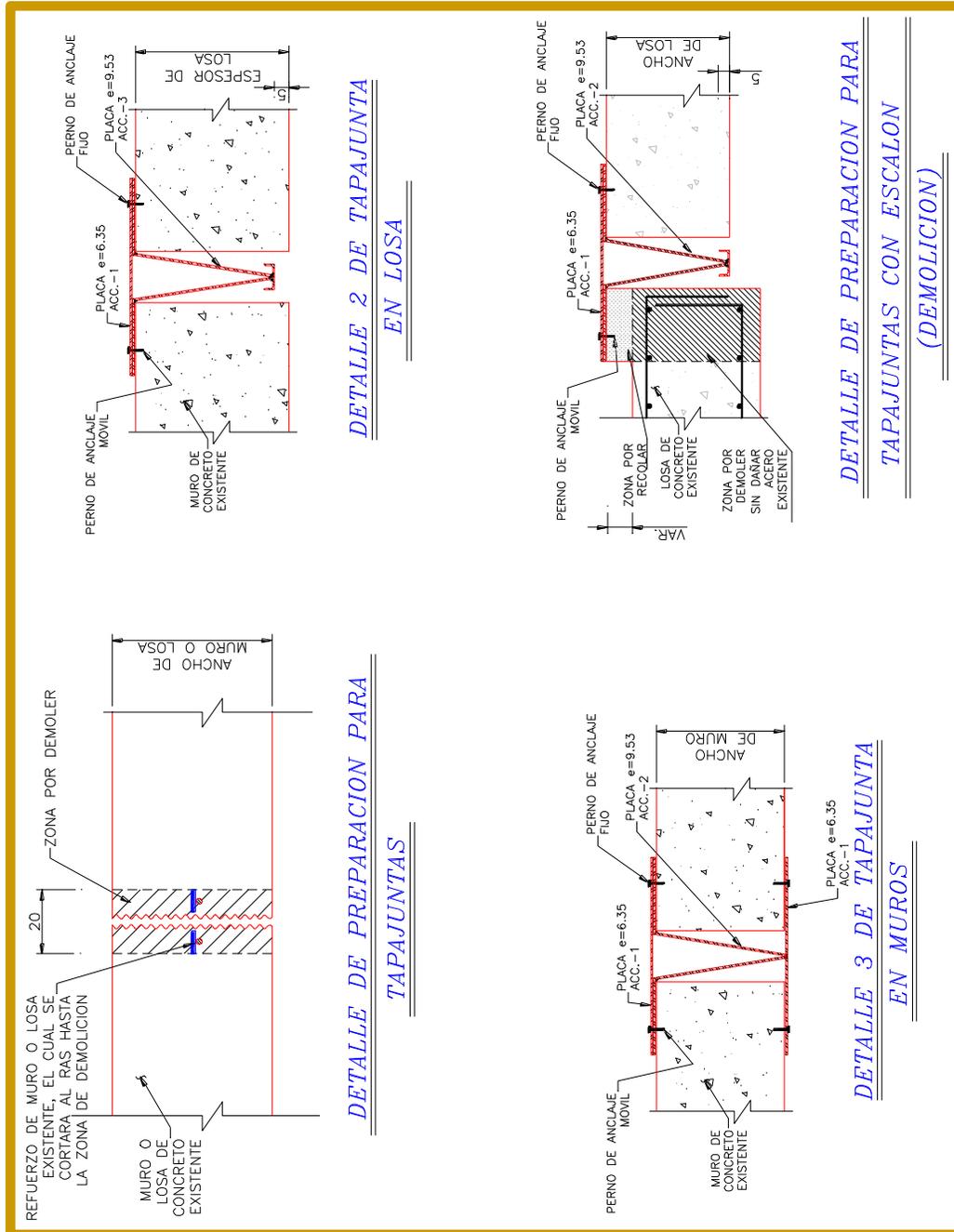


Figura VI.5
 Detalles de obra civil para la solución de grietas o juntas en la sección en tajo

En las figuras VI.6 y VI.7, se va a seguir el mismo procedimiento con todo su proceso sin omitir alguno, que se realizó en la zona abierta de la figura VI.3, para solucionar las grietas, la diferencia es que ahora va hacer en la zona cerrada en los cadenamientos 7+200, 7+220, 7+235, 7+255, 7+274 y 7+315.44

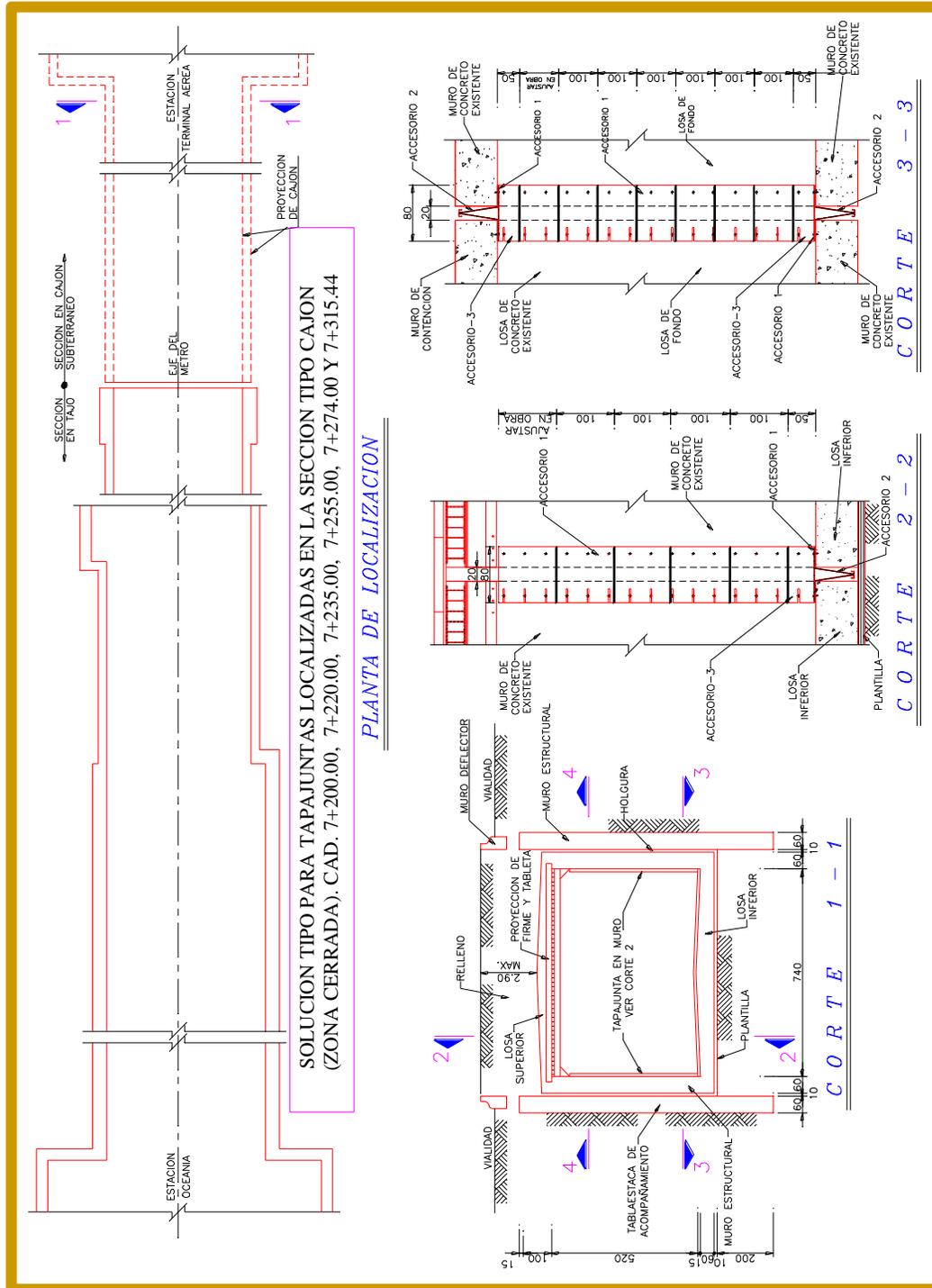


Figura VI.6
Planta y cortes para la solución de grietas o juntas en la sección en cajón

viga IR, se pondrán placas de acero como asiento, el numero de estas es dependiendo del espacio que queden entre las mismas, hay que tomar en cuenta que el espesor de la placa es de 6.35 mm.

Esta ménsula se soldara tanto en las placas que están en la viga como en una placa que será fijada en el muro de concreto con barrenanclas y estas tendrán un espacio de 17 cm entre cada una.

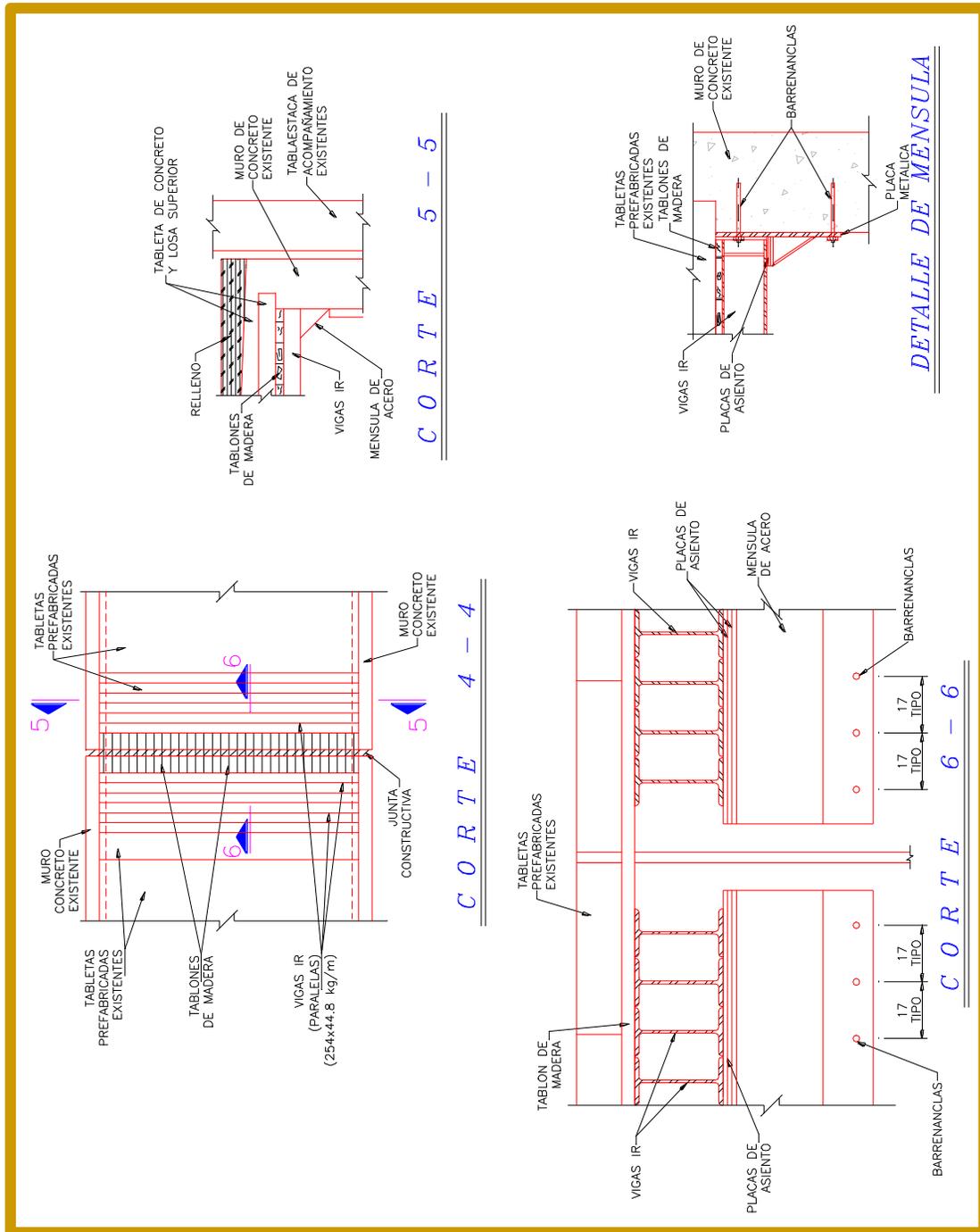
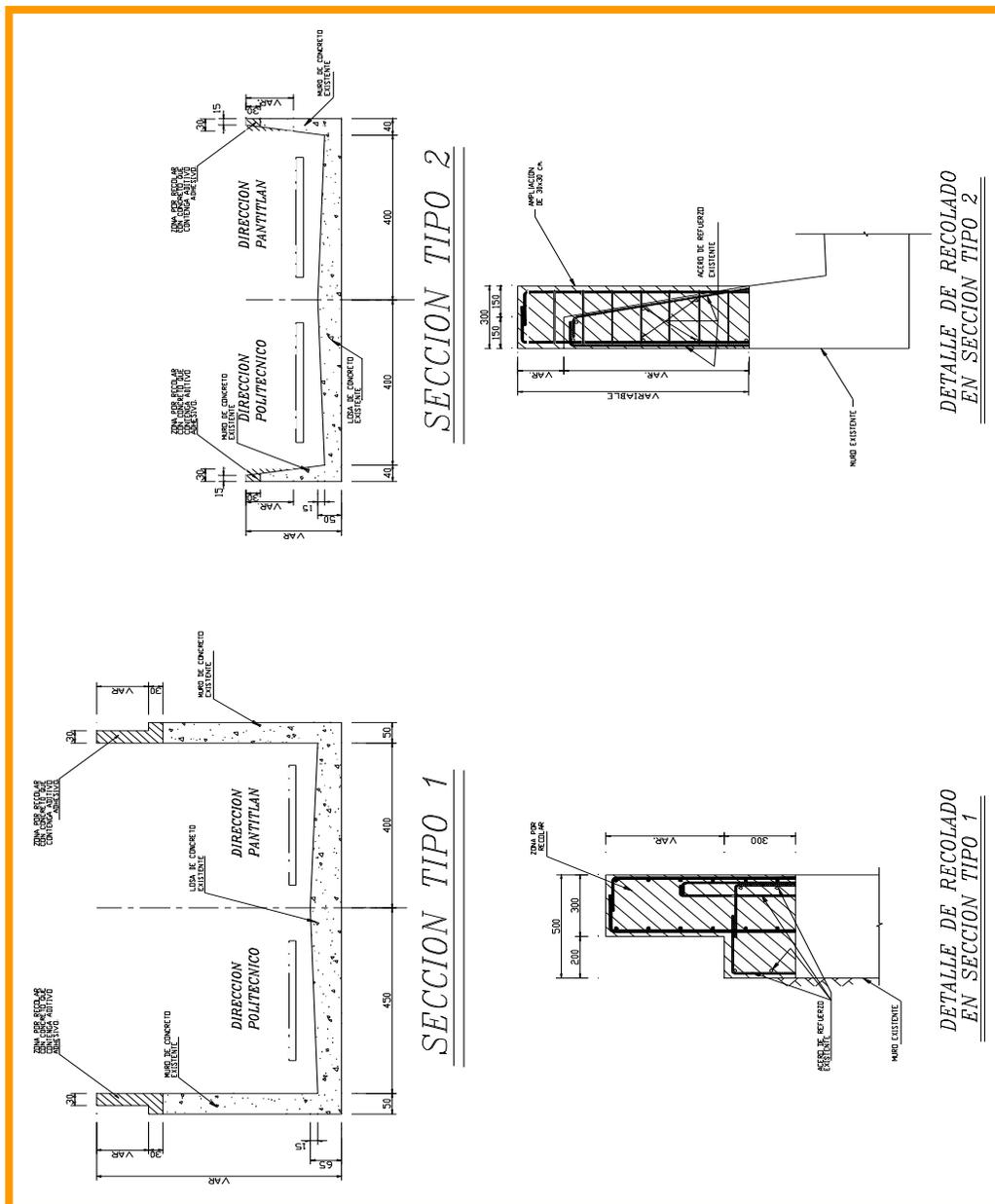


Figura VI.8
Cortes y detalles en la zona de techo para la solución de grietas o juntas en la sección en cajón

VI.3.1 SOLUCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA PARA EL TRAMO DESCUBIERTO.

La estructura de la cubierta será ligera. Por lo que la estructuración será a base de marcos transversales a cada 2.13 m y trabes longitudinales de acero, estos marcos estarán anclados en los muros laterales de concreto existente, en los cuales se realizará una ampliación en las coronas. Sobre la estructura principal se ensamblará una estructura secundaria, la cual consta de bastidores, mismos que soportarán la cubierta de poli carbonato y lámina perforada cal. 18. Ver figuras VI.7 y VI.8.



Detalles de recolado para la renivelación de coronas de muros para apoyo de marcos de acero estructural A-36.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal se utilizó para determinar las cargas muertas, cargas vivas y las combinaciones de carga. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento y por Sismo, se utilizaron para determinar las fuerzas producidas por esta acción y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto para determinar factores de reducción de resistencia y las Especificaciones para la revisión de los elementos de la estructura. El Manual de Construcción en Acero-DEP se utilizó para la revisión de los elementos de perfiles de acero A-36 que forman la estructura.

Las cargas consideradas son las siguientes:

- **Carga permanente o carga muerta.**

Para la estructura en revisión se consideró como carga muerta el peso de todos los elementos que la conforman (armadura y columnas), además de los elementos no estructurales (largueros y cubiertas).

Para el caso de los elementos estructurales, el peso propio lo considera internamente el programa de análisis y diseño estructural utilizado. Para este procedimiento se realizó una verificación de cargas para revisar estos valores.

- **Cargas variables o cargas vivas.**

Se consideran como cargas vivas aquellas que se producen por el uso y ocupación y que no tienen carácter permanente. Las cargas vivas que se emplearon son:

$W =$ carga viva con intensidad media $= 5 \text{ kg / m}^2$

$W_a =$ carga viva con intensidad instantánea $= 20 \text{ kg / m}^2$

$W_m =$ carga viva con intensidad máxima $= 40 \text{ kg / m}^2$

- **Carga accidental.**

- ❖ **Carga de Sismo.**

De acuerdo a las “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo” (NTC), se realizó un análisis dinámico modal espectral para determinar las fuerzas sísmicas que actúan en la estructura, en función de la zona sísmica donde se localiza de acuerdo a la zonificación que marca el Reglamento de Construcciones.

Mediante las NTC, se pudo definir a la cubierta como una estructura del grupo “A” ya que se requiere de un grado de seguridad alto y su falla ocasionaría pérdidas de magnitud elevada. Es una estructura de marcos de acero, los cuales darán resistencia a fuerzas horizontales, por lo que las NTC para diseño por sismo contempla un factor de comportamiento sísmico $Q=2$. El RCDF considera tres divisiones sísmicas en el Distrito Federal, y la estructura de la cubierta se localiza en la “zona sísmica II”, por lo que las ordenadas espectrales a que conforman el espectro de diseño, expresadas como fracción de la aceleración de la gravedad están dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}T_a &= 0.30 && \text{Seg.} \\T_b &= 1.50 && \text{Seg.} \\r &= 2/3 \\c &= 1.5 \times 0.32 = 0.48\end{aligned}$$

$$a_0 = \left(1 + \frac{3T}{T_a}\right) \left(\frac{C}{4}\right) ; \text{ si } T \leq T_a$$

$$a = c ; \text{ si } T_a \leq T \leq T_b$$

$$a = c \left(\frac{T_b}{T}\right)^r ; \text{ si } T > T_b$$

Donde:

a_0 , es el coeficiente de aceleración del terreno.

c , es el coeficiente sísmico.

T , es el periodo natural de interés.

T_a y T_b , son dos periodos característicos que delimitan la meseta del espectro.

r , es un exponente que define la parte curva del espectro de diseño.

La estructura se analizó bajo la acción de dos componentes horizontales ortogonales no simultáneas considerando el 100% en una dirección y el 30% en la otra.

❖ **Carga accidental o carga de Viento**

Tomando en cuenta que las NTC para diseño por viento, en el punto 2 de los criterios de diseño numeral 2.2.1 de la clasificación de la estructura de acuerdo a su importancia, clasifican a la esta estructura como del Grupo A, y con base en el artículo 139 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal que dice: *“Para los efectos de este Título las construcciones se clasifican en los siguientes grupos: Grupo A: Edificaciones cuya falla estructural podría constituir un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o explosivas, así como edificaciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana, como: hospitales, escuelas, terminales de transporte, estaciones de bomberos, centrales eléctricas y de telecomunicaciones, estadios, depósitos de sustancias flamables o tóxicas, museos y edificios que alojen archivos y registros públicos de particular importancia, y otras edificaciones a juicio de la Secretaría de Obras y Servicios”* y además considerando que esta estructura está localizada en una zona C (zona de terreno abierto. poco o nulas obstrucciones al flujo de del viento, como campo abierto o promonturas), la construcción se analizó considerando que el viento puede actuar por lo menos en dos direcciones horizontales perpendiculares e independientes entre sí. Para este análisis se eligieron aquellas condiciones que representan las más desfavorables para la estabilidad de la estructura, dichas condiciones son las siguientes:

$$p_0 = 35 \quad \text{kg / m}^2$$

$$K = 1.6.$$

$$C_z = 1$$

Para determinar las cargas producidas por viento se utilizó la siguiente fórmula:

$$P_0 = C_p C_z K p_0$$

Donde:

p_0 es la presión básica de diseño

K es el factor de corrección por condiciones de exposición

C_z es el factor correctivo determinado por la altura de la estructura que para este caso fue $h = 5.00 \text{ m}$

El valor de C_p para este tipo de estructuras lo da la norma.

Las fuerzas internas y las deformaciones producidas por las cargas antes mencionadas, se determinaron mediante un análisis estructural, utilizando el método de rigidez que aplica el programa.

La seguridad de la estructura de la cubierta se diseño para el efecto combinado de acciones que tienen probabilidad de ocurrir simultáneamente, utilizándose dos categorías de combinaciones:

- Combinaciones que incluyen todas las acciones permanentes que actúan sobre la estructura y las distintas acciones variables de las cuales la más desfavorable es con su intensidad máxima.
- Combinaciones que incluyen todas las acciones permanentes, las acciones variables con su intensidad instantánea y únicamente una acción accidental en cada combinación.

Para ambos tipos de combinaciones los efectos de todas las acciones se multiplicaron por los factores de carga correspondientes:

- Para el análisis y diseño de la estructura el factor de carga fue 1 para combinaciones de acciones permanentes y acciones variables, clasificada la estructura como del grupo A. Para combinaciones que incluyen acciones permanentes, variables y accidentales, se consideró un factor igual a 0.75 aplicado a los efectos de las acciones que intervienen en la combinación.
- Para combinaciones que incluyen acciones permanentes, variables y accidentales se consideró un factor igual a 1.1, aplicado a los efectos de las acciones que intervienen en la combinación.

Con la información anterior se realizó un modelo estructural en el plano de la nave de talleres, tal y como se encuentra actualmente, mediante el programa de análisis y diseño llamado SAP2000. Dicho programa realiza el análisis bajo la hipótesis de que la estructura presenta un comportamiento lineal, con la ventaja de poder estimar el incremento de desplazamiento de la estructura bajo el efecto de P-delta. La figura VI.9 muestra el modelo analizado.

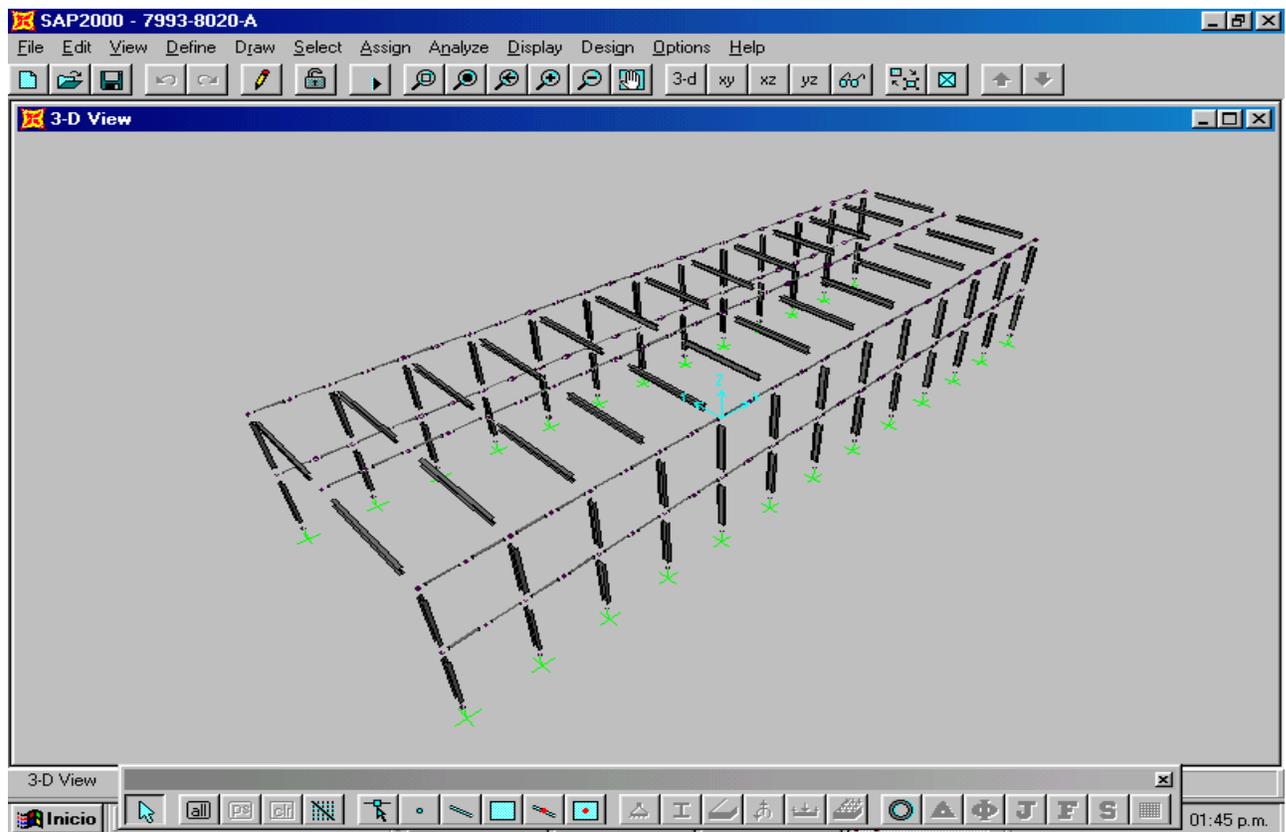


Figura VI.9

Modelo empleado para el análisis y diseño de la cubierta estructural.

La estructura se revisó para verificar el cumplimiento de los requisitos básicos siguientes:

- Tener seguridad adecuada contra todo estado límite de falla ante la aparición de combinaciones de acciones más desfavorables que puedan presentarse, ocasionadas por las condiciones de carga.
- No rebasar ningún estado límite de servicio ante combinaciones de acciones que correspondan a condiciones normales de operación, ocasionadas por las condiciones de carga.

Del análisis y diseño realizado se concluyó que los elementos estructurales se encuentran dentro de los estados límite de servicio y los estados límite de falla.

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El problema principal de los hundimientos en el Valle de México es consecuencia del abatimiento piezométrico, por lo que se recomiendan las siguientes medidas para “recuperar” esos acuíferos:

- Es necesario sanear las aguas del drenaje profundo e implementar su reuso para recargar los mantos freáticos;
- Solucionar las fugas
- Cancelar los pozos clandestinos
- Disminuir la sustracción de 15 metros cúbicos por segundo.

Tan sólo con esta última medida se lograría una recuperación importante y se reduciría el problema del hundimiento de la ciudad de México y por ende el problema geotécnico del tramo Terminal Aérea – Oceanía.

Por otro lado, para el problema específico del tramo, la propuesta de solución económicamente factible, misma que consiste en hacer renivelaciones periódicas, analizada en el capítulo VI, nos permitirá que el suelo se siga deformando de acuerdo al hundimiento proyectado del Valle, sin embargo al tomarse estas medidas de recuperación del acuífero la vida útil del tramo se alargará considerablemente y ésta será proporcional a la recuperación de los niveles freáticos.

La solución definitiva es flexible y permite que en un futuro se pueda tomar la solución dos, toda vez que la vida útil para la primera haya concluido. Sin embargo se deberán seguir las siguientes recomendaciones:

1.- Se deberán hacer **renivelaciones periódicas** para ajustar el perfil de las vías. Estos trabajos se tendrán que hacer por lo menos una vez al año y de preferencia dos veces al año con el propósito de tomar medidas precautorias para el buen desempeño de la circulación de los trenes y evitar accidentes. Estas medidas deberán basarse en las pendientes máximas permitidas y el coeficiente de fricción de los trenes.

2.- Será necesario **techar la zona de pendientes máximas**, superiores al 4 %, que está comprendida entre los cadenamientos 7+880 y 8+8020 del tramo B (Cerro del Peñón – Oceanía), para impedir que las llantas del tren deslicen se colocará una cubierta de estructura sencilla, la cual consiste en marcos de acero colocados transversalmente, los cuales soportaran los bastidores, sobre estos elementos se instalaran los sistemas de cubierta. Esta cubierta está formada para la parte superior por láminas de policarbonato transparente; y láminas dobles de policarbonato transparente y lamina perforada de acero calibre 12 en las partes laterales, La cubierta es práctica, segura, y moderna, acordes con los estándares de diseño para el Distrito Federal.

El propósito de techar este tramo, es evitar en lo posible el contacto del agua generada por las lluvias y la vía para impedir que el tren resbale perdiendo fricción.

3.- Se debe de cuidar que el coeficiente de fricción sea incrementado en las vías para tener una buen operación lo cual se puede lograr estriando la vía.

4.- Las “juntas” son el método más efectivo para solucionar el problema de agrietamiento. Si una extensión considerable de concreto no contiene juntas convenientemente espaciadas que alivien la contracción por secado, por temperatura y en este caso por esfuerzos, el concreto se agrietara de manera aleatoria. Las juntas de control se aserran en el cajón de modo que las grietas ocurran en esas juntas y no aleatoriamente. Las juntas de control permiten movimientos en el plano de la losa y de un muro. Se desarrollan aproximadamente a un cuarto del espesor del concreto. Las juntas de separación aíslan a una losa de otros elementos e otra estructura y le permiten tanto movimientos horizontales como verticales. Se colocan en las uniones de muros y losas.

La vida útil del proyecto será de 20 años aproximadamente o más dependiendo principalmente de la operación y en especial del mantenimiento de las instalaciones, ya que de acuerdo a su ubicación, éste deberá ser intensivo dado a los fenómenos meteorológicos que se presentan en la zona cada año. Y como se dijo en párrafos anteriores si se toman medidas de reacondicionamiento del acuífero, esta vida se prolongará.

Se deberán realizar inspecciones mensuales para determinar las piezas que se encuentren flojas y/o sueltas, una vez detectadas estas piezas, se procederá inmediatamente a realizar los trabajos necesarios para poder garantizar que estos elementos se encuentren siempre bien fijos.

Concluyendo, en el presente trabajo de tesis se demostró que la problemática del hundimiento de Valle de México es en realidad un conjunto de problemas derivados de la sobrepoblación, ya que las necesidades de transportación por un lado y de agua por otro, han generado que la ciudad se hunda sin remedio creando problemas en las edificaciones y para este caso de estudio, en un sistema tan complejo como es el metro, el cual, a su vez por la velocidad de crecimiento a la que ha tenido que someterse no se ha planificado adecuadamente, implementando proyectos que en ocasiones empiezan a ejecutarse sin tener lo estudios suficientes y necesarios para su buen desarrollo y funcionamiento.

Faltan tomar muchas medidas de cultura y de tecnología con respecto de la extracción del agua del subsuelo pero ya existen soluciones integrales para contrarrestar los efectos del hundimiento del Valle de México y el abatimiento piezométrico del manto freático como son: el saneamiento de las aguas del drenaje profundo y la implementación de su reuso para recargar los mantos freáticos, identificar la fugas de agua y repararlas para evitar pérdidas del líquido, la cancelación de los pozos clandestinos y por último la disminución del consumo.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- De Czerna, et. al. (1988) Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regional de la Cuenca de México. Boletín 104 Instituto de Geología, UNAM.
- 2.- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DDF (1992) *Hidrología Subterránea en el Valle de México*. Revista de Ingeniería Hidráulica en México.
- 3.- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DDF (1997) *Plan Maestro de Agua Potable del Distrito Federal 1997 - 2010*.
- 4.- Reséndiz, D. et al. (1970) Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la ingeniería de Cimentaciones en la ciudad de México. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 5.- Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.
Secretaria de Obras y Servicios, Órgano de Difusión del Distrito Federal.
Gaceta Oficial del Distrito Federal.
25 de marzo de 1996.
- 6.- Manual de Construcción en Acero Vol. 1 y Vol. 2.
Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A. C.
Segunda Edición. 1990.
- 7.- Ingeniería Hidráulica en México, vol. XII, No. 3
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica
- 8.- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal
- 9.- Marsal, R.J. Mazari, El subsuelo de la Ciudad de México, Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 1959.
- 10.- Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez, Fundamentos de la Mecánica de Suelos (tomo I) Editorial Limusa, México, 1997.
- 10.- Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez, Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos (tomo II) Editorial Limusa, México, 1997.