



*Laboratorio de Geoinformática
Coordinación de Geotecnia*

INFORME DE AVANCE

Dirección General del METROBÚS de la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE)
del Gobierno de la Ciudad de México

PROYECTO:

**ASESORÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA
DEL SUBSUELO PARA LA AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 5 – SUR
DEL METROBÚS Y DE SU ÁREA DE INFLUENCIA**

1. PLANTEAMIENTO Y ALCANCE

La Línea 5 del METROBÚS se construye con el objetivo de ofrecer transporte digno y seguro en casi 50 colonias de las alcaldías Coyoacán, Iztacalco, Iztapalapa, Tlalpan y Venustiano Carranza. Tendrá conexión con cuatro líneas del Metro: 1, 8, 9 y B, con dos líneas del Metrobús: 2 y 4 y con la Terminal de Autobuses de Pasajeros de Oriente (TAPO). Facilitará el traslado de 135 mil personas al día con accesibilidad garantizada y con una reducción de casi 30 por ciento en los tiempos de traslado.

Las autoridades de la Dirección General del METROBÚS de la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE) del Gobierno de la Ciudad de México iniciarán muy pronto la construcción de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS, así como del inmobiliario urbano del área de influencia del trazo del mismo (Figura 1).



Fig. 1 Trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS

Conscientes de las características excepcionales del subsuelo de la Ciudad de México que siempre han dificultado la labor de los constructores, la Dirección General del METROBÚS ha solicitado al Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM su asesoría para la caracterización geotécnica del subsuelo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS

Esta asesoría se encamina a evaluar la problemática que plantean tanto las características físico-geográficas como las condiciones del subsuelo en las que se desenvuelve el trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y del área de influencia del proyecto (Figura 1), con el propósito de orientar a los diseñadores y constructores para que tomen previsiones y revisen sus sistemas y procedimientos constructivos para cada tramo de la estructura vial del METROBÚS.

También, se revisa la problemática que plantean las anomalías geotécnicas detectadas a lo largo del trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS como de su área de influencia del proyecto. Se aporta información útil acerca del hundimiento regional y del agrietamiento con el fin de que verifiquen sus eventuales efectos y con ello, se minimicen las consecuencias indeseables durante la vida útil de la obra.

2. MARCO GEOGRÁFICO-FÍSICO DEL PROYECTO

En este apartado, se presenta una evaluación del marco geográfico-físico del área de influencia del proyecto de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS. Además de las características físico-geográficas, se describen las condiciones del subsuelo de las zonas que atraviesa el trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS con el propósito de que tanto los contratistas tomen las previsiones necesarias para el diseño geotécnico, así como para la selección de los sistemas, equipos y procedimientos constructivos.

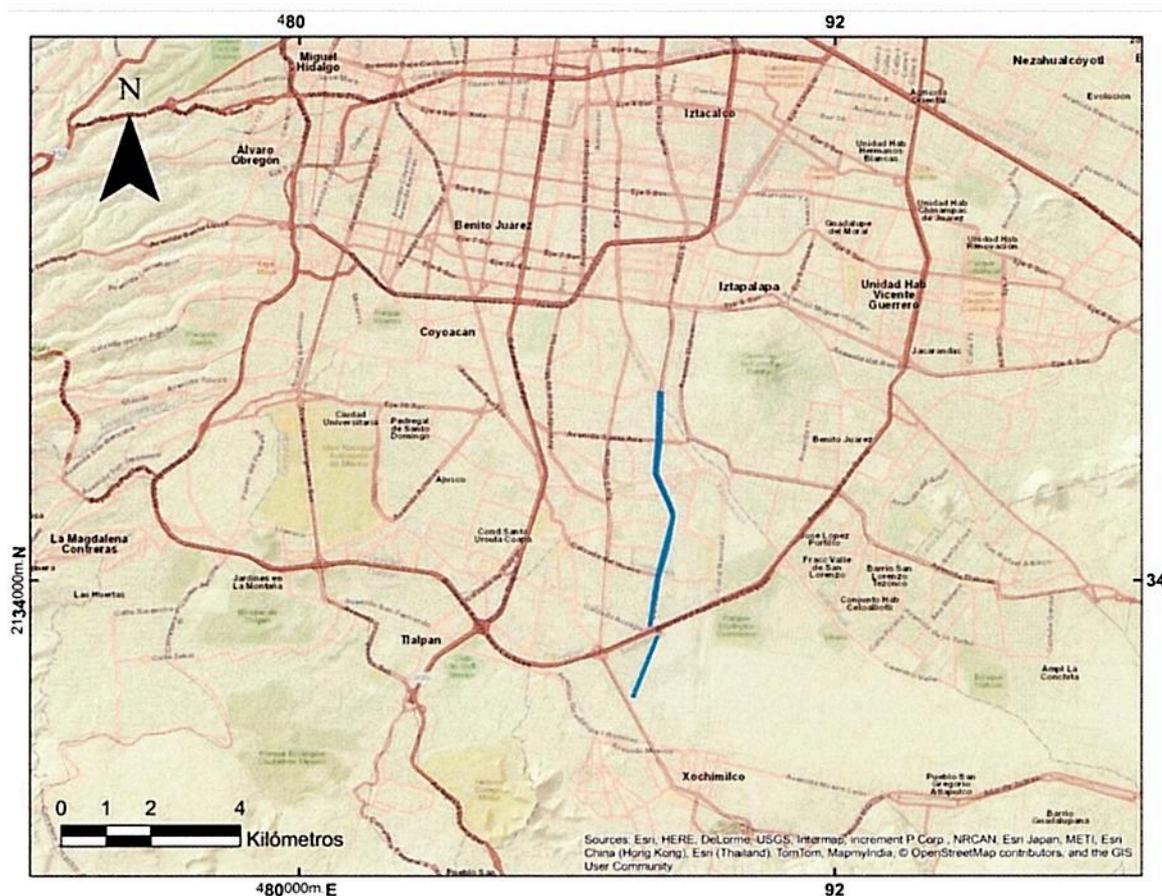


Fig. 2 Trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y área de influencia del proyecto

2.1 Cartografía histórica

En el presente estudio, se ha tomado muy en cuenta la información contenida en la cartografía histórica y en los mosaicos de fotografías aéreas antiguas, los cuales dan cuenta de los aportes prehispánicos y de la evolución de la zona de estudio, dejando ver las transformaciones que tuvieron lugar a través del tiempo.

En la lámina de la Figura 3, se puede observar la evolución que ha registrado la zona de influencia del proyecto del METROBÚS en cuanto a sus características físico geográficas desde 1899 (Con base en la estupenda Carta Corográfica del Distrito Federal, construida por la Secretaría de Fomento por disposición del Secretario Ingeniero Manuel Fernández Leal).

Cabe destacar que la Figura 3 muestra el pasado lacustre y de pantanos que tiene la zona de influencia por donde se ubica y extiende el trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS, permitiendo advertir tanto a los diseñadores como a los constructores de esta obra sobre los antecedentes de la zona.

Se observa que el proyecto se encuentra fuera de las zonas de invasión-regresión del lago de Xochimilco que afectaban las orillas del lago en el siglo XIX..

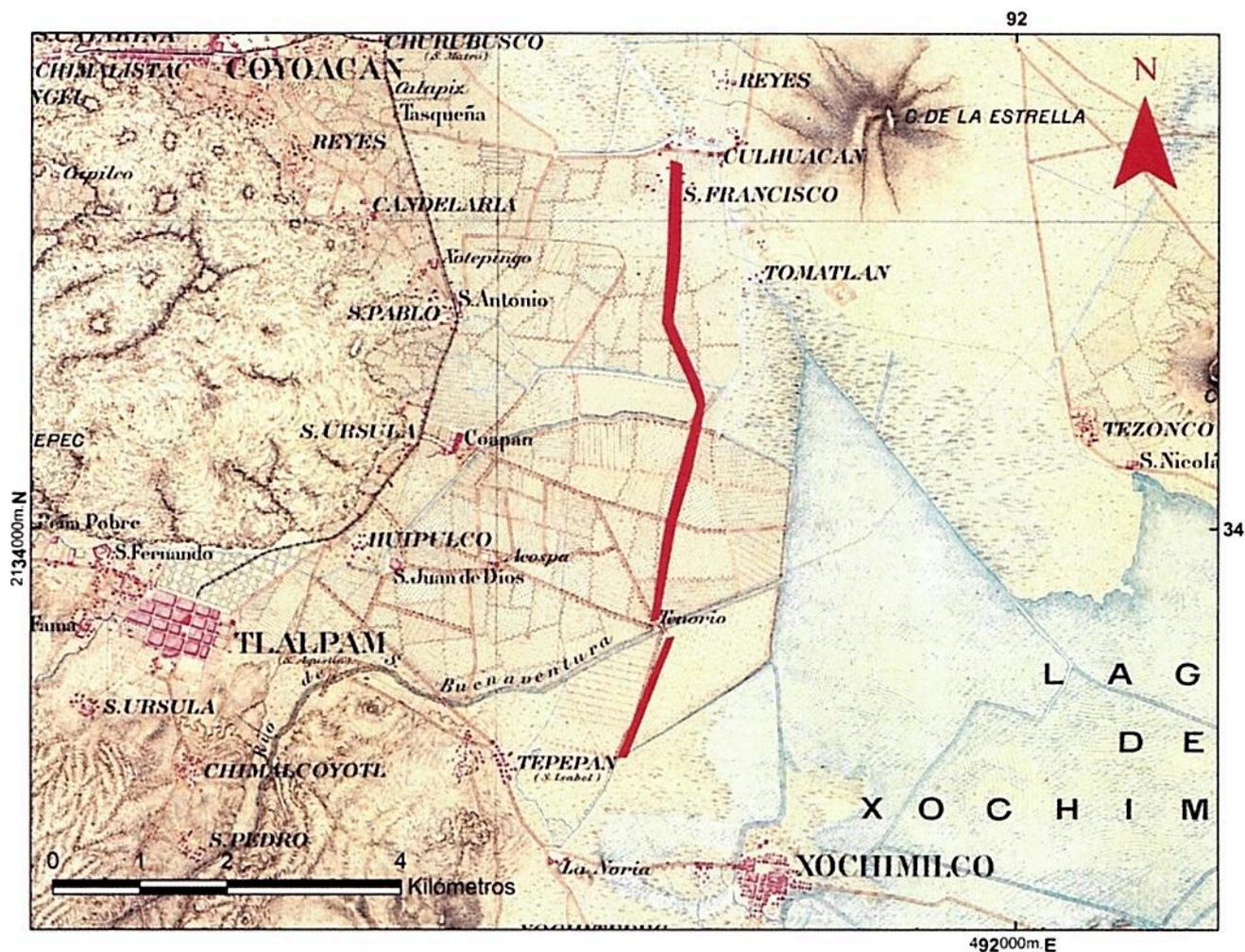


Fig. 3 Trazo del METROBÚS bajo el contexto de 1899, Manuel Fernández Leal

De acuerdo con la Carta Hidrográfica de Manuel Fernández Leal de 1899, en el cruce con la calzada Taxqueña, se ubica una calzada dique. Los restos de este terraplén antiguo constituyen una anomalía geotécnica que requerirá una atención especial por parte de los diseñadores para garantizar un comportamiento uniforme del subsuelo en el que se apoyará la carpeta de concreto hidráulico.

Otro aspecto significativo en Trazo del METROBÚS bajo el contexto de 1899 es el cruce de tres canales y la del Río San Buenaventura; los cuales, constituyen cuatro anomalías geotécnicas que deben tenerse en cuenta, para evitar un comportamiento no uniforme del subsuelo en el que se apoyará la estructura vial del METROBÚS.

2.2 Topografía

La información relativa a la topografía es fundamental para cualquier actividad que se desee realizar en la zona por donde se extiende el trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS, debido a que permite valorar la superficie física del terreno, con base en la planimetría y altimetría, y las formas y dimensiones de laderas, ríos, volcanes, calderas, conos, fallas, grietas, líneas o superficies de contacto, discontinuidades, valles, cuencas, etc.

La interpretación de las características y rasgos generales del relieve (abrupto, medio, suave o plano) ayuda a definir la extensión de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas mediante la proyección horizontal en un plano. Generalmente, el relieve se presenta a través de curvas de nivel indicando su cota, definida como su altura sobre el nivel del mar. También sirve como mapa de fondo para enmarcar los datos de los diferentes estudios que requieren de los rasgos generales de la superficie para elaborar y definir nuevos mapas temáticos (geomorfológicos, orográficos, etc.).

Bajo el nombre de Modelo Digital del Terreno, MDT, se entiende al conjunto de datos numéricos que describen las características del terreno. Los MDT son una versión digital de los mapas topográficos convencionales por lo que, en ocasiones, han sido denominados mapas virtuales. Un MDT puede definirse en forma más completa y precisa como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (altura o elevación, pendiente, etc).

El modelo de relieve sombreado de la zona de interés (Figura 4) muestra que el trazo del METROBÚS estudiado cruza una zona esencialmente plana, sin accidentes topográficos, información que resulta útil al constructor y diseñador.

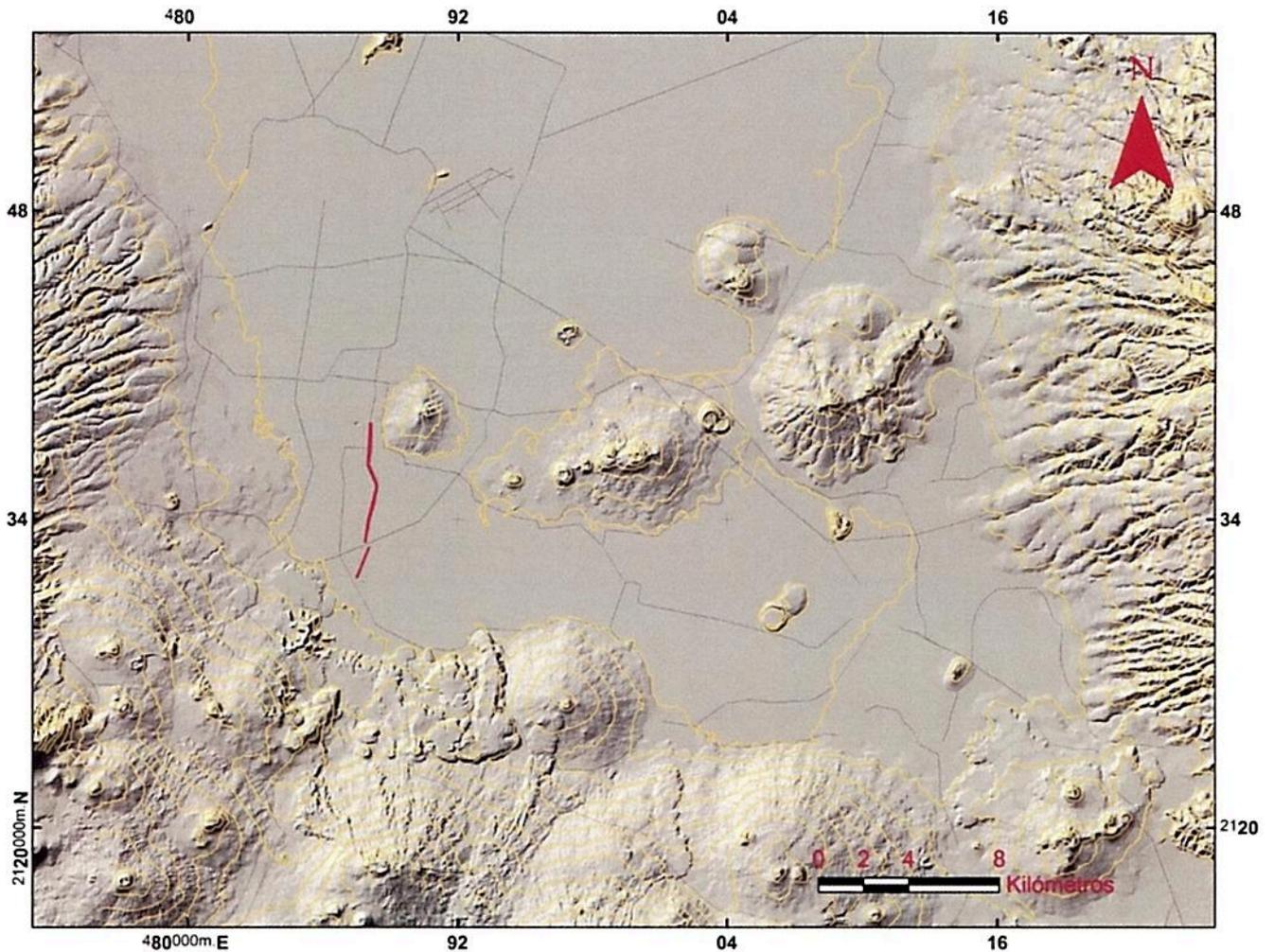


Fig. 4 Trazo del METROBÚS bajo el contexto del Modelo de Relieve Sombreado.

2.3 Geología

Es fundamental que los constructores y diseñadores tengan una idea clara del marco geológico regional y local en el que se desarrolla el proyecto del METROBÚS, el cual se intenta sintetizar en los siguientes párrafos y láminas.

La ciudad de México se localiza dentro de la Cuenca de México, misma que se ubica en la porción centro-oriental del Cinturón Volcánico Mexicano. Ésta es una cuenca endorréica con altitud media de 2240 m.s.n.m. Los elementos morfológicos más importantes son sus límites naturales y algunos rasgos geológicos internos, destacando la Sierra de las Cruces-Monte Alto (límite sudoccidental), la Sierra Nevada (límite sudoriental) y la Sierra del Chichinautzin (límite sur), siendo esta última frontera la que cerró la cuenca en el Cuaternario Superior, hace unos 600 000 años (Santoyo *et al.*, 2005).

A grandes rasgos, la columna estratigráfica de la Cuenca de México pone en evidencia tres grandes grupos: calizas del Cretácico, rocas volcánicas del Terciario y vulcanitas propias del cierre de la cuenca para finalizar con depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario.

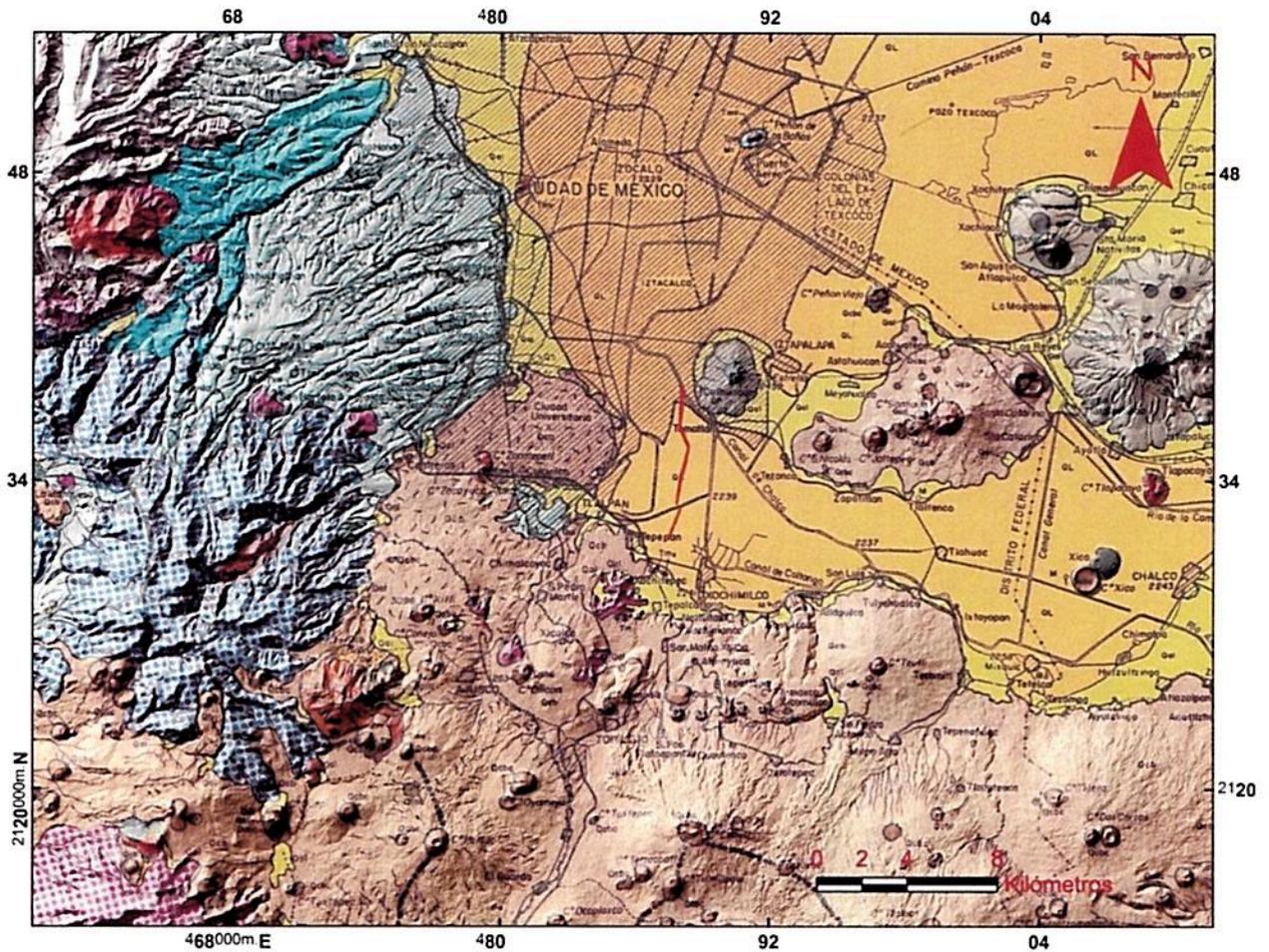


Fig. 6 Trazo del METROBÚS bajo el contexto de la Geología regional, Mooser *et al.* 1996

2.4 Geotecnia

2.4.1 Localización del trazo del METROBÜS en la zonificación geotécnica

El trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS se extiende por la Zona II y Zona III de la zonificación geotécnica definida en el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del Reglamento, y por la Norma Técnica para Diseño y Construcción de Cimentaciones en su inciso 2.2 “Reconocimiento del sitio” y Capítulo 2 “Investigación del subsuelo”.

En la Figura 7 se muestra el mapa de la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México.

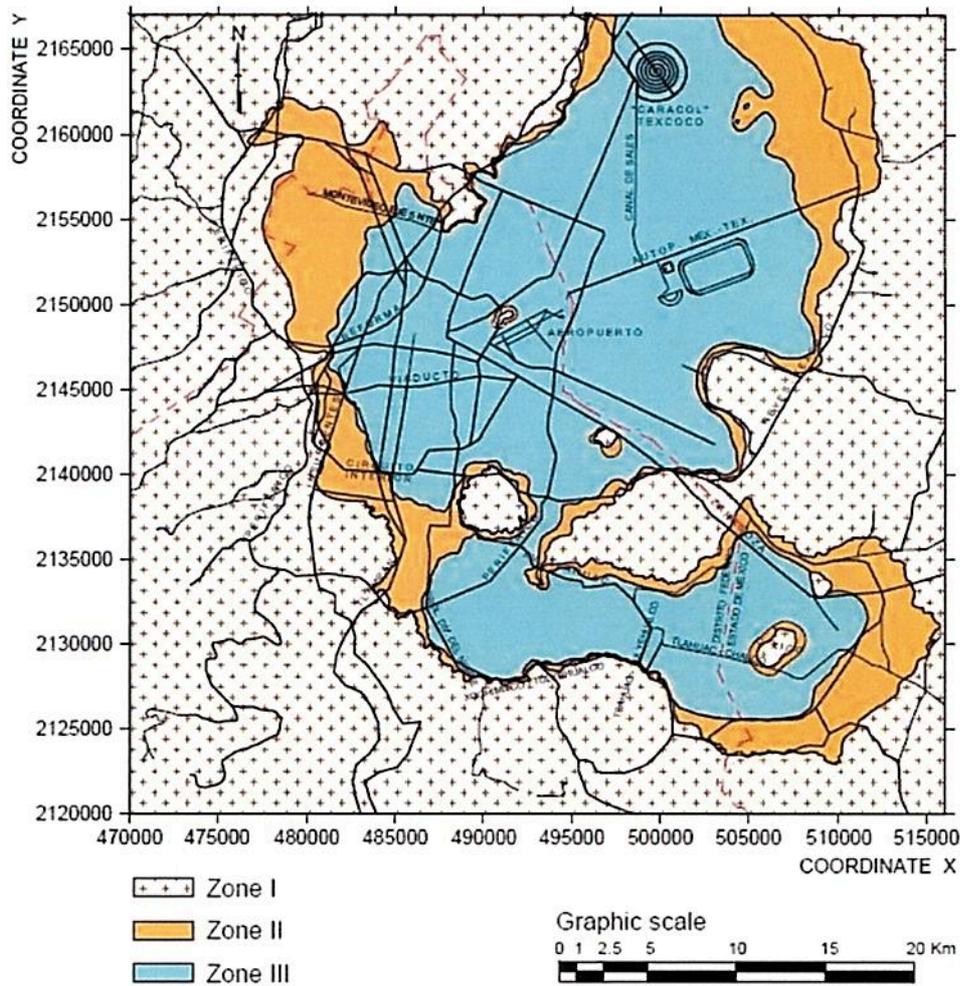


Fig. 7 Zonificación geotécnica (NTCDCC2007)

El tramo de Calzada de Taxqueña a Calzada de las Bombas del trazo de la Línea 5 del METROBÚS coincide con la Zona II (Transición), en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

En cambio, el tramo de Calzada de las Bombas a Prolongación Ahuejotes concuerda con la Zona III (Lacustre), integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales. El espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la Figura 8, se muestra el trazo del METROBÚS bajo el contexto de la zonificación geotécnica.

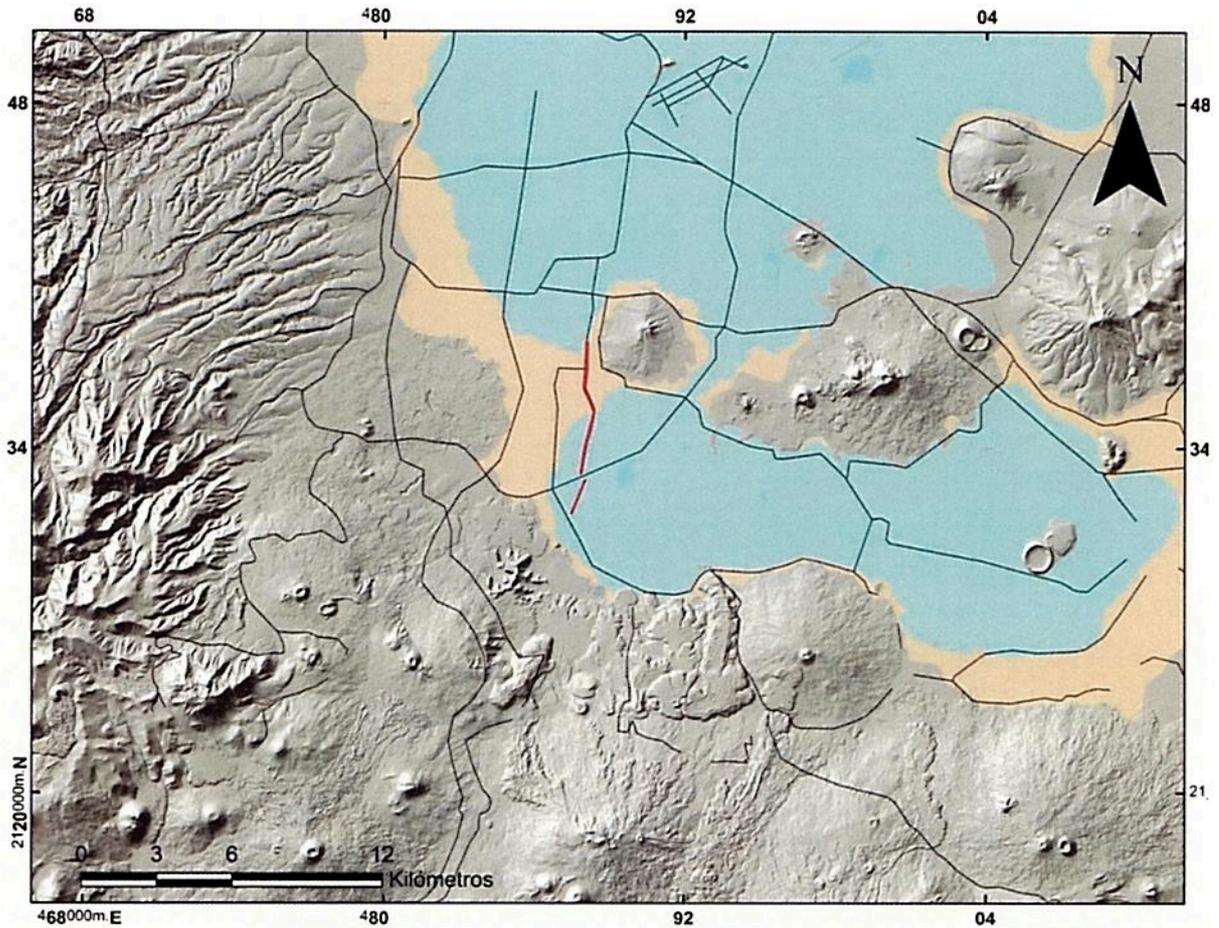


Fig. 8 Trazo del METROBÜS bajo el contexto de la zonificación geotécnica

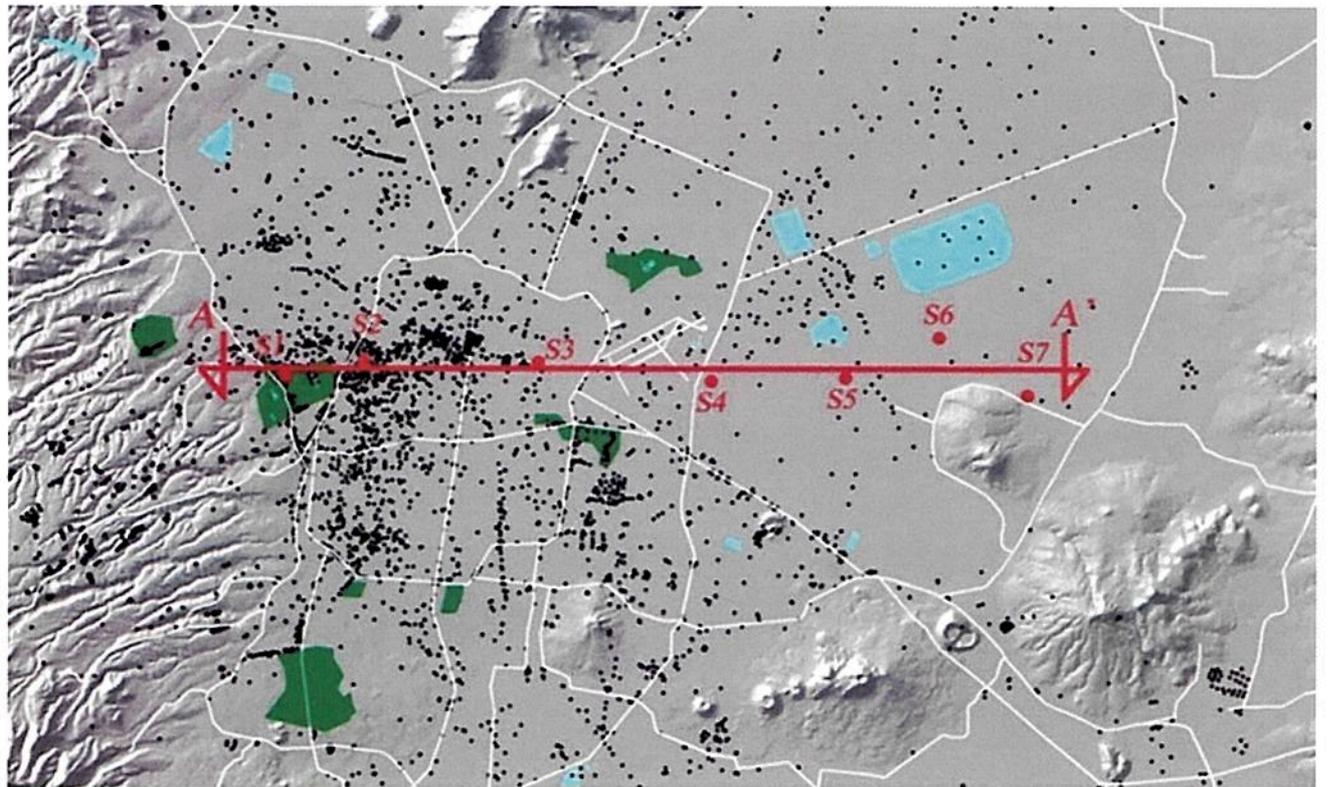
El trazo del METROBÜS se encuentra por tanto en zonas que fueron anteriormente lacustres con espesor variable de los sedimentos lacustres.

2.4.2 Información detallada sobre el subsuelo

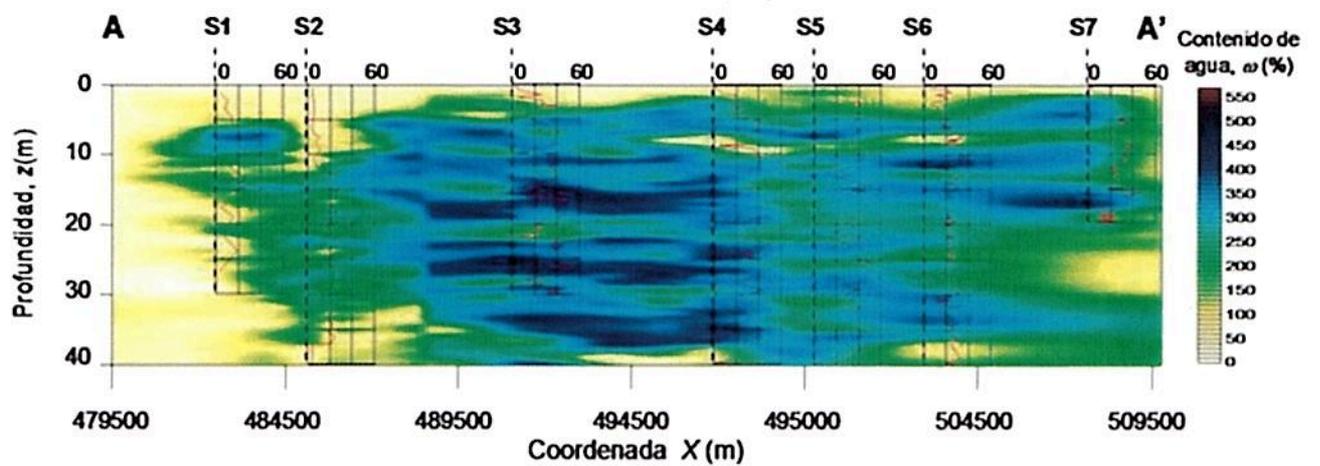
La información puntual sobre el subsuelo proporcionada por los diferentes sondeos geotécnicos disponibles representa el elemento más significativo para definir el modelo estratigráfico que permita caracterizar los rasgos generales del subsuelo en el área de influencia del proyecto de la Línea 5 – Sur del METROBÜS. Lo anterior se debe a que proporcionan la información de detalle acerca de la variación con la profundidad de la estratigráfica y propiedades de los estratos que integran al subsuelo.

Para ello, se recurrió a la construcción de un Sistema de Información Geográfica que contenga almacenados en formato digital a los diferentes sondeos geotécnicos.

En la parte superior de la lámina de la Figura 9, se muestra la distribución espacial de los sondeos existentes en la zona centro de poniente a oriente y un corte representando la variación espacial del contenido de agua.



Ubicación de sondeos y eje de corte



Corte A-A' estimado y sondeos de referencia

Fig. 9 Estimación de la variación espacial del contenido de agua, Corte A – A'.

En cambio, en la Figura 10, se muestra el trazo del METROBÚS bajo el contexto de la distribución espacial del espesor de los suelos blandos.

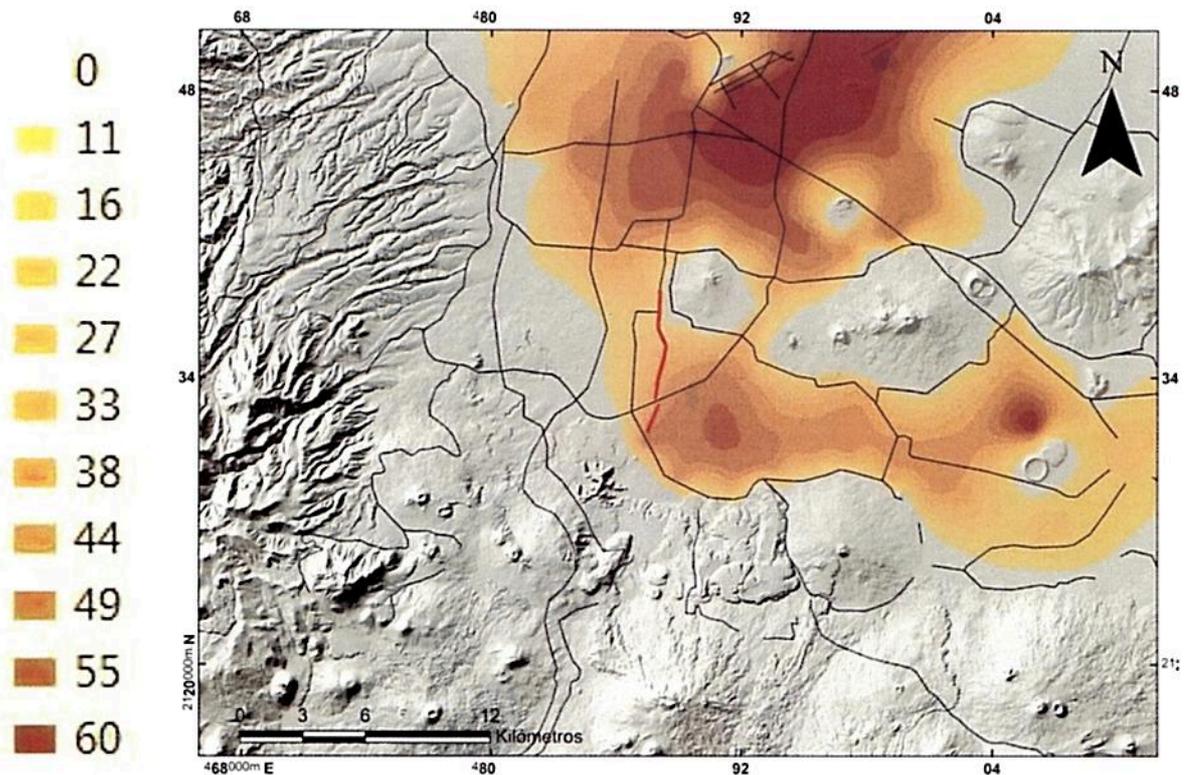


Fig. 10 Trazo del proyecto bajo el contexto de espesor de suelos blandos en metros.

Se confirma por tanto que el trazo del METROBÜS cruza zonas que fueron anteriormente lacustres con espesor variable de los sedimentos. En etapas posteriores de este proyecto, se podrá definir un perfil estratigráfico estimado a lo largo del trazo del METROBÜS recurriendo a la base de datos del II-UNAM y a la geoestadística.

2.5 Anomalías geotécnicas

Los esfuerzos realizados por el Instituto de Ingeniería, con la colaboración de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y el apoyo del Gobierno del Distrito Federal, han permitido mejorar la zonificación geotécnica del Distrito Federal, definiendo con mayor precisión las fronteras que dividen las tres áreas tradicionales consideradas en la zonificación: Zona I (Lomas), Zona II (Transición) y Zona III (Lago) (NTCDCC2017).

La división en tres zonas de la zonificación geotécnica se ha conservado en la reglamentación a través de los años por las grandes ventajas que presenta su sencillez para los ingenieros. Sin embargo, se sabe que existen numerosas subzonas y sitios particulares en los que la estratigrafía local difiere significativamente de la considerada como típica de cada zona. En la zona lacustre por ejemplo existen sitios fácilmente identificables donde el subsuelo presenta características particulares. Destaca en particular el centro histórico donde la existencia de rellenos prehispánicos de gran espesor modifica sustancialmente el comportamiento del subsuelo.

Una situación similar se presenta a lo largo de las trazas de antiguas calzadas o albarradones, en las zonas de canales que fueron rellenos y en los lugares de antiguos asentamientos humanos establecidos en islas artificiales dentro de los ex lagos, conocidas como *tlateles* (Tlatelolco, Tláhuac, Iztacalco, etc.), sin olvidar las zonas de chinampas.

En la Figura 11 se puede apreciar la distribución espacial de las anomalías geotécnicas donde se ha indicado el trazo del METROBÚS. Tomando en cuenta el mapa histórico de la Fig. 3, se pueden contar cuatro interacciones de estas con la estructura vial del METROBÚS.

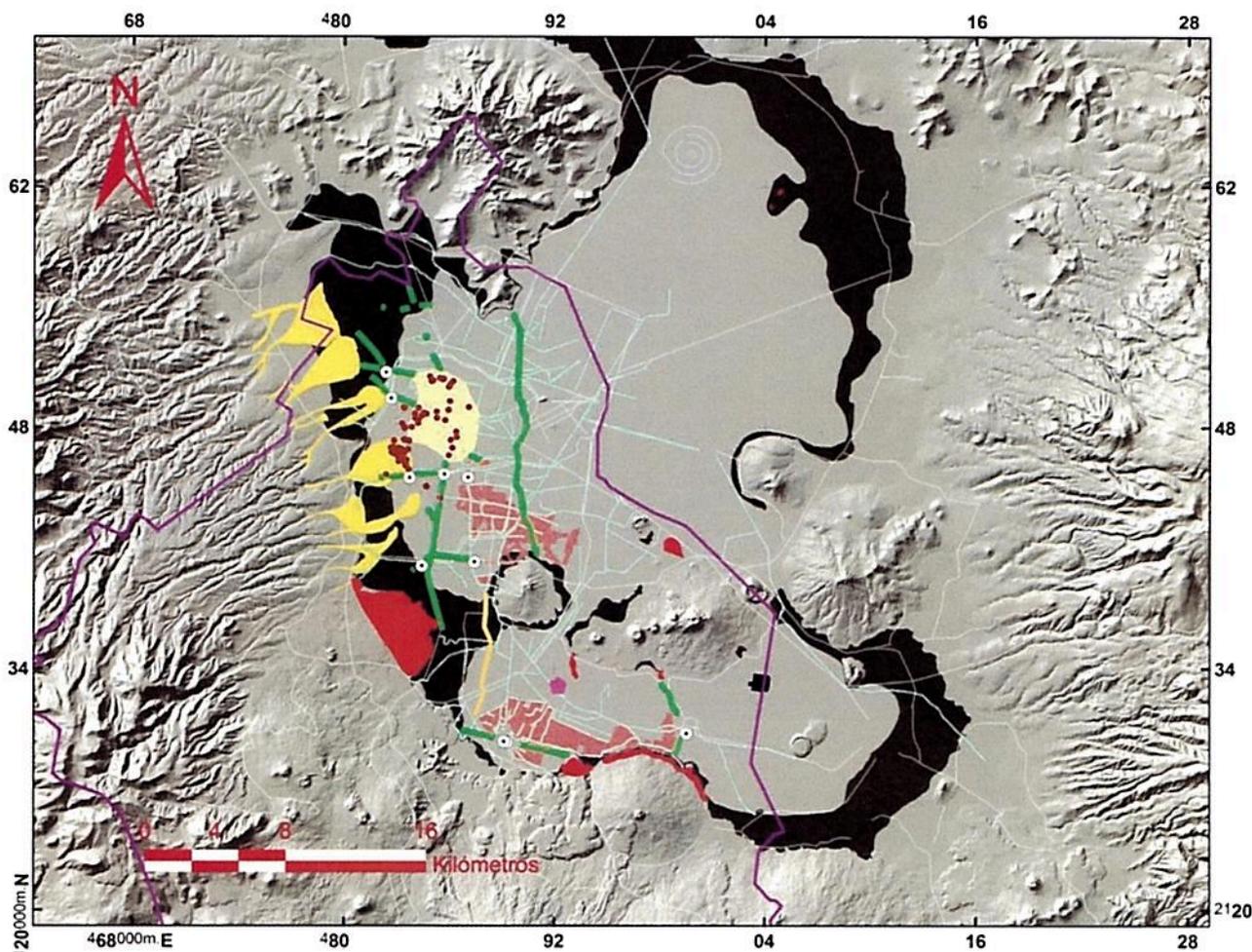


Fig. 11 Trazo del proyecto (amarillo pálido) bajo el contexto de las anomalías geotécnicas

Estas calzadas prehispánicas, antiguos cauces entubados y canales rellenados constituyen las principales anomalías que deberán tomarse en cuenta para el desarrollo de la ampliación del proyecto de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y de su área de influencia

3. HUNDIMIENTO REGIONAL

Una de las formas más económicas de atender el abastecimiento de agua potable ha sido la explotación del acuífero mediante el bombeo de agua con pozos profundos, lo que ocasiona que en la zona lacustre de la Ciudad de México se presente el fenómeno de hundimiento regional. Debido al alto costo de otras alternativas, se prevé que el abastecimiento de agua en la Ciudad continuará por muchos años dependiendo en forma sustancial de los recursos subterráneos.

El fenómeno del hundimiento hoy, a más de noventa años de su descubrimiento por Roberto Gayol, y a más de sesenta años de su explicación científica por Nabor Carrillo (1947), persiste, con efectos acumulados a través del tiempo que causan asentamientos diferenciales en las estructuras coloniales y modernas de la Ciudad de México, así como grietas en el suelo lacustre. Instalaciones metropolitanas tan importantes como el Metro, el Gran Canal y la Red de agua potable sufren también sus efectos.

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

La lámina de la Figura 12, ilustra la hondonada formada en la antigua superficie ocupada por los lagos desde que se inició la extracción de agua mediante pozos profundos en el subsuelo.

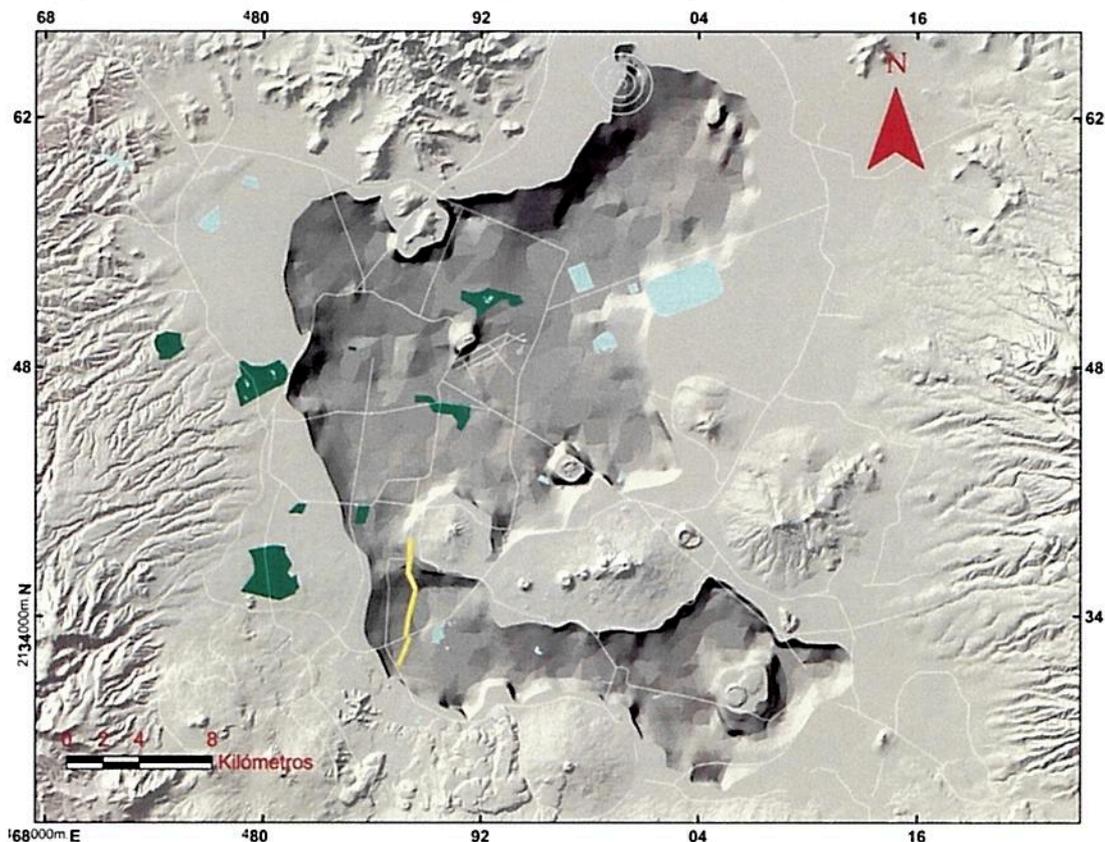


Fig. 12 Hondonada ocasionada por la extracción de agua mediante pozos profundos

La distribución espacial de las velocidades de hundimiento en el lapso de cuatro años (1999 – 2008) se aprecia en la lámina de la Figura 13, en la que se puede observar que algunos sitios ya han alcanzado velocidades de hundimiento de cerca de 40 centímetros por año.

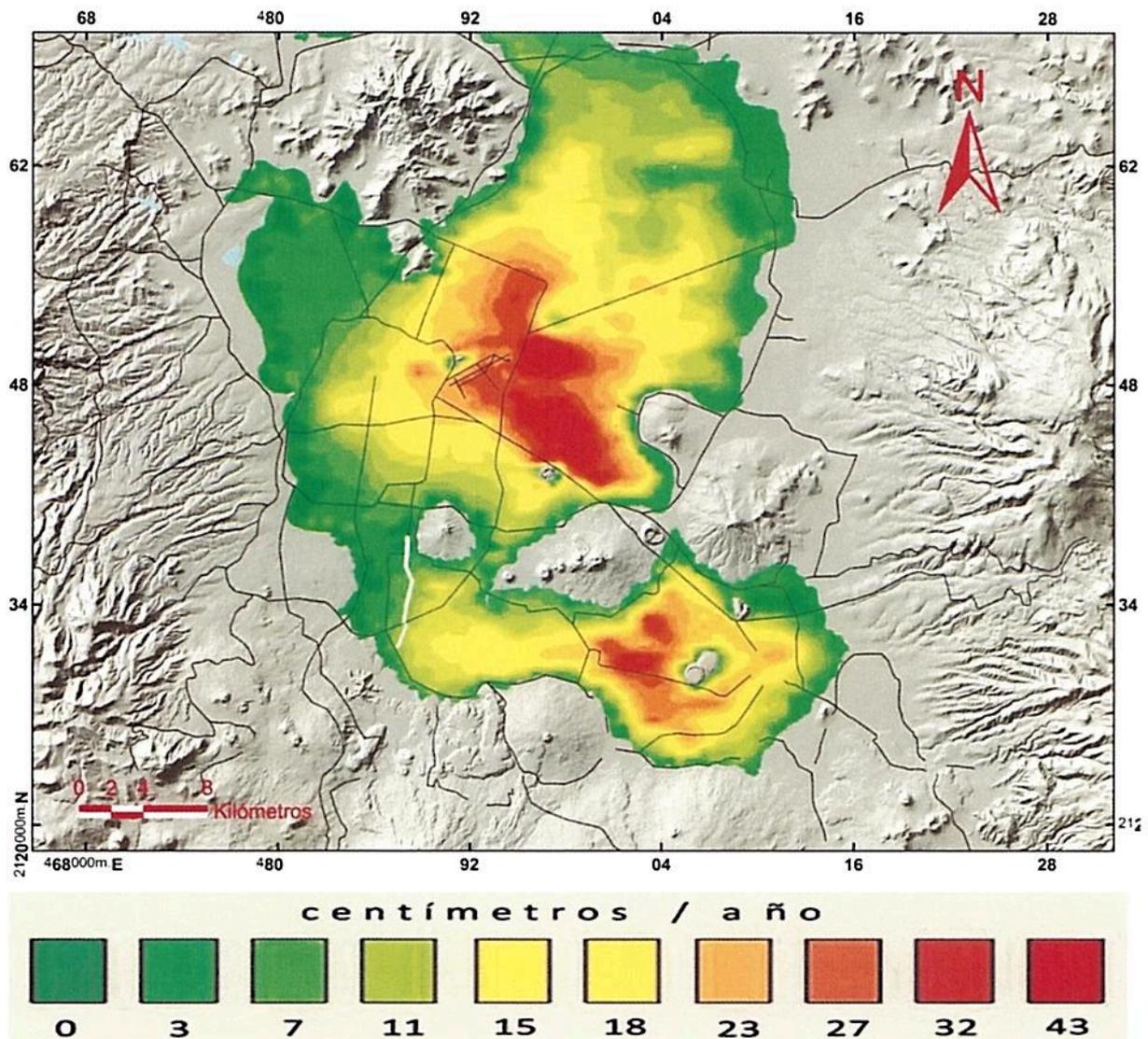


Fig. 13 Distribución espacial de las velocidades de hundimiento (1999 – 2008)

El trazo del proyecto en estudio se encuentra en una zona de velocidad de hundimiento baja a media (3 a 11cm/año). Esta condición es de poca relevancia para el METROBÚS ya que el trazo no se encuentra en una zona de transición abrupta y los asentamientos diferenciales asociados a los hundimientos regionales se distribuyen a lo largo de distancias considerables.

4. AGRIETAMIENTO

Cada vez con mayor frecuencia, se señala en alguna zona de la ciudad de México la aparición de grietas en el suelo que causan alarma entre la población y llegan a ocasionar daños de importancia a las construcciones.

El fenómeno del agrietamiento se puede manifestar a consecuencia de cualquier condición que genera esfuerzos de tensión importantes en el suelo (Auvinet *et al.*, 20017). El fenómeno del agrietamiento del suelo en el valle de México tiene por tanto distintas causas, incluyendo la contracción de las arcillas lacustres por secado, la existencia de esfuerzos de tensión asociados al peso de las construcciones, el fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos, los movimientos sísmicos, etc. Sin embargo, las grietas más importantes y destructivas son una

consecuencia directa del hundimiento regional que se presenta en el valle de México por efecto del bombeo de agua en estratos profundos.

Al acentuarse el hundimiento, el agrietamiento del suelo, que antes solo ocurría en el vaso seco del Lago de Texcoco, ha tomado mucha importancia en la zona de transición, como consecuencia de los asentamientos diferenciales entre zonas de suelo blando y firme, con su secuela de daños a las construcciones e instalaciones urbanas.

En la Figura 14 se puede observar llanamente que tanto el trazo del METROBÚS como el área de influencia del proyecto, se encuentran a más de cinco kilómetros de la zona donde ocurre con más intensidad el fenómeno del agrietamiento (periferia de la Sierra de Santa Catarina). Cabe subrayar que la periferia del Cerro de la Estrella no es una zona de intenso agrietamiento, debido a las pendientes suaves de las laderas de este Cerro y al hecho de que existía previamente a la formación de los lagos.

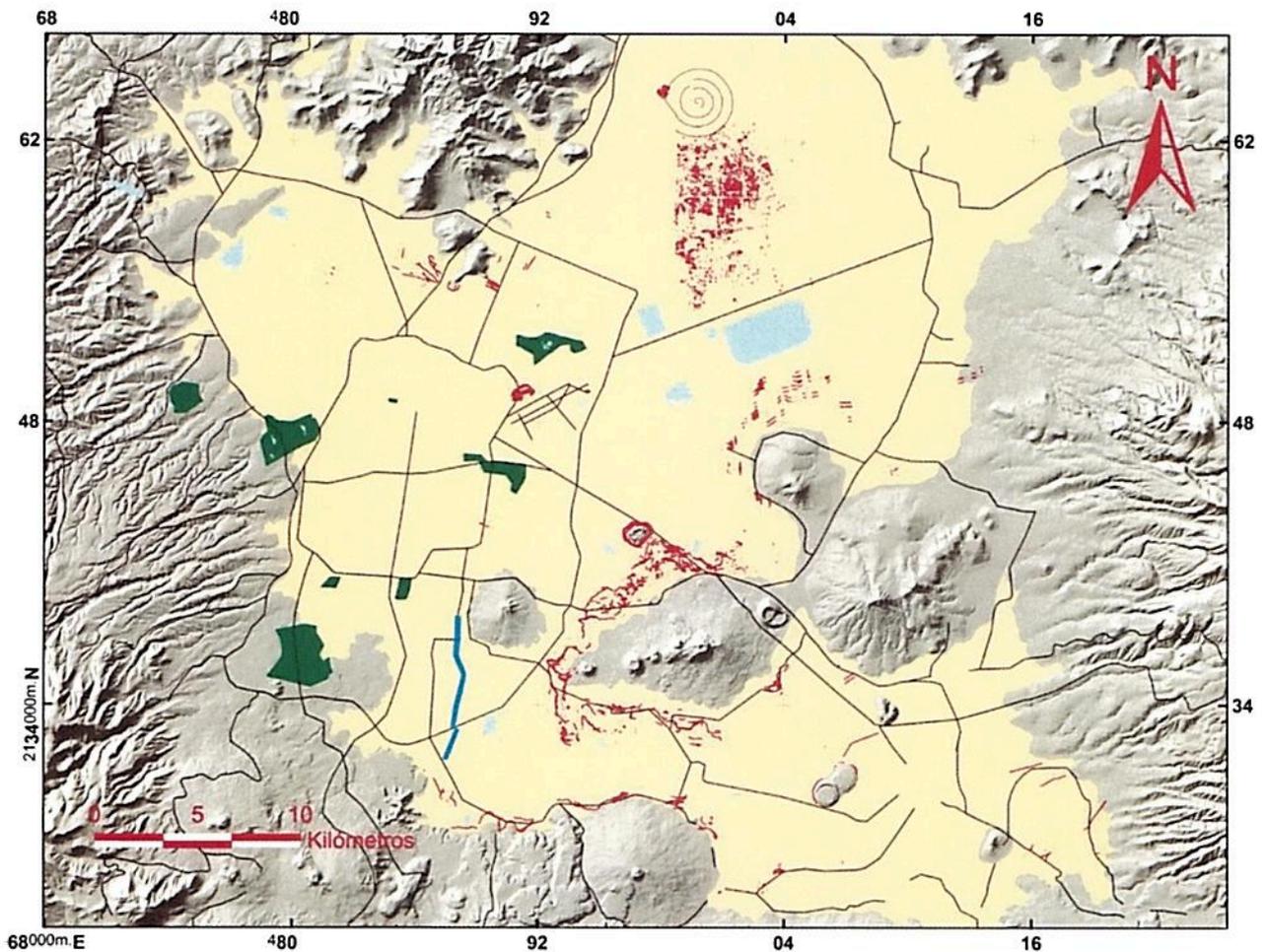


Fig. 14 Trazo del proyecto del METROBÚS bajo el contexto del fenómeno del agrietamiento.

CONCLUSIONES

La Dirección General del METROBÚS ha solicitado al Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) su asesoría para la caracterización geotécnica del subsuelo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS.

Se ha realizado una evaluación de cada una de las capas temáticas que conforman el marco físico-geográfico, histórico y social del Valle de México que resguarda el Grupo del Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM, así como de la información existente acerca del hundimiento, agrietamiento y anomalías geotécnicas.

Los documentos antiguos como mapas, litografías y cartográficos consultados revelaron pocas modificaciones antropogénicas al entorno físico geográficos del territorio donde se desenvuelve el trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y; en consecuencia, la problemática que plantean los riesgos geotécnicos no es trascendental para la estructura vial del proyecto.

En esta etapa del proyecto, se puede concluir específicamente lo siguiente:

- El trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS cruza depósitos de suelos lacustres (Zona III) y, en menor proporción, materiales aluvio – lacustres (Zona II). Estas condiciones geotécnicas son típicas de las prevalecientes en el ex lago de la ciudad de México donde se encuentra desplantada gran parte de la Capital.
- El trazo se desarrollará en un área prácticamente plana, sin accidentes topográficos de importancia.
- Se encontraron algunas anomalías geotécnicas a lo largo del trazo (cruce con antiguos canales, calzadas y ríos) que podrán tomarse en cuenta en el diseño de la obra.
- La compresibilidad y la baja resistencia del suelo lacustre no constituyen una limitante para este tipo de proyecto debido a la escasa magnitud de las cargas transmitidas por la cimentación de la vía al suelo.
- El trazo cruza una zona donde el hundimiento regional que afecta toda la zona lacustre es de intensidad baja a media. Los asentamientos diferenciales inducidos por este hundimiento no afectarán el proyecto puesto que se desarrollarán en distancias considerables.
- El proyecto no se encuentra en una zona de transición abrupta entre suelos firmes y blandos donde pueda presentarse agrietamiento del suelo. Las zonas de mayor intensidad de agrietamiento (Periferia de la Sierra de Santa Catarina) se encuentran a más de cinco kilómetros de distancia. La zona periférica al Cerro de la Estrella no es sensible al agrietamiento debido a las laderas suaves que caracterizan este cerro y a su historia geológica.

En resumen, no se han detectado obstáculos de carácter geotécnico al desarrollo del proyecto de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS.

REFERENCIAS

Auvinet, G., Méndez, E. and Juárez, M., (2017). "El subsuelo de la Ciudad de México/The Subsoil of Mexico City", Vol. 3 de la Tercera edición del libro de Marsal y Mazarí, UNAM, Mexico, ISBN 978-607-02-8198-3.

Gobierno de la Ciudad de México, (2017), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones. Gaceta de la CDMX

Mooser, F., Montiel, A. y Zuñiga, A. (1996). "Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos", Comisión Federal de Electricidad, Ciudad de México, México.

Mooser, F., (2018). "Geología del Valle de México y otras regiones del país", Colegio de Ingenieros Civiles de México, Volumen 1, Ciudad de México, México.