CARLOS MIGUEL VALDÉS GONZÁLEZ
DIRECTOR GENERAL DEL CENAPRED

Ciudad de México a 18 de diciembre de 2017

INFORME TÉCNICO

APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS PARA LA DETECCIÓN DE FRACTURAS SUPERFICIALES EN EL SUBSUELO DE LAS COLONIAS XALTOCAN Y TEJOCOMULCO EL BAJO, DE LA DELEGACIÓN XOCHIMILCO, CDMX

ANTECEDENTES

En respuesta al Oficio Núm. DGVIN/357/2017, signado por el Mtro. Rogelio Conde García, Director General de Vinculación, Innovación y Normatividad en Materia de Protección Civil (DGVIN), de la Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), de la SEGOB, con el que turna a la Dirección General del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la petición de la Diputada Flor Ivone Morales Miranda para que se realicen estudios del subsuelo en los pueblos de la delegación Xochimilco, afectados por el sismo de M7.1 del 19 de septiembre pasado, se solicitó al personal de la Dirección de Investigación establecer comunicación con el TUM. José Felipe Martín García del Campo, titular de Protección Civil de esa Delegación, a fin de solicitar información sobre las zonas afectadas por el sismo y conocer si habían recibido algún apoyo técnico por parte de la Secretaría de Protección Civil del Gobierno de la Ciudad de México.

Derivado de esa comunicación, se tuvo conocimiento que la delegación no había recibido asistencia técnica por parte del gobierno de la Ciudad, por lo que se acordó realizar estudios geofísicos y geotécnicos en los sitios que ellos identificaran como de mayor prioridad. Para ello, titular de Protección Civil propuso realizar dichos estudios en las calles Av. Francisco Goytia, de la colonia Xaltocan, y Nueva Xochimilco Tulyehualco, de la colonia Tejocomulco El Bajo. En estos sitios, según información de la TUM. José Felipe Martín García del Campo, se presentaron hundimientos súbitos y agrietamientos durante el evento telúrico, y se magnificaron los que ya existían.

CARLOS MIGUEL VALDÉS GONZÁLEZ
DIRECTOR GENERAL DEL CENAPRED

Ante esta situación, y con el propósito de contar con mayor información sobre la distribución y profundidad de las grietas, así como de posibles manifestaciones futuras en el área en estudio, se realizaron seis líneas de exploración geofísica con la técnica de georradar (GPR) y seis sondeos geotécnicos con un Penetrómetro Dinámico de Energía Variable (PANDA, por sus siglas en francés), con los cuales es posible explorar el subsuelo a profundidad (hasta 6 m) y en sentido longitudinal.

Con el análisis conjunto de la información geofísica, geotécnica y geológica, es posible definir el modelo geológico conceptual que prevalece en el sitio, mismo que se deberá complementar con información de estudios de exploración directa (perforaciones), para su validación o reinterpretación.

INTRODUCCIÓN

Los estudios geofísicos aplicados en la ingeniería civil y para la prevención del riesgo tienen tres funciones principales: 1) Funcionan como guía para la proposición de perforaciones exploratorias en zonas anómalas, o de interés a través de los diferentes contrastes que muestran los perfiles y planos geofísicos. 2) Caracterización inicial de la distribución de las propiedades físicas de los elementos geológicos que componen el subsuelo, los cuales relacionados con la estratigrafía local podrían asociarse empíricamente a una unidad geológica. 3) Como medio de correlación espacial y de distribución de elementos geológicos-geotécnicos, una vez que se han ejecutado sondeos geotécnicos de mecánica de rocas y/o de suelos, los cuales funcionan como anclas de correlación para la elaboración de un modelo conceptual espacial.

Con la finalidad de conocer la distribución y ubicación de grietas y deformaciones que afectan a las construcciones y calles en los sitios de estudio, se realizó un estudio geofísico el día 20 de octubre pasado, utilizando la técnica de Georradar (GPR). La Dirección de Protección Civil de la delegación Xochimilco, definió la zona prioritaria para realizar el estudio, motivo de este documento. Lo anterior con el propósito de que replique el estudio aquí descrito, de forma independiente, en otras áreas afectadas de la delegación.

En este informe se presentan los resultados del procesamiento, interpretación e integración de los datos geofísicos; los cuales fueron obtenidos durante las etapas de reconocimiento de la zona, adquisición en campo y consulta de literatura, misma que se refleja en el contenido de este trabajo.

Por otra parte, las pruebas geotécnicas con el PANDA, permiten conocer la variación, con la profundidad, de la resistencia del suelo la detección de capas blandas, resistentes y duras.

En el cuerpo de este documento se muestran los resultados obtenidos en seis puntos de la Av. Francisco Goytia, de la colonia Xaltocan, en los alrededores de las franjas de hundimiento y agrietamiento (escalones).

Objetivos

Realizar una caracterización estratigráfica de los materiales y la identificación de posibles anomalías geotécnicas (asociadas a grietas y deformaciones), con una profundidad de exploración de entre 5 y 7 m, mediante:

- La técnica de Georadar (GPR), para identificar la posible distribución de estructuras que afectan a las construcciones, además de contribuir con el modelo geológico del subsuelo en el sitio.
- Determinar las variaciones del subsuelo atribuidas a las estructuras presentes, también para identificar zonas que puedan presentar el mismo problema en el futuro.
- Determinar la distribución de la resistencia de los suelos en los sitios estudiados con el PANDA

Estos resultados de las pruebas con georradar se deberán corroborar de manera directa, principalmente con perforaciones que deben realizarse en el mismo sitio donde se llevaron a cabo los estudios aquí reportados.

Localización

Los sitios estudiados y su ubicación respecto al valle de México se muestra en la Figura 1. Las coordenadas UTM son 489565 X y 2128612 Y, en la Calle Francisco Goytla y en donde se encuentran las líneas 1 y 2 y, en las coordenadas UTM 491192 X y 2128154 Y, en la Calle Nueva Xochimilco Tulyehualco.

Figura 1 Zonas en estudio y su ubicación en donde se aplicaron los métodos geofísicos de exploración (izquierda: líneas 1 y 2, derecha: líneas 3, 4, 5 y 6)

CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS

Geomorfología

El sistema lacustre de Xochimilco se ubica fisiográficamente en la provincia del Eje Neovolcánico, Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, en el extremo sur de la Cuenca de México. Se originó al final del período terciario superior y principios del cuaternario; durante esta fase la parte sur del Valle fue obstruido por la formación de la Sierra del Chichinautzin, surgiendo la cuenca endorreica de México, y a partir de ello, el depósito de materiales de origen volcánico, aluvial y orgánico, estos últimos predominantes en el área, y origen de la planicie de la cuenca y la llanura lacustre. En cuanto a su geomorfología, se divide en tres unidades: llanura lacustre, llanura lacustre-salina y llanura aluvial, mientras que su área de influencia hacia la parte sur se clasifica como pie de monte o zona de "transición". Por su topografía, la zona se ubica en un terreno plano de origen lacustre correspondiente al antiguo vaso del lago de Xochimilco, pero muy cerca de la zona de transición abrupta (Auvinet y coautores, 2009).

El sistema de topoformas sierra volcánica con estratovolcanes aislados corresponden a los cerros Xochitepec y Tzompol, así como la pendiente del volcán Teuhtli y el cerro Tlacuallelli, ubicado en el centro-sur del territorio de Xochimilco; la zona lacustre lo componen el vaso del antiguo lago de Xochimilco, hoy ocupado por la chinampería, la zona de transición entre el valle y la sierra y los límites de Xochimilco con Tláhuac e Iztapalapa.

Geología

De acuerdo con la carta geológica de le República Mexicana, en la demarcación el material que aflora se caracteriza por una litología en la que predomina el suelo lacustre (29.48 %) y aluvial (12.18 %), basalto (26.71 %), andesita (11.62 %), brecha volcánica básica (9.73 %), toba básica (1.08 %) y toba básica-brecha volcánica básica (0.16%), Tabla 1.

El basamento de esta demarcación es el mismo que para el resto de la Cuenca de México, se encuentra representado por una unidad de roca caliza de edad cretácica a una profundidad aproximada de 2,000 m. Sobre esta unidad de caliza se encuentra una secuencia de rocas conglomeráticas heterogéneas con clastos de caliza y fósiles del cretácico conocida con el nombre de Conglomerado Texcoco; esta secuencia sedimentaria se considera la base de la secuencia estratigráfica de la cuenca (Padilla y Sánchez, 1989).

Geología regional (cuenca del valle de México)

Sierra de las cruces (oligoceno)

La Sierra de las Cruces constituye el límite occidentalde la cuenca de México constituida por ocho estructuras volcánicas traslapadas (García-Palomo et al., 2008). De sur a norte, se han reconocido los siguientes estratovolcanes:

- Zempoala (3690 m.s.n.m.),
- La Corona (3770 m.s.n.m.),
- San Miguel (3870 m.s.n.m.),
- Salazar (3660 m.s.n.m.),
- Chimalpa (3420 m.s.n.m.),
- Iturbide (3620 m.s.n.m.),
- La Bufa (3460 m.s.n.m.) y
- La Catedral (3780 m.s.n.m.),
- El volcán Ajusco.

De manera general, los productos de estas estructuras volcánicas consisten de derrames de lava, depósitos piroclásticos, depósitos de flujos de escombros y avalanchas de escombros (Aguirre-Díaz et al., 2006; García-Palomo et al., 2008; Arce et al., 2008), con composición química de andesita a dacita de afinidad calci-alcalina (Gunn y Mooser, 1970; Arce et al., 2008).

Formación Xochitepec (oligoceno)

La denominada Formación Xochitepec fue definida por Mooser et al. (1956) como una serie de rocas volcánicas (derrames de lava y becha), que podría corresponder con autobrechamiento y/o brechas de falla de composición andesítica (64 – 66.7 % en peso de SiO2) y con una edad del Oligoceno, con afloramientos en el poblado de Santa Cruz Xochitepec, en la Delegación Xochimilco.

Cerro de la estrella

El Cerro de la Estrella se define en este trabajo como un "volcán en escudo", con base en sus características morfológicas, ya que presenta pendientes y terminaciones de los frentes de lava muy suaves, en forma radial, coronada por un cono de escorias.

Los productos del Cerro de la Estrella (escorias y derrames de lava), presentan una composición andesítica (58 % en peso de SiO2), con una textura porfídica y fenocristales de plagioclasa + clinopiroxeno + óxidos de Fe-Ti, así como xenocristales de cuarzo.

Sierra de santa catarina (holeoceno)

La Sierra Santa Catarina está conformada de manera general, por siete estructuras volcánicas monogenéticas, alineadas en dirección general E – O, y de occidente a oriente son denominadas Yuhualixqui, Xaltepec, Tetecón, Tecuatzi, Mazatepec, Santa Catarina y La Caldera (Lugo-Hubp et al., 1994).

La mayoría se trata de conos de escoria y cenizas, con derrames de lava asociados. Una de estas estructuras consiste de un domo de lava (Tecuatzi) y la estructura más al occidente se trata de un maar (La Caldera). La composición de la mayoría de los cuerpos de esta Sierra se encuentan en el límite andesítico-basáltico y andesítico (57 % en peso de SiO2). En general la roca es afanítica con fenocristales de plagioclasa + clinopiroxeno + ortopiroxeno + olivino y xenocristales de cuarzo, inmersos en una matriz vítrea.

Campo volcánico de chichinautzin

El Campo Volcánico Chichinautzin forma parte del límite sur de la Cuenca de México, constituido por más de 120 volcanes monogenéticos (conos de escoria, derrames de lava fisurales, domos y volcanes en escudo), dentro de un área de 2680 km2. La mayoría de los materiales de este campo es tiene una composición química andesítico-basáltica (57 % en peso de SiO2).

Depósitos superficiales

Por último, se tiene al paquete más superficial, el cual consiste de depósitos lacustres, con edades tan antiguas de más de 220 mil años A.P., (Brown et al., 2012) hasta el Reciente. La sedimentación en el lago que albergaba la Cuenca de México, se vio interrumpida en varias ocasiones por eventos volcánicos como el de la Pómez Tutti Frutti hace 14000 años (Siebe y Macías, 2004), Pómez Toluca Superior hace 10500 años (Bloomfield et al., 1977; Arce et al., 2003) y el volcán Xitle hace 1600 años (Siebe, 2000).

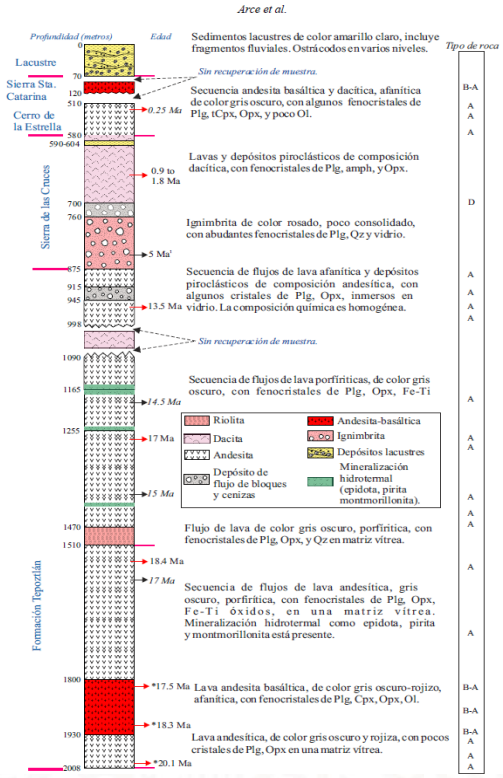


Figura 2 Columna estratigráfica obtenida del pozo San Lorenzo Tezonco modificado de Arce et al. (2013a)

Geología local

La parte norte del territorio de Xochimilco es plana y se encuentra a 2240 msnm. Esta zona fue ocupada hace algunos años por el lago de Xochimilco, cuyos vestigios son los canales de la chinampería. Al sur del vaso lacustre se elevan los cerros de Xochitepec, Tzompol, Tlacuallelli y Teuhtli, que constituyen el límite natural entre Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac y forman parte de la cadena montañosa que impide el desagüe natural de la Cuenca de México por el sur. En la cumbre del volcán Axocopiaxco el territorio de la delegación alcanza más de 3000 msnmm.

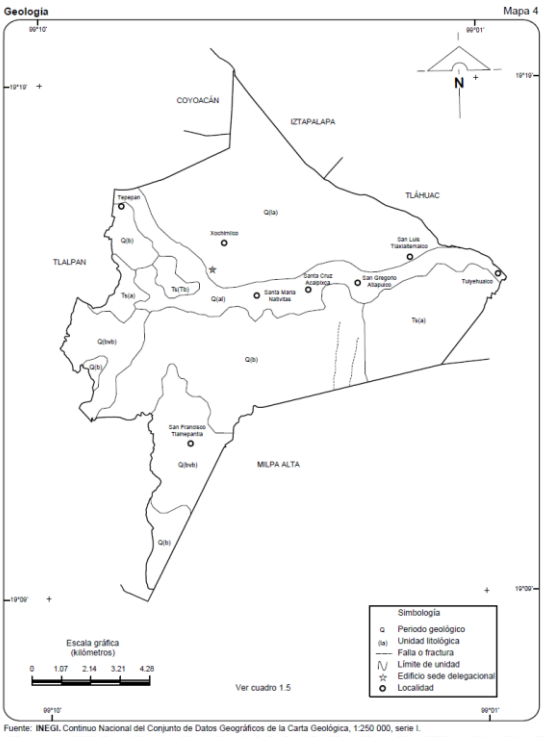


Figura 3 Marco geológico local

La zona de transición entre el lago y terreno firme (ver Figura 4), se compone de gravas y arenas gruesas intercaladas con arcillas y pequeñas coladas de basalto, producto de una actividad volcánica del Neógeno. Las localidades que se encuentran en la zona sur de Xochimilco se ubican en la zona de transición, la cual también está formada por depósitos volcánicos compuestos por rocas ígneas extrusivas básicas (basaltos) e intermedias (andesitas y flujos piroclásticos). La zona centro y norte de la delegación está constituido principalmente de suelos con sedimento de grano fino y algunos depósitos de roca extrusiva básica, así como de materiales volcanoclásticos; en ésta se presenta una mayor densidad demográfica.

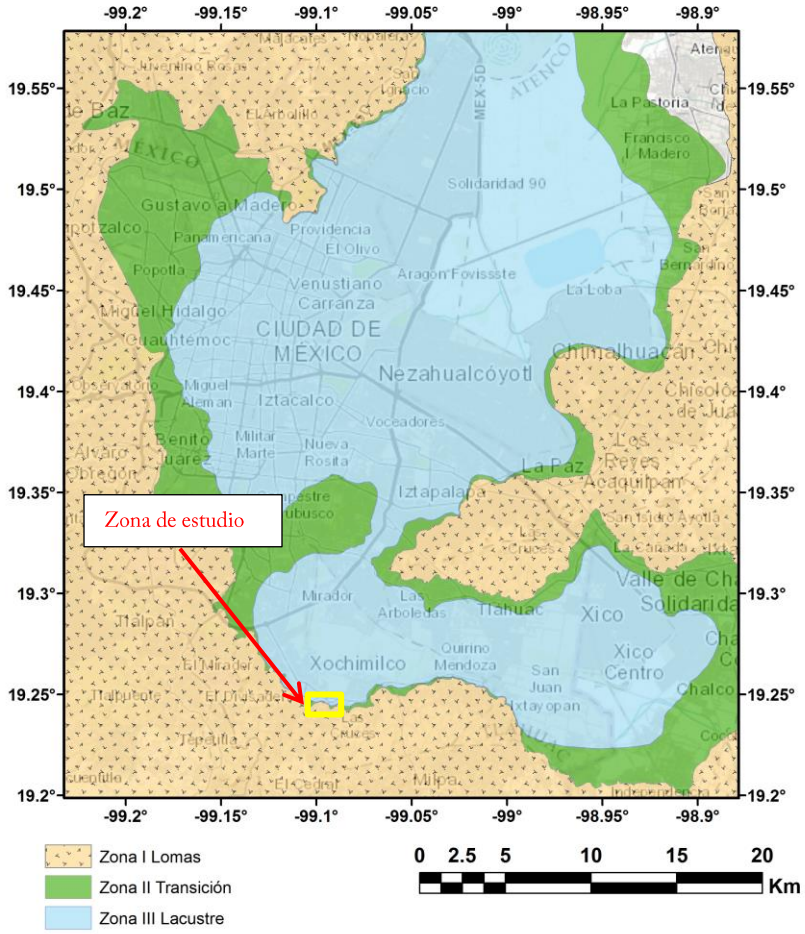


Figura 4 Zonificación geotécnica

Tabla 1 Litología

Litología	Superficie absoluta (ha)	%
Lacustre	3695.212	29.48
Aluvial	1576.737	12.18
Basalto	3347.300	26.71
Andesita	1457.219	11.62
Brecha volcánica básica	1216.506	9.73
Toba básica	135.842	1.08
Toba básica-brecha volcánica básica	20.639	0.16

Tipos de suelo

Los suelos son predominantemente lacustres y palustres, de composición geológica diversa. Varían de acuerdo a la zona en que se encuentran, presentan un alto contenido de materia orgánica, son de colores oscuros; influenciados por la presencia de un manto freático cercano; son suelos profundos y discontinuos, debido a que se originaron como pequeños islotes rodeados de agua; algunos autores clasifican estos suelos como antrosoles por el proceso de formación de las chinampas y la influencia humana (INECOL, 2002).

En las proximidades de la zona chinamperas, llamada zona de transición, los suelos son de tipo aluvial, a lo largo de una franja que corre de Este a Oeste sobre el límite sur del sistema, se componen de grava y arena gruesas intercaladas con arcillas y pequeñas coladas de basalto, localizados en la parte sur del poblado de Santa Cruz Acalpixca. En la zona lacustre predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino, con alrededor del 50% de cenizas volcánicas. Con texturas que van de arenosas hasta limo-arcillosas, y recientemente una alta cantidad de humedad.

Hidrografía

Xochimilco pertenece a la región del Pánuco, dentro de la cuenca hidrológica del Río Moctezuma y la subcuenca Lago Texcoco-Zumpango (INEGI, 1998). Se estima una longitud aproximada de 203 km de canales conectados entre sí; entre los más importantes se encuentran: Cuemanco, Nacional, Chalco, Del Bordo, Apatlaco, San Sebastián, Ampampilco, Texhuilo, Zacapa, Caltongo, Santa Cruz y Japón. Las lagunas principales son Caltongo, Del Toro y el lago de Conservación de Flora, Fauna y Acuacultura de San Gregorio Atlapulco. Actualmente, los canales y lagunas son alimentados artificialmente con agua tratada de las plantas del Cerro de la Estrella, cuyo aporte es de 1 m^3/s; San Luis Tlaxialtemalco, que aporta 0.225 m^3/s; además de la planta de San Lorenzo Tezonco.

Otra fuente de abastecimiento son los escurrimientos superficiales originados por los ríos Santiago o Parres, San Lucas y San Gregorio, que se forman en las estribaciones de la Sierra Ajusco-Cuautzin. El río Parres baja desde las laderas occidentales del Cuautzin a la presa de San Lucas Xochimanca, la cual tiene una capacidad de almacenar 850,000 m^3. Los ríos San Lucas y San Gregorio conducen escurrimientos y captan las aguas residuales y pluviales de los pueblos de Santiago Tepalcatlalpan, San Lucas Xochimanca, San Mateo Xalpa, San Miguel Topilejo, y San Francisco Tlalnepantla.

TRABAJOS DE CAMPO

Se recabó y analizó información geológica y geotécnica de las zonas con mayor afectación en el área de estudio. Ello con la finalidad de orientar adecuadamente el trabajo de campo (trabajos de adquisición de información geofísica), así como la interpretación posterior. Finalmente, se realizó la integración en gabinete de la modelación e interpretación de la información.

Georradar (GPR)

En la Tabla 2 se presentan los datos de ubicación de las siete líneas de georradar realizadas con una antena de 250 MHz, con coordenadas geográficas decimales y volumen de obra.

Tabla 2 Volumen de obra de Georradar (GPR).

Método	Línea	INICIO		FINAL		Longitud [m]
		X	Y	X	Y	
(GPR)	GPR-1	489565	2128612	489630	2128606	60
	GPR-2	489630	2128607	489617	2128614	60
	GPR-3	491192	2128154	490865	2128199	350
	GPR-4	491210	2128152	491358	2128120	180
	GPR-5	491417	2128118	491401	2128126	20
	GPR-6	491221	2128158	491195	2128004	160
Total						**830 m**

Resultados del Georradar (GPR)

Se aplicó el método de GPR para inferir la distribución de los materiales del subsuelo y poder asociar de manera indirecta las fracturas y los horizontes son susceptibles de contener saturación. Las mediciones consistieron en el levantamiento de siete líneas. Para el levantamiento se utilizó el equipo de radar MALA, con una antena de 250 MHz.

De acuerdo con la distribución del parámetro anómalo de velocidad y permitividad, se observan dos unidades en la interpretación geofísica u horizontes anómalos principales. Una de ellas ha sido subdividida

para un mejor análisis y se describen en la Tabla 3. En ésta se presentan las correspondientes unidades, así como el material con el que se asocian las mismas.

Tabla 3 Interpretación general para la técnica de georradar

Unidad Geofísica	Interpretación Geofísica
U1	Capa de Cobertura; relacionadas con materiales de suelo lacustre y aluvial de composición geológica diversa, en donde predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino y lentes de cenizas volcánicas.
U2	Asociado al mismo tipo de depósitos lacustres y aluviales de la unidad U2, pero aparentemente está unidad tiene menor saturación y con el material más competente.

En las Figuras 5 a 10 se muestran los resultados, poniendo particular atención en los efectos anómalos observados en los radargramas de las 6 líneas de medición. En los radargramas se marcaron con líneas rojas las discontinuidades más importantes por la presencia de posibles fracturas producto de los asentamientos en el sitio de estudio

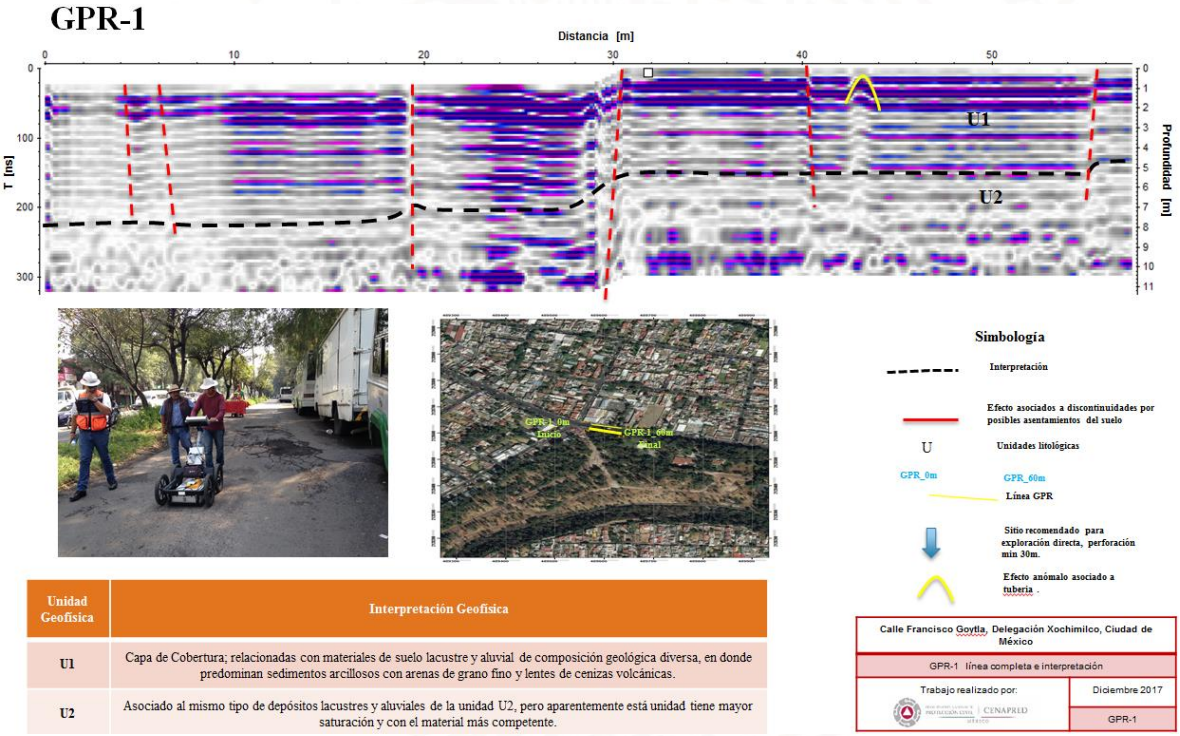
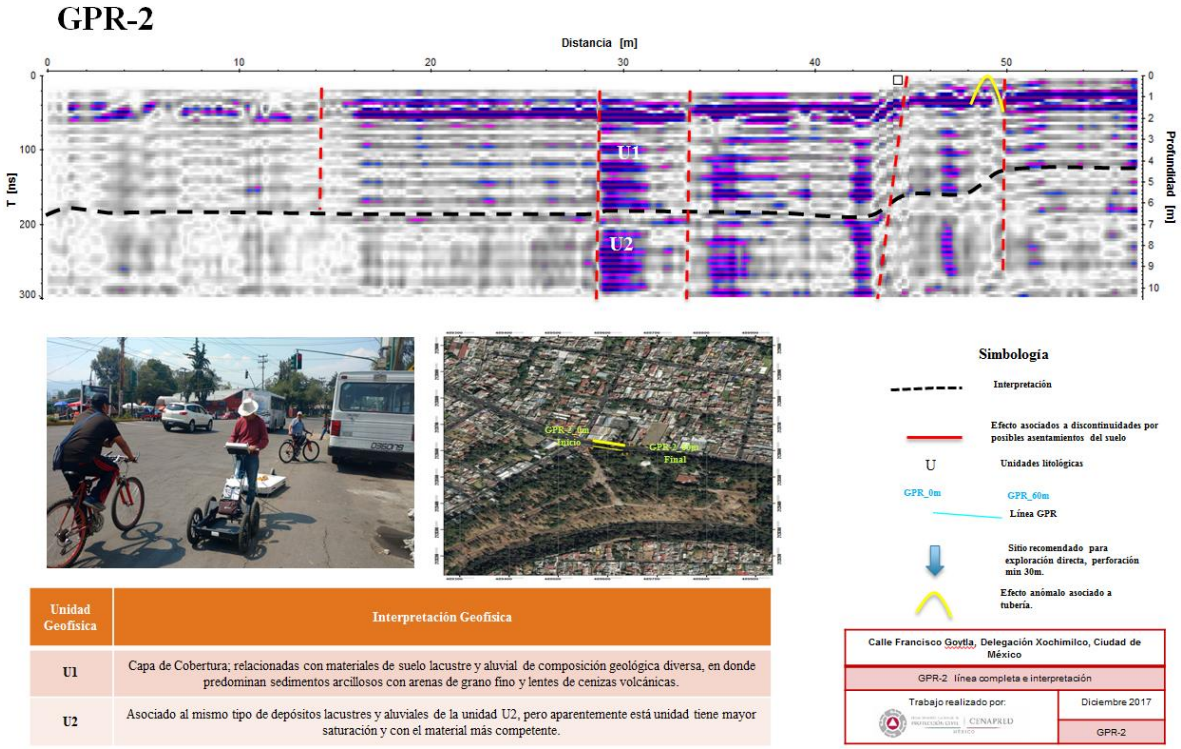
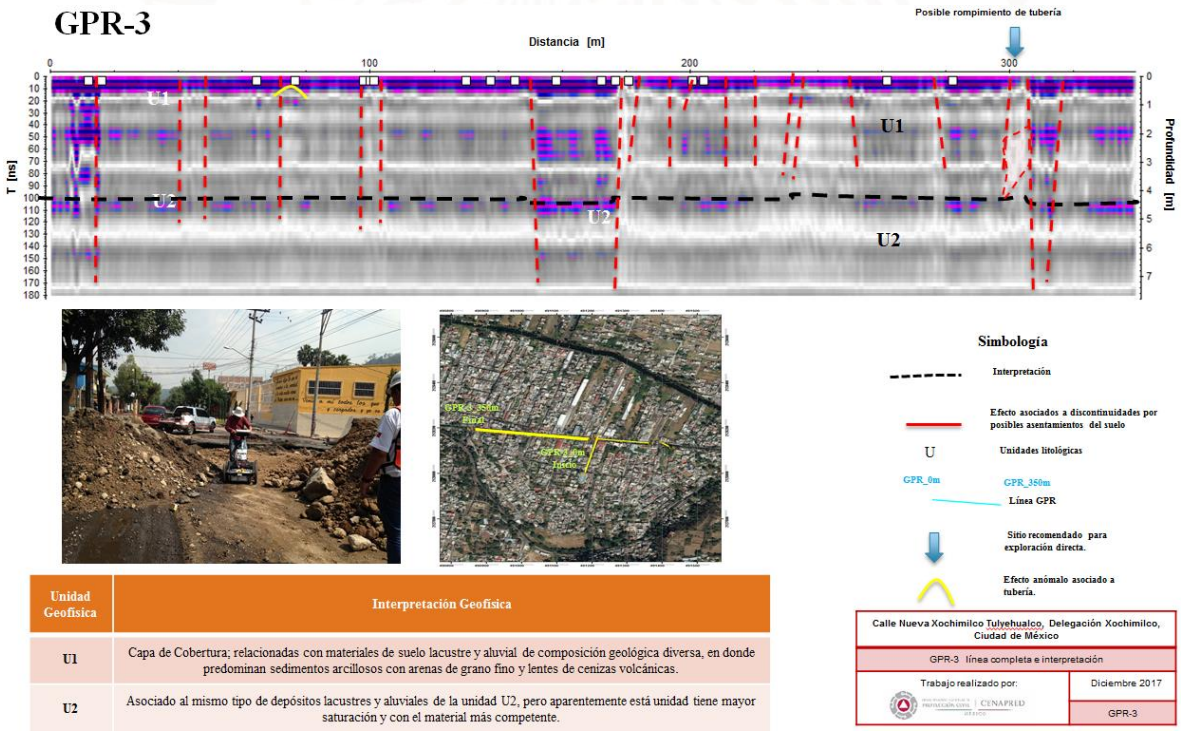


Figura 5 Radargrama obtenido en la Línea GPR-1 con la antena de 250 MHz



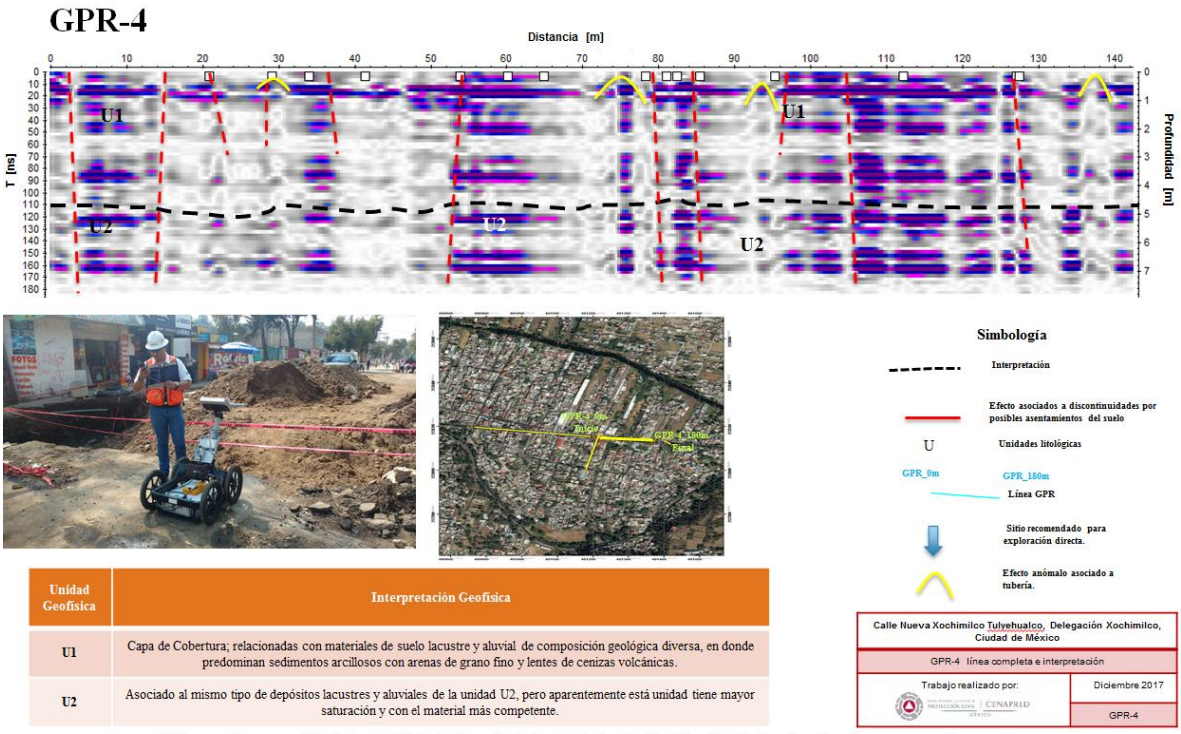
Unidad Geofísica	Interpretación Geofísica
U1	Capa de Cobertura; relacionadas con materiales de suelo lacustre y aluvial de composición geológica diversa, en donde predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino y lentes de cenizas volcánicas.
U2	Asociado al mismo tipo de depósitos lacustres y aluviales de la unidad U2, pero aparentemente está unidad tiene mayor saturación y con el material más competente.

Figura 6 Radargrama obtenido en la Línea GPR-2 con la antena de 250 MHz



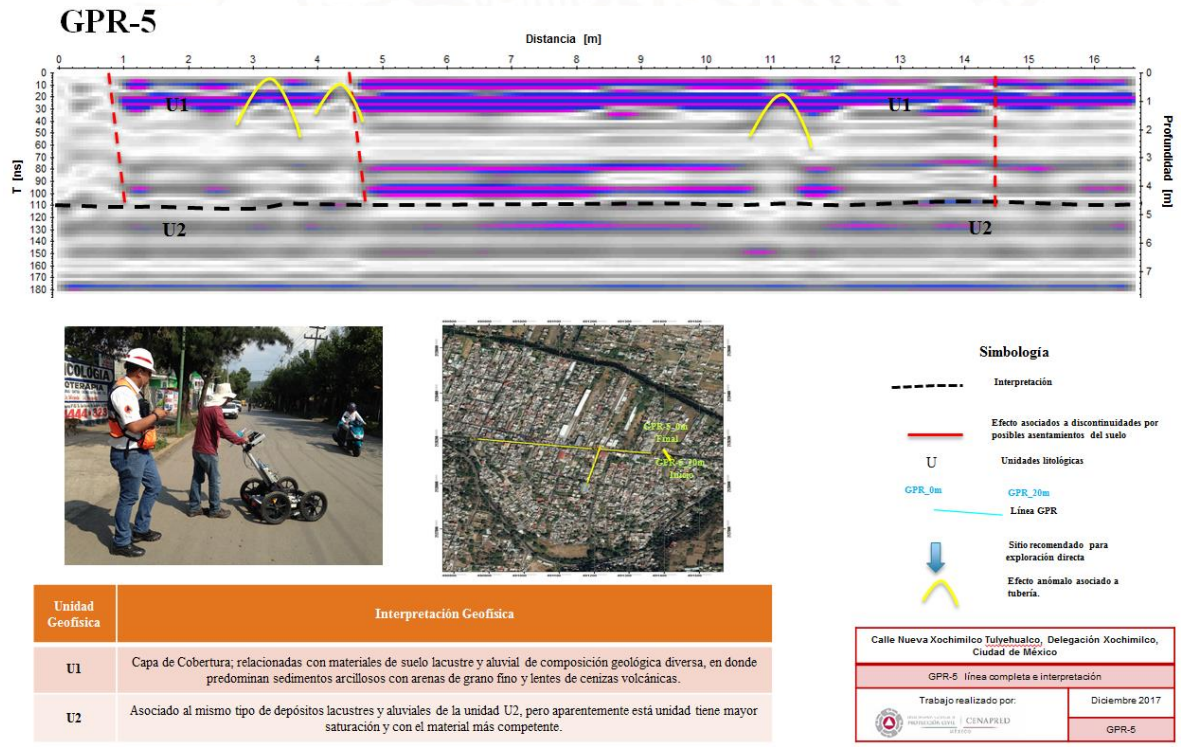
Unidad Geofísica	Interpretación Geofísica
U1	Capa de Cobertura; relacionadas con materiales de suelo lacustre y aluvial de composición geológica diversa, en donde predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino y lentes de cenizas volcánicas.
U2	Asociado al mismo tipo de depósitos lacustres y aluviales de la unidad U2, pero aparentemente está unidad tiene mayor saturación y con el material más competente.

Figura 7 Radargrama obtenido en la Línea GPR- 3 con la antena de 250 MHz



Unidad Geofísica	Interpretación Geofísica
U1	Capa de Cobertura; relacionadas con materiales de suelo lacustre y aluvial de composición geológica diversa, en donde predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino y lentes de cenizas volcánicas.
U2	Asociado al mismo tipo de depósitos lacustres y aluviales de la unidad U2, pero aparentemente está unidad tiene mayor saturación y con el material más competente.

Figura 8 Radargrama obtenido en la Línea GPR-4 con la antena de 250 MHz



Unidad Geofísica	Interpretación Geofísica
U1	Capa de Cobertura; relacionadas con materiales de suelo lacustre y aluvial de composición geológica diversa, en donde predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino y lentes de cenizas volcánicas.
U2	Asociado al mismo tipo de depósitos lacustres y aluviales de la unidad U2, pero aparentemente está unidad tiene mayor saturación y con el material más competente.

Figura 9 Radargrama obtenido en la Línea GPR-5 con la antena de 250 MHz

Unidad Geofísica	Interpretación Geofísica
U1	Capa de Cobertura; relacionadas con materiales de suelo lacustre y aluvial de composición geológica diversa, en donde predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino y lentes de cenizas volcánicas.
U2	Asociado al mismo tipo de depósitos lacustres y aluviales de la unidad U2, pero aparentemente está unidad tiene mayor saturación y con el material más competente.

Figura 10 Radargrama obtenido en la Línea GPR-6 con la antena de 250 MHz

Cabe mencionar que los métodos geofísicos identifican las características del subsuelo de manera indirecta, por lo se tendrá una cierta ambigüedad en la interpretación de los cambios en las propiedades físicas respecto a la profundidad. Por ello se recomienda de una verificación directa que lleve a una valoración integral de los rasgos que se identifican en los perfiles, esto debido a que en muchas ocasiones no se puede confiar demasiado debido a que muchas interpretaciones podrían deberse a niveles de ruido debido a variaciones en saturación.

Penetrómetro Dinámico de Energía Variable (PANDA)

El PANDA es un dispositivo mecánico-electrónico-portátil que se utiliza para determinar, en el sitio, la variación de la resistencia del suelo con la profundidad (Gourves, R., 1991). Se le conoce como Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable (PANDA por sus siglas en francés) y es un penetrómetro dinámico manual, compuesto por barras ligeras cortas que se unen a una punta cónica. La prueba consiste en hincar, en la masa del suelo, la punta cónica unida al tren de barras, mediante golpes que se aplican en un cabezal (Fig. 11).

El funcionamiento del equipo se basa en la medición de la energía que se requiere para hincar la punta cónica hasta una cierta profundidad; con lo cual es posible calcular la resistencia que presenta el suelo a la

penetración de la punta. La profundidad alcanzada en cada golpe y la resistencia que opone el suelo a la penetración de la punta permite generar gráficas de resistencia contra profundidad, y con ello conocer centímetro a centímetro la variación de la resistencia del suelo con la profundidad.

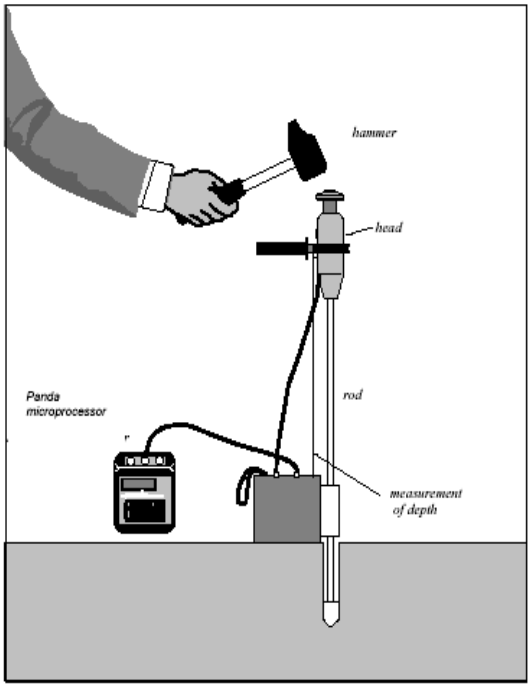


Figure 1

The PANDA during testing

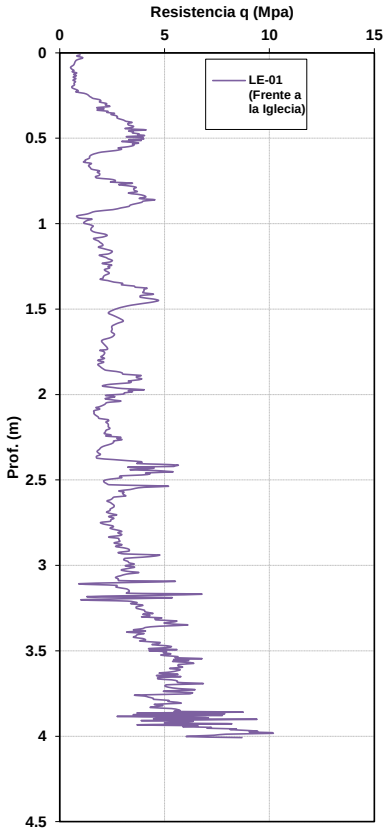


Figura 11 a) Esquema que ilustra la operación del PANDA y b) registro típico que se obtiene con la prueba

En la Figura 12 se muestra la ubicación de los sitios donde se realizaron las seis pruebas con el PANDA, mismas que se distribuyeron en la porción oeste de la franja de asentamiento de la Av. Francisco Goytia, en la colonia Xaltocan, representada con línea roja, la cual forma un arco siguiendo el contorno de las coladas de lava en la porción sur de Xochimilco.

Los sondeos se realizaron en la parte baja de la franja de asentamiento (sondeos S1, y S4) y en la parta alta (sondeos S2, S3, S5 y S6) con la finalidad de identificar la posible presencia de capas superficiales de suelo endurecido (tepetate) o de roca (Fig. 13), cuya presencia pudiera explicar la forma en que se han generado los asentamientos del terreno en esa zona.

Figura 12 Vista aérea de la zona donde se realizaron las pruebas con el PANDA y algunas de las afectaciones producidas por el hundimiento diferencial súbito generado durante el sismo

Los resultados de las pruebas con el Panda (sondeos S1 a S6) se muestran en las gráficas de la Figura 13. En las gráficas 13a y 13d (sondeos S1 y S4) se puede observar una capa de suelo arcilloso extremadamente blanda, subyacida por un estrato muy resistente entre 2.25 y 2.5 m de profundidad. Ambas pruebas fueron realizadas en la parte baja del escalón delimitado por la línea roja de la Figura 12.

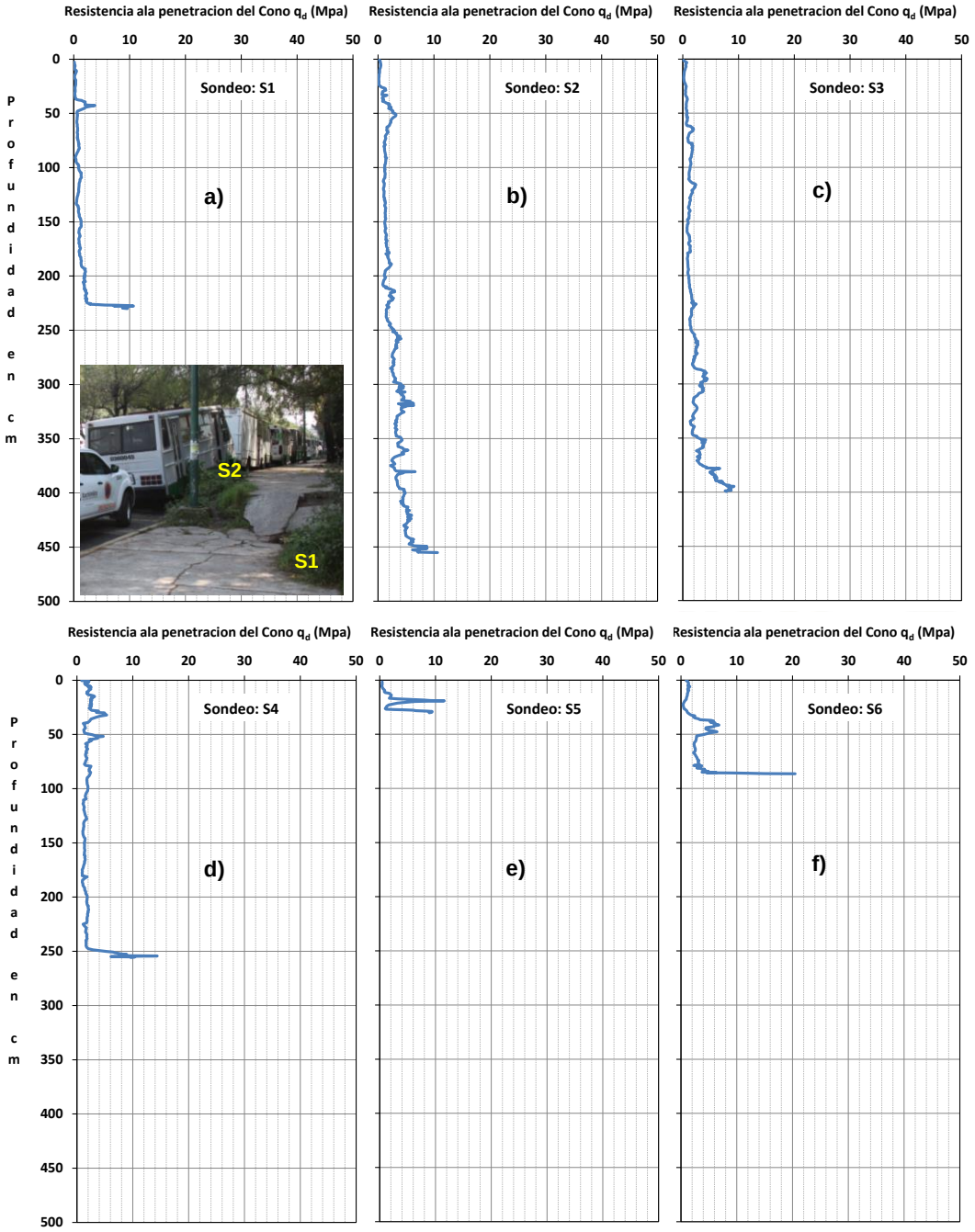


Figura 13 Resistencia dinámica a la penetración del cono (Penetrogramas) en los seis puntos que se indican en la Fig. 12

Llama la atención que dicho estrato resistente, no se encontró en los penetrogramas de los sondeos S2 y S3 (gráficos 13b y 13c, respectivamente), realizados en la parte alta y muy cercanos al escalón que delimita la zona de hundimiento diferencial. Por otra parte, el penetrográma del sondeo S6 (gráfico 13f), realizado en la parte alta del escalón, sobre el camellón de la Av. F. Goytia, indica la presencia de la capa dura a una profundidad de escasos 80 cm; en tanto que el sondeo S5 no es representativo ya que, aunque fue realizado sobre la franja de asentamiento, el equipo no pudo hincarse a más de 50 cm, lo cual pudo haberse debido a la presencia de un bloque o escombro, ya que fue realizado en una jardinera de la banqueta frente al hotel ExHacienda de Xaltocan.

Cabe comentar que, durante el evento telúrico del 19S, y según testimonios de personal que labora en el hotel ExHacienda de Xaltocan, se generó un hundimiento súbito de aproximadamente 30 cm, el cual ocasionó daños severos en dicho hotel (Figs. 12ª, 12d y 14). Es importante aclarar que dicho hotel ya había sido dañado por un evento similar sucedido durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, por lo que se implementó una junta constructiva, para dar oportunidad que ambos cuerpos de la estructura se movieran libremente, ya que ha sido afectado por la franja de hundimiento diferencial que lo atraviesa.

Figura 13 Daños registrados en las instalaciones del hotel ExHacienda de Xaltocan, debidas al hundimiento súbito sucedido durante el evento telúrico del 19S

CONCLUSIONES

Las técnicas empleadas en este estudio (GPR y PANDA), son relativamente buenas y aceptables para estudiar capas superficiales del subsuelo, debido a la rapidez con la que se pueden realizarse. Reducen costos de ejecución y los resultados son confiables para la profundidad de estudio. Sin embargo, para el caso del GPR, por tratarse de la transmisión de una señal electromagnética, está sujeta a varios tipos de ruidos que pueden afectar la señal y provocar una interpretación errónea, en particular cuando hay presencia de humedad o saturación en el medio, debido a que se atenúa rápidamente la señal, siendo esta absorbida y dando datos erróneos.

En la fisiografía de la zona de estudio, donde se realizó el levantamiento de GPR existe evidencia de rasgos de subsidencia diferencial por la consolidación de materiales y por cambios litológicos bruscos en los materiales del subsuelo, además provoca fracturamiento.

Después del horizonte claro registrado en todos los modelos 2D y que es debido a la capa asfáltica, existe un cambio de litología que se encuentra entre los 3-5 m de profundidad, siendo en este estrato donde se encuentran las mayores anomalías asociadas a fracturamiento, por lo que se hace evidente que estas son superficiales, sin embargo, en algunos casos las discontinuidades observadas continúan en estratos inferiores.

Ambas zonas de estudio son prácticamente planas, pero la corrección por topografía, ayudo a definir bien los horizontes anómalos en los cambios de velocidad del medio, de esta manera en las ligeras pendientes (sobre todo en las líneas 1 y 2 en donde se encuentra la discontinuidad principal), se nota un espesor mayor pero con cierta saturación y material de relleno, o bien, material menos competente que en el piso de lo que podría llamarse falla de la misma discontinuidad principal, esto es, que existe gran saturación en el flanco oeste mientras que el flanco este es más competente. Cuando los materiales se reacomodan o reblandecen por infiltración de agua, estos pueden colapsar, generando graves daños en las construcciones debido a asentamientos diferenciales cómo los encontrados en las líneas 1 y 2 (GPR-1 y GPR-2).

Por lo que se refiere a los resultados obtenidos con el PANDA, las pruebas indican la presencia, no homogénea, de una capa dura ubicada a escasos 2.5 m de profundidad, en la parte baja de la franja de asentamiento; en tanto que en la parte alta, dicha capa podría localizarse a 80 cm de profundidad.

Llama la atención que en cercanía a la franja de asentamiento pero en la parte alta del escalón, no se halló dicha capa dura. Esto podría deberse a que ambas capas se están separando horizontalmente debido al proceso de hundimiento regional que experimenta la Ciudad de México.

RECOMENDACIONES

El método geofísico aplicado en el presente informe, como el georradar (GPR) es un método indirecto, por lo que se considera que el estudio es una primera etapa de análisis, esto es, sin ser un estudio definitivo.
Se recomienda realizar otro estudio geofísico (mediciones geoeléctricas) para corroborar y delimitar las zonas de saturación y para verificar el horizonte más competente para buscar alguna remediación en las zonas afectadas, tanto en periodo de precipitaciones como en temporada es estiaje, para verificar los niveles freáticos dinámicos y estáticos. Si es posible, tener un pozo de monitoreo hidrogeológico en la zona de estudio para hacer la misma verificación.
Se recomienda realizar un estudio de microzonificación detallado y de buena resolución para ver los cambios de periodos dominantes del suelo y verificar si en algún periodo en particular del suelo es donde se presentaron los mayores daños.
También, se recomienda tener una recopilación de información, tal como un análisis de fotointerpretación de la zona para detectar zonas con presencia de humedad superficial, las cuales podrían debilitar la superficie debido a la filtración.
De acuerdo a los resultados y conclusiones en las interpretaciones de todas las líneas de medición, se recomienda una verificación directa con un sondeo de investigación geotécnica (perforación) en los sitios indicados, para un reconocimiento tanto en forma, extensión y geometría de las discontinuidades marcadas.
Una vez que se tenga la verificación directa, tomar la decisión para remediación respecto a las construcciones, con ingenieros civiles especialistas.
Para conocer con mejor detalle la ubicación y distribución de la capa dura dentro y fuera de la franja de asentamiento, se recomienda realizar más sondeos geotécnicos con el PANDA, los cuales podrían ser realizados por la misma unidad de Protección Civil, la cual podría solicitar el apoyo del CENAPRED y/o de la Secretaría de Protección Civil de Guerrero, ya que esta última cuenta con cuatro equipos.

REFERENCIAS

Actualización estadístico espacial como fuente de un ordenamiento territorial en la región de la zona sur de la ciudad de México, en las delegaciones Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, milpa alta, Tlalpan y Xochimilco. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-11-2010.pdf

Annan, 1992. Ground Penetrating Radar Workshop Notes Sensor and Software. Ground Penetrating Radar. Ontario Canada. 125, pp.

Aranda-Sánchez, M. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Dirección General del Recursos Naturales y Desarrollo Rural, Secretaria de Medio Ambiente. México, 2004.

Atlas de Peligro y/o Riesgos de la Delegación Xochimilco 2015. Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.

Auvinet, G., 2009, "Land subsidence in Mexico City", memories of the Technical Committee #36, ISSMGE, Geotechnical Engineering in Urban Areas Affected by Land Subsidence, Mexico DF, pp 1-11. Cuaderno estadístico delegacional de Xochimilco, DF., 2013, INEGI.

Dentith, M and Mudge, S. Geophysics for the mineral exploration geoscientist. Cambridge University Press. United Kingdom, 2014.

Escobar-Salguero, L. H., Cortes-Soto, F. O., (2000). Fundamentos de la Teoría Electromagnética. Facultad de Ingeniería, UNAM; México, 243, pp.

Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la cuenca de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 67, 2015.

Milson, Jhon. Field Geophysics, The Geological Field Guide Series. Third edition. Ed Wiley. England, 2003.

Gourvès, R. (1991). Le PANDA – pénétromètre dynamique léger à énergie variable. LERMES CUST, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 1991. 12 p.

Oleg, D. J., (1966). Electricity and Magnetism, an introduction to the theory of electric and magnetic field. Electret Scientific Company Star City. West Virginia University.

Telford, W. M. Applied Geophysics. Second edition. Cambridge University Press. United Kingdom, 1993.

Wait, J.R., (1970). Electromagnetic Waves in Stratified Media. Pergamon Press. Oxford-New York. 608, pp.

Elaboraron: Subdirección de Dinámica de Suelos
Subdirección de Riesgos Sísmicos
CGM/ldm*era*arm*jcjv*
Vol. 1178-17