



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

**ESTUDIOS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y
GEORRADAR EN LOS MUNICIPIOS DE LERDO,
DURANGO Y TORREÓN, COAHUILA, A FIN DE
IDENTIFICAR ZONAS DE PELIGRO O RIESGO
POR POSIBLES HUNDIMIENTOS DEL TERRENO**

Subdirección de Riesgos Sísmicos

Elaboró: Alejandra Robles Mendoza

Apoyaron en el presente trabajo: Diana Ivon Cortes Cruz y Emmanuel Ramírez Álvarez en trabajo de campo; Ana Daniela Villa Montes, Estefanía M. Viera Juárez y Aldo Jovan Leal Delgado en el procesamiento de datos.



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

LERDO, DURANGO



Contenido

Antecedentes	1
Introducción	1
Objetivo	1
Localización del proyecto	2
Orografía	2
Marco geológico e hidrográfico	3
Descripción de las unidades litológicas	3
Geología local	3
Formación Cupido	3
Formación Aurora	4
Aluvión	4
Rellenos antrópicos	4
Principales acuíferos de la Comarca Lagunera	5
Trabajo de campo	5
Actividades de campo	6
Resultados del levantamiento geofísico empleando georradar de penetración terrestre y tomografía de resistividad eléctrica	8
Resultados del levantamiento geofísico empleando Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	8
Resultados de la exploración con georradar (GPR)	12
Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica vs Georradar de Penetración Terrestre	14
Conclusiones y recomendaciones	17
Referencias	51
Anexo 1	19
Anexo 3	56



Antecedentes

En atención a la solicitud de la Unidad Estatal de Protección de Durango, personal de la Subdirección de Riesgos Sísmicos de la Dirección de Investigación, fue comisionado para estudiar las condiciones del subsuelo en Lerdo, Durango, con la finalidad de identificar zonas de peligro por posibles hundimientos del terreno, dado que se han observado agrietamientos, así como deformaciones y colapsos.

Por ello, y con el propósito de contar con mayor información sobre la posible distribución de dolinas o cavidades en el subsuelo, se realizó una visita a la cabecera municipal en comento, para aplicar dos técnicas geofísicas de exploración, las cuales consistieron en la adquisición de seis líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y 16 líneas con la técnica de Georradar (GPR). Lo anterior, con la finalidad de identificar la forma y distribución de las cavidades generadas por el fenómeno de karsticidad en la zona de estudio, las cuales al colapsar puede afectar a la población y a la infraestructura. De la misma manera, el presente estudio permite la identificación de otros sitios con posibilidad de presentar la misma problemática en el futuro, dentro de la ciudad de Lerdo, Durango.

Introducción

Objetivos

Caracterizar la estratigrafía del subsuelo e identificar posibles cavidades hasta una profundidad de exploración de 20 m, mediante métodos geofísicos de exploración:

- Caracterización electro-estratigráfica, con la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), para identificar la posible distribución de cavidades en el subsuelo y obtener un modelo geológico a detalle.
- Determinar las variaciones del subsuelo debido a las cavidades presentes, para identificar zonas proclives a la generación de cavidades.

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



Localización del proyecto

Ciudad Lerdo, Durango, se ubica en el sector centro-oriental del estado, en el borde noreste del antiguo cauce del río Nazas y al norte y poniente del cerro Las Calabazas, entre las coordenadas geográficas 25°10' y 25°47' de latitud norte, y 103°20' y 103° 59' de longitud oeste, y una altitud entre 1,100 y 2,900 m respecto del nivel medio del mar. El área de estudio se muestra en la figura 1.

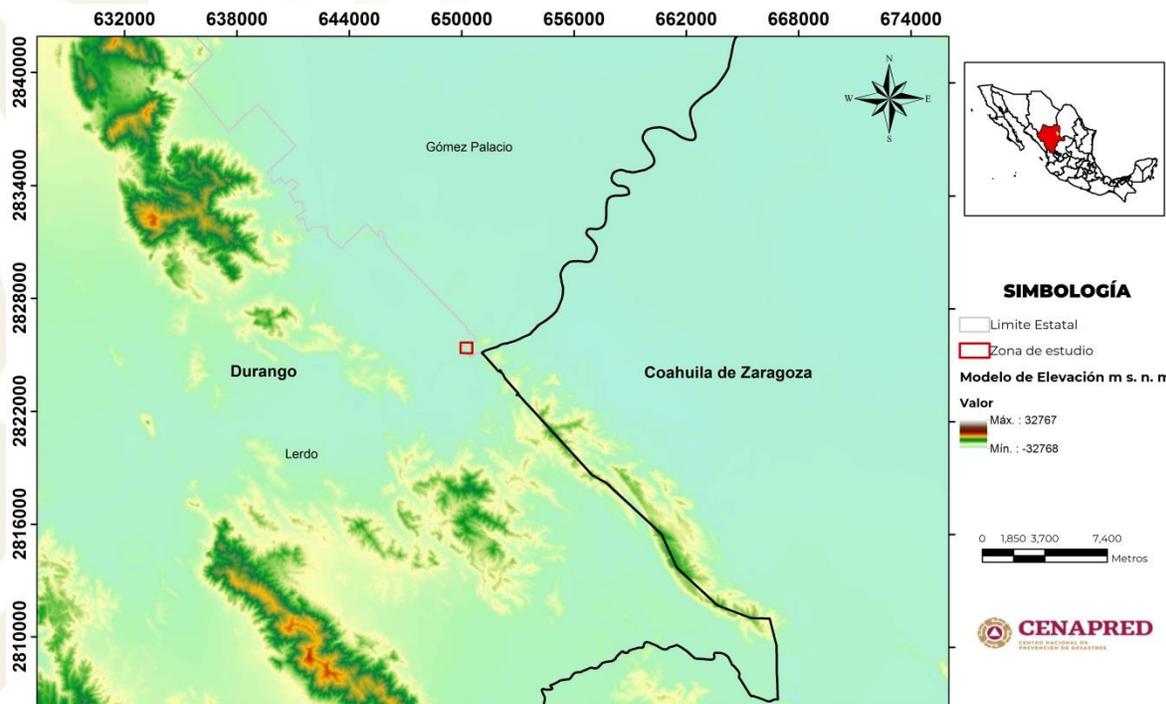


Figura 1 Localización de la zona de estudio

Orografía

Lerdo, se encuentra localizada dentro de las provincias fisiográficas de Sierras y Llanos del Norte y Sierra Madre Oriental; orográficamente existen varias sierras y cerros de mediana elevación que la bordean en sus porciones poniente, sur y oriente, como son el cañón de Fernández, el cual sirve de lecho al río Nazas, el cañón de Huanchi y el del Borrego. Estas provincias están ubicadas en la parte occidental del municipio, donde es más notable su orografía. Al norte se ubica la sierra del Rosario. Las elevaciones con mayor importancia son: sierra de Mapimí (2,240 msnm), sierra de Sarnoso (2,040 msnm), sierra Patrón (1,640 msnm), sierra España (2,140 msnm), sierra La Presa (1,540 msnm), sierra Los Lobos (1,320 msnm), y sierra del Rosario (2,820 msnm) (Nieto-Samaniego, 2012).



Marco Geológico

Descripción de las unidades litológicas

La región de Lerdo está constituida por llanuras, colinas y valles, llanuras asociadas con laderas tendidas y llanuras de piso rocoso o cementando y sierras altas y bajas con valles intermontañosos. La base de la columna sedimentaria está conformada por una secuencia vulcano-sedimentaria (formación Nazas) depositada durante el Triásico-Jurásico Medio (figura 2). Esta sedimentación cambió gradualmente en el Jurásico tardío, tiempo en el que da inicio el gran ciclo de sedimentación marginal marino, que perduró durante el resto del Mesozoico y cuya distribución y facies estuvo controlada por el paleoelemento denominado Plataforma de Coahuila, durante el Jurásico y el Cretácico.

Durante el Jurásico tardío se acumularon grandes volúmenes de sedimentos clásticos hacia las márgenes de este paleoelemento, con el depósito de las formaciones La Gloria y La Casita, sedimentación que se extendió hasta el Berriasiano-Valanginiano temprano (formación Carbonera); sin embargo, para estos mismos tiempos se manifiesta de manera simultánea una sedimentación marina (formaciones Zuloaga, La Caja y Taraises) al poniente y sur de la franja litoral, definiendo ya un marcado avance de la transgresión marina.

Durante el Barremiano-Aptiano temprano, el patrón de sedimentación se torna netamente carbonatado, ocurriendo sobre una extensa plataforma (formación Cupido), (Nieto-Samaniego, 2012).

Geología local

La geología de la zona está caracterizada por rocas calizas que conforman los cerros ubicados en los alrededores de la colonia Villa de Las Flores; estas calizas corresponden a las formaciones Cupido y Aurora de edad Cretácico. Hacia sus flancos, los cerros se cubren de manera discordantes por materiales de talud natural y, en las partes planas, sedimentos de origen aluvial. También se presentan materiales antrópicos que consisten en rellenos heterogéneos, mal consolidados. A continuación, se describen las unidades litológicas en orden de la más antigua a la más joven, de acuerdo al Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Formación Cupido

Se refiere a una secuencia calcárea cuya localidad tipo se encuentra en el cañón El Mimbres, en la sierra de Parras, estado de Coahuila; aflora en las sierras de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental.

Localmente está constituida por calizas de color gris claro a oscuro, en estratos de 60 a 110 cm de grosor, con nódulos de pedernal y vestillas de calcita entre los estratos; sus capas expuestas frecuentemente presentan líneas estilolíticas y superficies de rugosidad por la disolución de carbonatos, su edad es Barremiano superior-Aptiano medio.

La formación Cupido se asocia al desarrollo de un arrecife. Esta formación se depositó en un ambiente de plataforma de aguas neríticas de alta energía. Esta



unidad conforma el macizo rocoso del cerro Las Calabazas, donde se ve cubierta discordantemente por material de talud natural, desarrollo de suelos y materiales antrópicos, heterogéneos.

Formación Aurora

Fue definida por Burrows en 1910, como una secuencia de calizas, su localidad tipo se encuentra en la mina La Aurora en la sierra de Cuchillo Parado, al poniente de Ojinaga, estado de Chihuahua. Está formada por calizas de color gris a gris-crema de textura fina con estilolitas interestratificadas, sus estratos varían de 40 hasta 250 cm, siendo comunes los nódulos de pedernal y horizontes delgados de lutita. Por su posición estratigráfica se le considera una edad Aptiano-Albiano inferior.

Aluvión

Bajo este nombre se integraron los materiales en estado suelto que involucran a los acarreos del río Nazas. Estos materiales comprenden una gran variedad de granulometría: grandes bloques de roca, boleos, guijarros, gravas, arenas, limos y arcillas, donde usualmente, predominan las texturas de arena fina a arcillas. Carecen de cementación, su consolidación es muy podre a nula. Se presentan cubriendo las partes bajas rellenando la llanura de inundación del río Nazas.

Rellenos antrópicos

También se presentan materiales heterogéneos con los que los colonos han rellenado depresiones. Incluyen fragmentos de roca y cascajo, su compactación es pobre. Dado a esta situación, es muy común que las estructuras ingenieriles de esa zona manifiesten fisuras, asentamientos diferenciales y en ocasiones hasta oquedades.

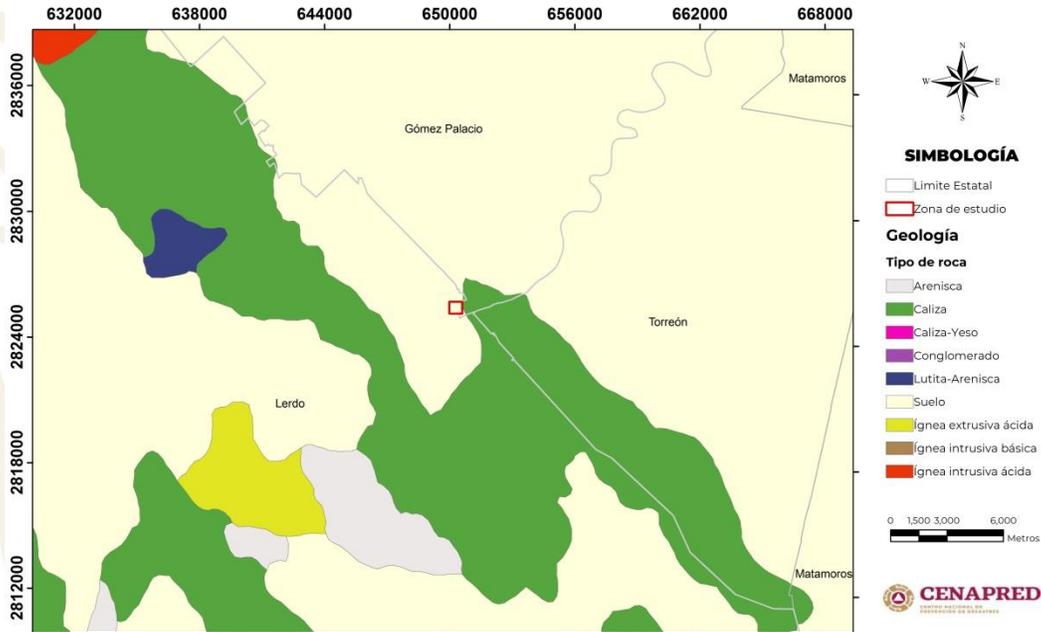


Figura 2 Geología regional del área de estudio

Principales acuíferos de la Comarca Lagunera

La subregión Comarca Lagunera-Parras, hidrológicamente está integrada por la cuenca media-baja de los ríos Nazas y Aguanaval, incluyendo la zona de descarga hacia las lagunas de Mayrán y Viesca. Las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval captan el agua de pequeñas corrientes intermitentes que descargan en las lagunas de Mayrán y Viesca. El escurrimiento es de 223 hm³/año; dados los compromisos de uso del agua y las pérdidas por infiltración y evaporación, no se tiene disponibilidad. Sin embargo, los volúmenes de escurrimiento del río Nazas, han dado origen a la construcción de importante infraestructura hidroagrícola: las presas de almacenamiento Francisco Zarco y Lázaro Cárdenas (Cervantes, R et al. s/a).

El potencial de aguas subterráneas se constituye por 10 acuíferos, de los cuales ocho se localizan en la parte central de la Comarca Lagunera y dos en la zona de Parras.

Los acuíferos más importantes son el Principal y Oriente Aguanaval de donde se abastecen la zona urbana de Torreón-Gómez Palacio-Lerdo; éstos concentran el mayor número de usuarios, la mayor demanda y también la mayor sobreexplotación de la subregión (Cervantes, R et al. s/a).

Trabajo 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 (estudios geofísicos), así como la



interpretación posterior. Finalmente, se realizó la integración en gabinete de la información, la modelación e interpretación de la información.

Actividades de campo

Las figuras 3 y 4 presentan un mapa con la exploración geofísica realizada, TRE y GPR además de las tablas con coordenadas y volumen de obra para cada técnica.

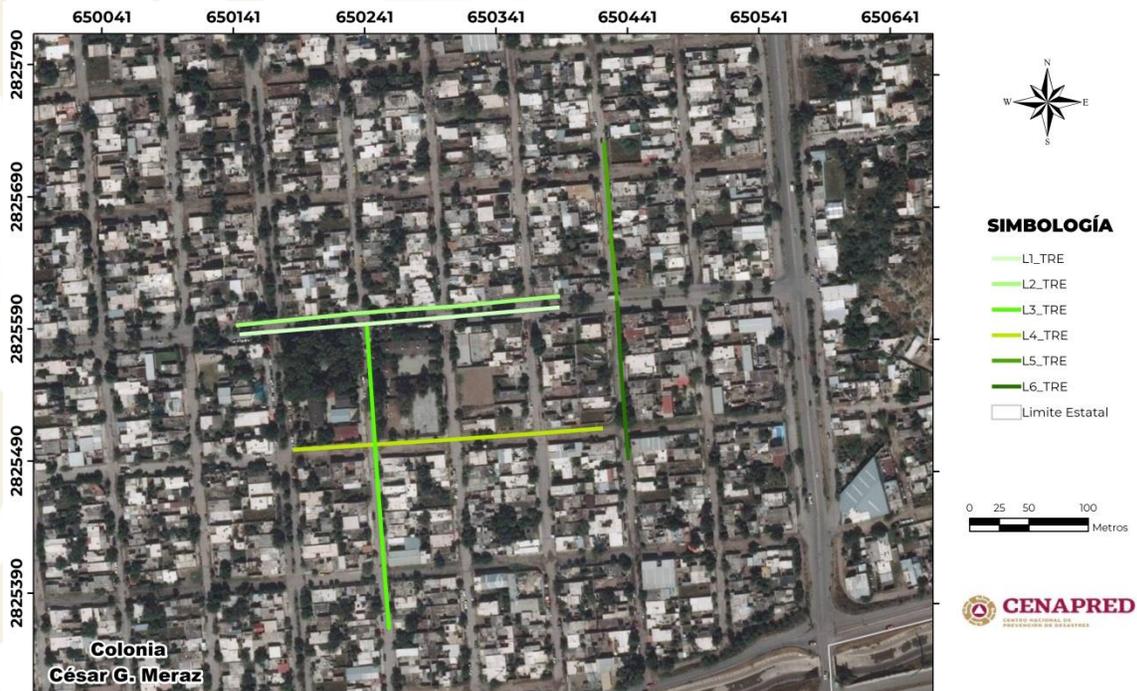


Figura 3 Área de exploración geofísica con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)



Figura 4 Área de exploración geofísica con Georradar de Penetración Terrestre (GPR)

Tabla 1 Coordenadas y longitud de las seis líneas de tomografía de resistividad eléctrica

Línea	Inicio		Final		Longitud [m]
	X	Y	X	Y	
L1_TRE	650104.280	2825587.231	650405.737	2825590.624	235.0
L2_TRE	650104.280	2825587.231	650405.737	2825590.624	235.0
L3_TRE	650204.766	2825588.361	650307.746	2825367.971	235.0
L4_TRE	650206.012	2825477.601	650406.985	2825479.864	235.0
L5_TRE	650405.737	2825590.624	650406.985	2825479.864	115.0
L6_TRE	650405.737	2825590.624	650404.490	2825701.385	115.0
Total					1,170

Tabla 2 Coordenadas y longitud de las 16 líneas de georradar realizadas con una antena de 250 MHz

Línea	Inicio		Final		Longitud [m]
	X	Y	X	Y	
L1_GPR	650405.737	2825590.624	650104.280	2825587.231	282.3
L1a_GPR	650405.737	2825590.624	650506.223	2825591.757	174.7
L1b_GPR	650506.223	2825591.757	650405.737	2825590.624	171.6



L2_GPR	650203.519	2825699.122	650306.499	2825478.732	298.1
L3_GPR	650304.004	2825700.253	650306.499	2825478.732	292.3
L4_GPR	650607.959	2825482.130	650206.012	2825477.601	453.1
L5_GPR	650508.721	2825370.236	650506.223	2825591.757	284.2
L6_GPR	650508.721	2825370.236	650404.490	2825701.385	411.9
L7_GPR	650607.959	2825482.130	650708.446	2825483.264	146.5
L8_GPR	650606.709	2825592.890	650708.446	2825483.264	100.7
L9_GPR	650708.446	2825483.264	650707.195	2825594.024	98.3
L10_GPR	650707.195	2825594.024	650607.959	2825482.130	125.8
L11_GPR	650704.694	2825815.546	650604.210	2825814.412	101.9
L12_GPR	650604.210	2825814.412	650604.210	2825814.412	70.2
L13_GPR	650704.694	2825815.546	650703.444	2825926.306	75.9
L14_GPR	650703.444	2825926.306	650604.210	2825814.412	101.0
Total					3,188.5

Resultados del levantamiento geofísico empleando Tomografía de Resistividad Eléctrica y Georradar de Penetración Terrestre

Resultados del levantamiento geofísico empleando Tomografía de Resistividad Eléctrica

Se aplicó el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), para caracterizar la distribución de resistividad de los materiales que conforman el subsuelo e identificar las zonas susceptibles a la formación de cavidades. Para la adquisición se utilizó un resistivímetro marca Syscal Pro de 48 canales. Los resultados de las seis líneas obtenidos en la colonia César G. Meraz se muestran en las figuras siguientes.

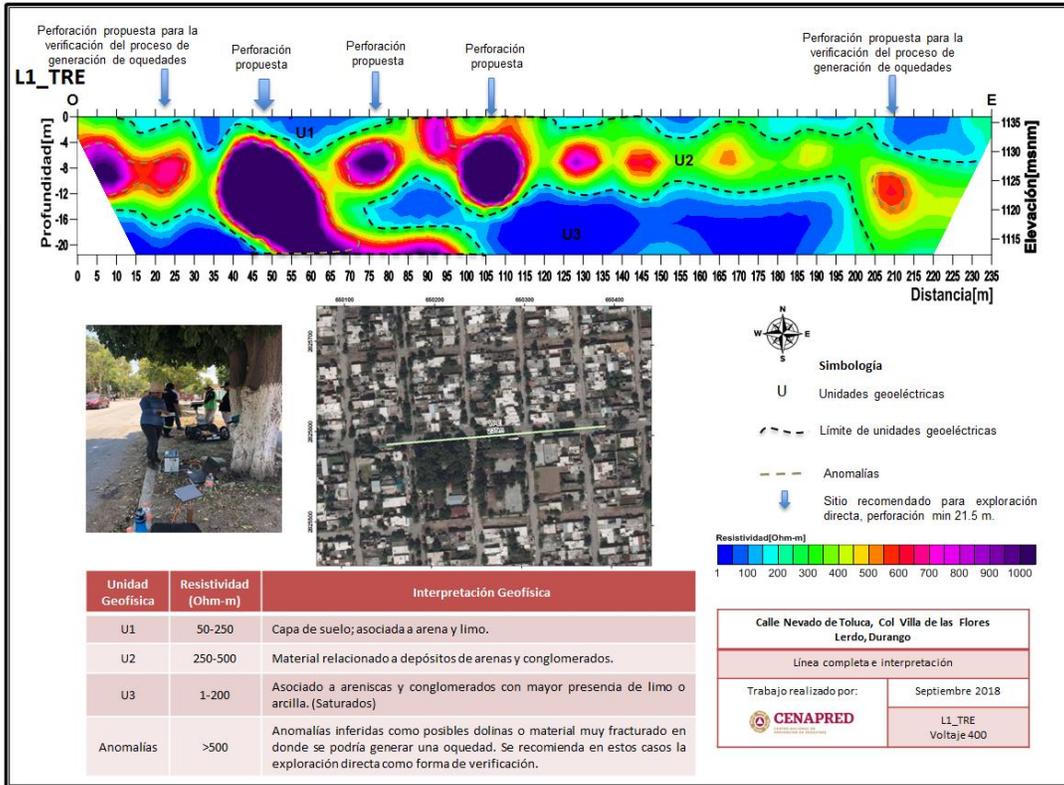


Figura 5 Perfil L1_TRE obtenido en la calle Nevado de Toluca, donde se muestran las diferentes unidades geoelectricas propuestas y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

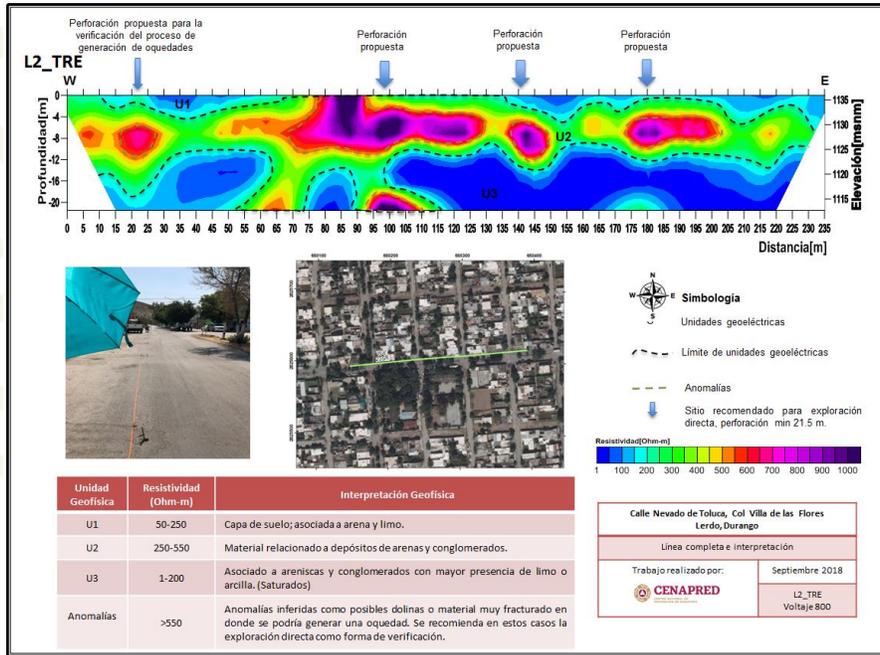


Figura 6 Perfil L2_TRE obtenido en la calle Nevado de Toluca, donde se muestran las diferentes unidades geoelectricas propuestas y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

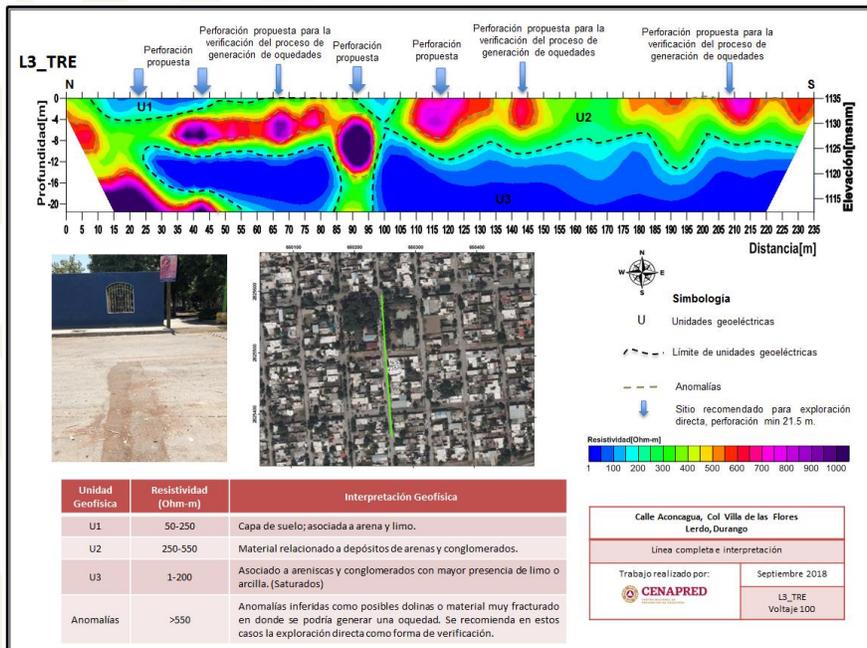


Figura 7 Perfil L3_TRE obtenido en la calle Aconcgagua, donde se muestran las diferentes unidades geoelectricas propuestas y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

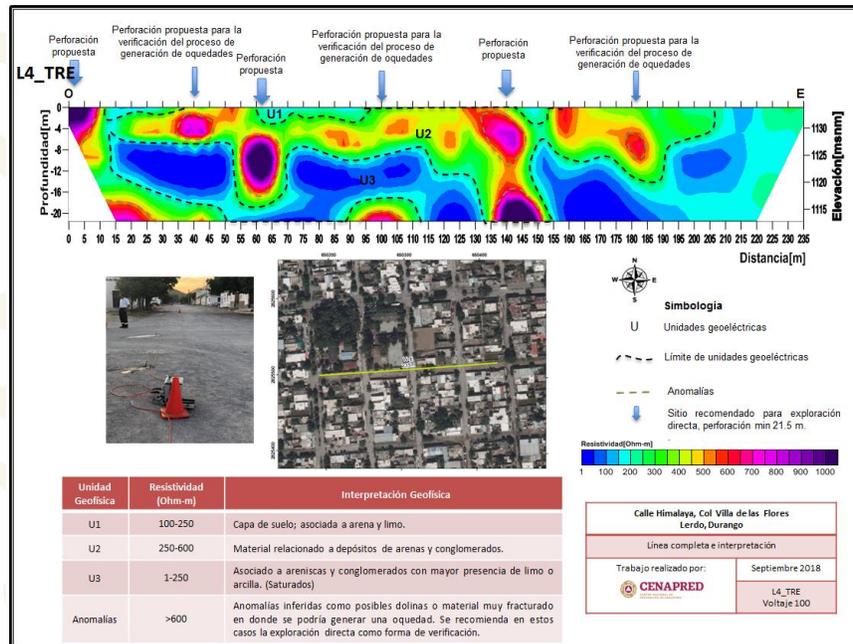


Figura 8 Perfil L4_TRE obtenido encalle Himalaya, donde se muestran las diferentes unidades geoelectricas propuestas y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a las cavidades

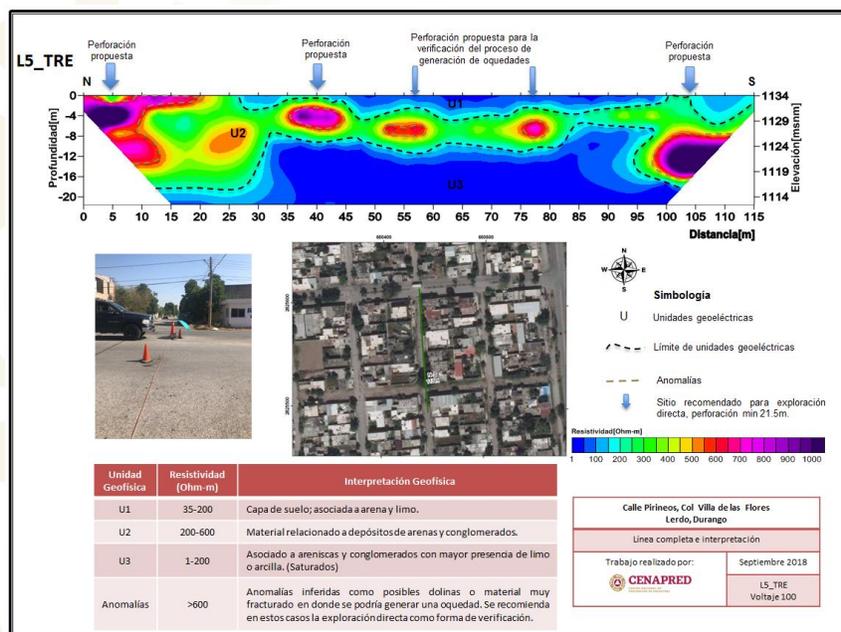


Figura 9 Perfil L5_TRE obtenido en la calle Pirineos, donde se muestran las diferentes unidades geoelectricas propuestas y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

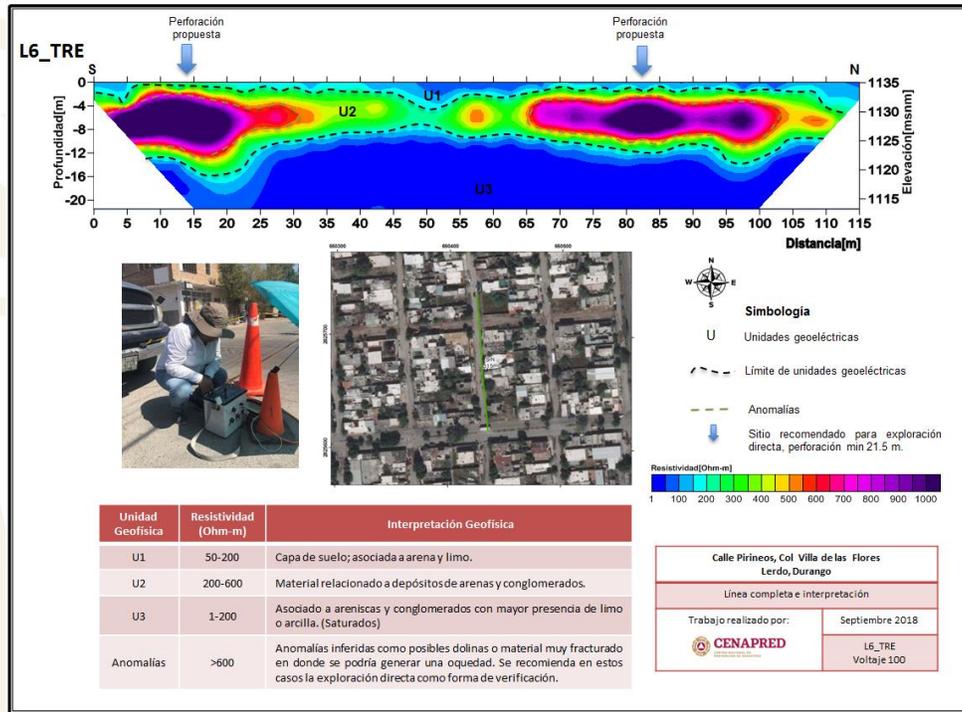


Figura 10 Perfil L6_TRE obtenido en la calle Pirineos, donde se muestran las diferentes unidades geoelectricas propuestas y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

Resultados de la exploración con 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 que son susceptibles de contener cavidades. Las mediciones consistieron en el levantamiento de 16 líneas en la colonia César G. Meraz. Para el levantamiento se utilizó el equipo de radar MALA, con una antena de 250 MHz.

En la figura 11 se muestra el resultado que se obtuvo en la línea L1_GPR. Con líneas verdes punteadas se indica el contacto entre los materiales, las hipérbolas en rojo corresponden a las anomalías presentes en esa línea. Una anomalía se refiere a una propiedad física de la tierra, que en un volumen definido, difiere apreciablemente con respecto a su valor común o normal correspondiente a esa región o tipo de roca o suelo.

Los resultados de las líneas restantes se incluyen en el Anexo 1, al final de este documento.

De acuerdo con la distribución de la velocidad y permitividad, se observan dos unidades principales en la interpretación geofísica. En la tabla 3 se describe las correspondientes unidades, así como el material con el que se asocian las mismas.

Tabla 3 Interpretación general con base en la técnica de georradar

Unidad geofísica	Interpretación geofísica
U1	Suelo arcilloso, limo y material de relleno.
U2	Material relacionado con depósitos de arenas, gravas (permeables) poco compactos que, al estar en contacto con fluidos en época de lluvias, se saturan, mientras que en temporada de seca se contraen, lo que ocasiona los asentamientos diferenciales del suelo. De acuerdo a la geología local hay presencia de calizas, las cuales pueden presentar cavernas de disolución por erosión química y mecánica, esto debilita el subsuelo y ocasiona el hundimiento o socavones en las zonas de material no consolidado.

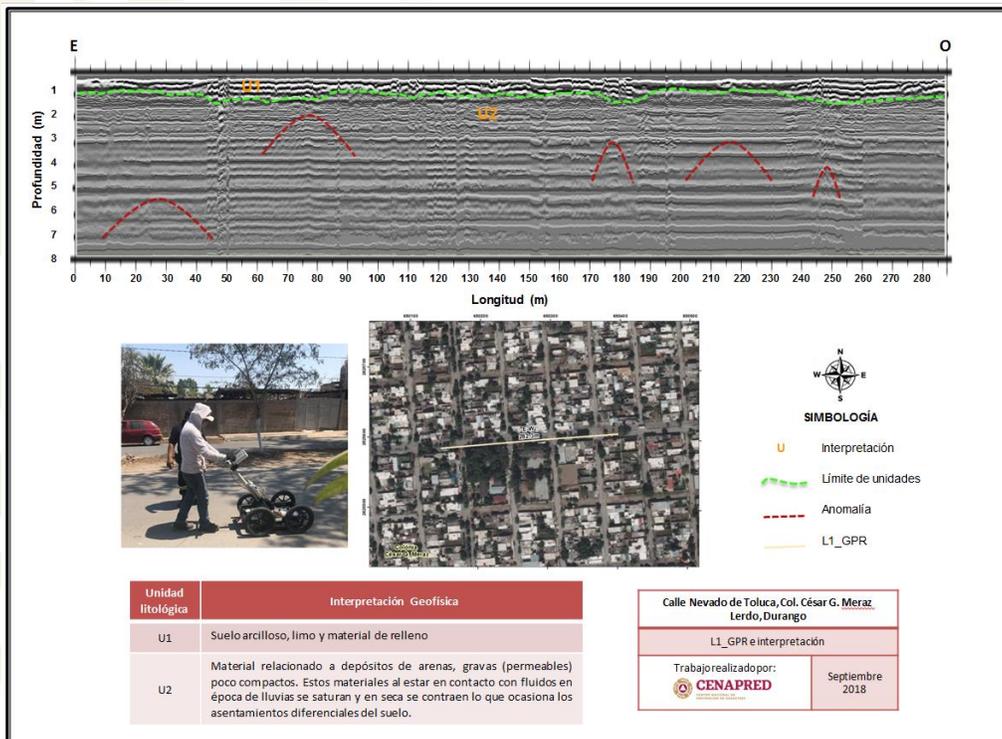


Figura 11 Radargrama obtenido en la L1_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Nevado de Toluca

Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica vs Georradar de Penetración Terrestre

Para simplificar la información de los resultados obtenidos de los estudios de georradar (GPR) y de tomografía de resistividad eléctrica (TRE), se manejaron líneas desde la 1 hasta la 4, tal como se muestra en la tabla 4, considerando que en estas líneas se realizaron las técnicas de GPR y TRE.

Tabla 4 Relación de líneas de GPR y TRE

Línea	Georradar	Tomografía de Resistividad Eléctrica
Línea 1	L1_GPR	L1_TRE
Línea 2	L2_GPR	L3_TRE
Línea 3	L4_GPR	L4_TRE
Línea 4	L6_GPR	L5_TRE y L6_TRE

Línea 1

En el perfil de tomografía eléctrica L1_TRE se presenta una anomalía muy marcada en la parte oeste, donde pudiera existir una cavidad, en color morado. Así mismo, bajo la anomalía se observa una zona de saturación (unidad U3) a lo largo de toda la línea L1_TRE; la evidencia que se observa superficialmente indica la posible presencia de erosión interna y causa de la subsidencia diferencial. En la línea L1_GPR se observa una tendencia no homogénea debido a cambios en los materiales, por posibles rellenos.

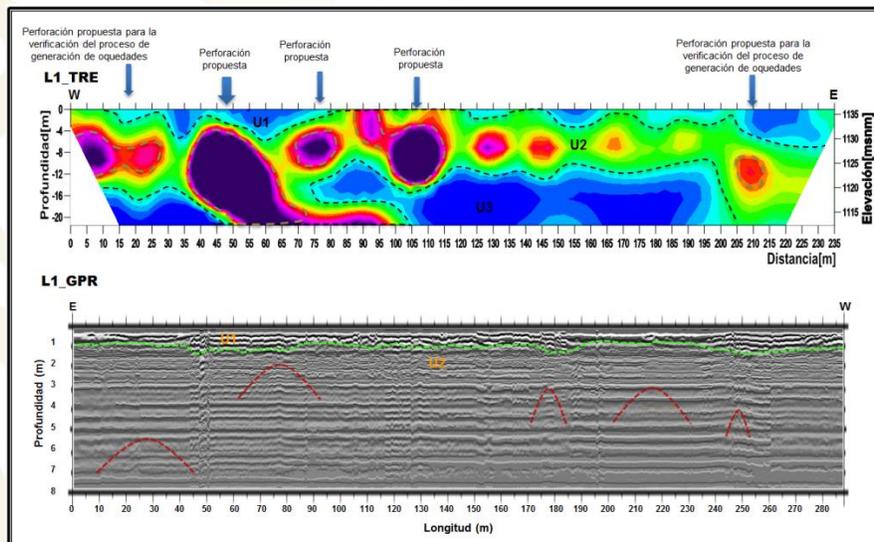


Figura 12 Línea 1 (L1_TRE y L1_GPR)

Línea 2

En el perfil de tomografía eléctrica L3_TRE, existen anomalías a partir del metro 33, a una profundidad de 5 m; éstas podrían indicar la formación de oquedades que se van haciendo más someras de norte a sur. En esta línea se observa una zona de saturación, como la unidad U3, a lo largo de toda la línea L3_TRE. La evidencia superficial indica la presencia de erosión interna, posible causa de la subsidencia diferencial. En la línea L2_GPR se presenta una tendencia no homogénea, además de ciertas anomalías que concuerdan con aquéllas de L3_TRE, en el metro 90 de los dos perfiles.

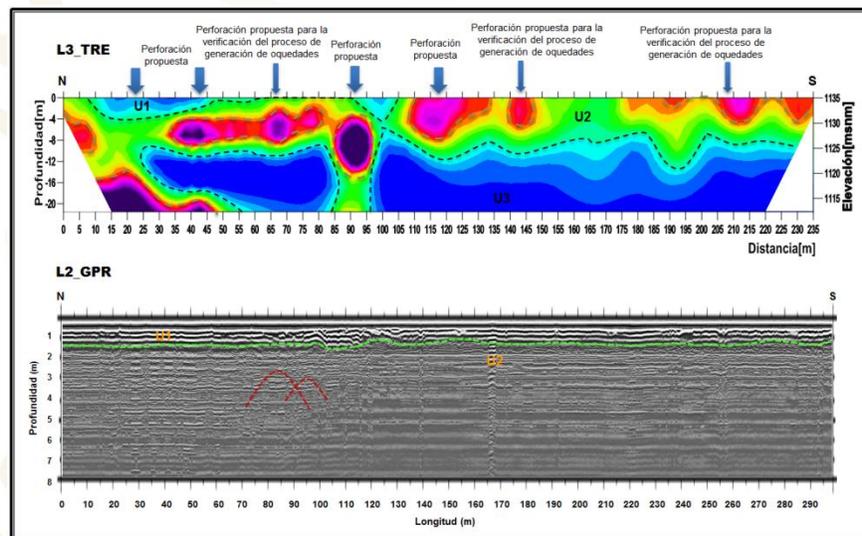


Figura 13 Línea 4 (L3_TRE y L2_GPR)

Línea 3

En la línea L4_TRE se tiene una distribución heterogénea en las resistividades, aunque aún se distinguen algunas anomalías muy bien marcadas. En L4_GPR no se observa alguna anomalía, lo cual se puede deber a alguna deficiencia en la calidad de los datos adquiridos.

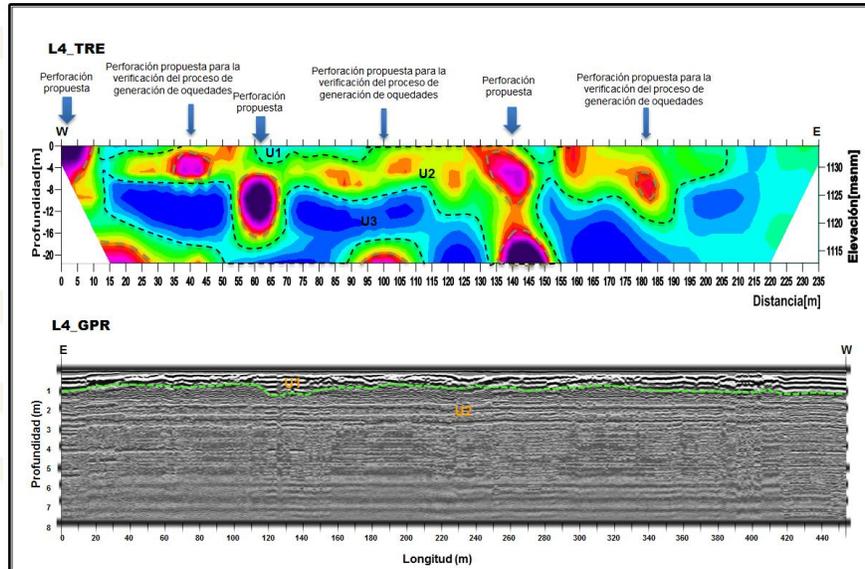


Figura 14 Línea 6 (L4_TRE y L4_GPR)

Línea 4

En el perfil de tomografía eléctrica L5_TRE y L6_TRE existe una anomalía muy clara en los primeros 18 m de profundidad, indicando la posible formación de cavidades (color morado). Así mismo, bajo la anomalía se tiene una zona de saturación, como la unidad U3, que se presenta a lo largo de las dos líneas. La evidencia superficial indica erosión interna que puede ocasionar subsidencia diferencial. En la línea L6_GPR se presentan algunas anomalías que se pueden correlacionar con las líneas de tomografía de resistividad eléctrica.

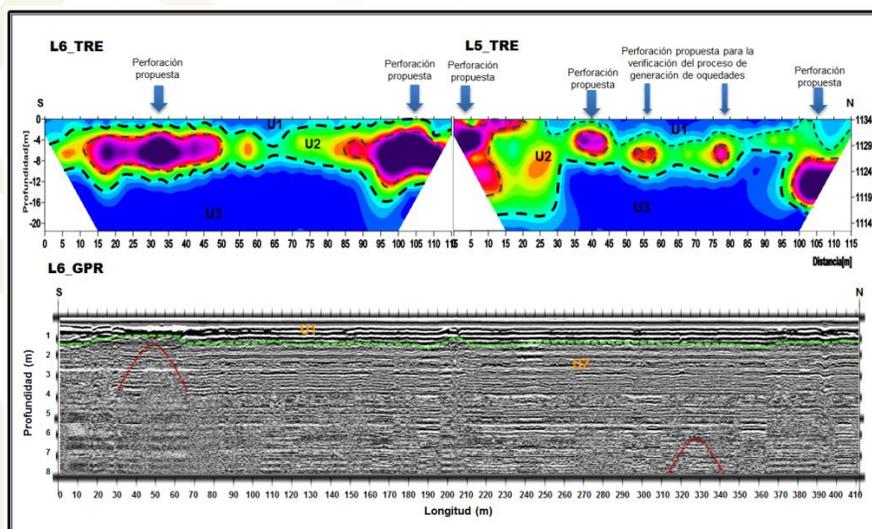


Figura 15 Línea 4 (L6_TRE-L5_TRE y L6_GPR)



Los resultados e interpretación de estas dos técnicas están en función del tipo de materiales que componen el subsuelo de la zona de estudio. En cuanto a la tomografía, los resultados influyen respecto al grado de saturación de los materiales, el cual puede variar en función del nivel freático en que se encuentre la zona de estudio y la temporada de lluvia. De igual manera, en la técnica de georradar, los resultados están influenciados principalmente por la existencia de un medio de alta conductividad eléctrica; por ejemplo, cuando hay alto contenido de humedad o saturación de agua en los materiales que componen el suelo, la propagación de la señal en profundidad es débil, ya que se atenúa rápidamente y proporciona incertidumbre a mayor profundidad.

Para comprobar o verificar la presencia de cavidades con base en los resultados de las investigaciones realizadas con georradar, mostrados en la figura 11 y en el Anexo 1, las variaciones en el semiespacio anómalo, tanto de resistividad como de velocidad y permitividad, se recomienda hacer perforaciones, considerando los resultados del método TRE, hasta llegar a la profundidad de la base de la anomalía, en los lugares señalados en los perfiles (ver figuras 5 a 10); esto considerando rebasar el tope o la zona en donde inician las anomalías.

Conclusiones y Recomendaciones

La fisiografía de la zona de estudio es prácticamente plana, con evidencia de rasgos kárstico (dolinas o cavidades), cuya presencia constituye un peligro, ya que pueden migrar hacia la superficie y provocar fracturamiento y hundimientos súbitos que afecten la infraestructura local y, sobre todo, a los habitantes de las colonias de la zona.

Cuando los materiales y/o cavidades se reacomodan o reblandecen por infiltración de agua, éstas pueden colapsar, generando graves daños en las construcciones debido a asentamientos diferenciales; en casos extremos una o varias viviendas pueden hundirse completamente a consecuencia de la falta del techo de la cavidad. Por tal motivo, se llevó a cabo una campaña de exploración geofísica con las técnicas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Georradar de Penetración Terrestre (GPR), dada su rápida aplicación.

Se debe tomar en cuenta que los métodos geofísicos aplicados en este estudio constituyen una primera etapa de análisis, al ser métodos indirectos y no proporcionan una evidencia física de las anomalías del subsuelo. Por lo tanto, la segunda etapa debe consistir en la exploración directa con estudios geotécnicos (perforaciones) en los sitios indicados como anómalos y, como tercera etapa se debe proceder a la remediación de las cavidades localizadas. En el Anexo 3 se describe la forma en la que se puede llevar a cabo la remediación de las cavidades.



De acuerdo con los resultados de los estudios geofísicos realizados, y los antecedentes de hundimientos y colapsos por cavidades en los suelos aluviales y fluviales de la zona metropolitana de La Laguna, se pudo determinar que existen anomalías geológicas que pueden estar asociadas a la formación de nuevas zonas de hundimiento, lo cual deberá ser confirmado con sondeos directos (perforación) en los sitios donde se identificaron dichas anomalías.

Con base en las interpretaciones de todas las líneas de adquisición de datos, el mayor riesgo se ubica en las Líneas 1 (tabla 3 y figura 12) y L2_TRE (tabla 1 y figura 6), que se encuentra en la calle Nevado de Toluca, además de la Línea 2 (tabla 3 y figura 13) que se ubica sobre la calle de Aconcagua, por lo que se considera muy necesario verificar de manera directa con perforación, para reconocer la forma, extensión y geometría de las posibles cavidades. Para lo anterior se deberá emplear una perforadora direccional, evitando estar sobre la cavidad durante la operación del equipo, con la finalidad de evitar algún posible colapso, como consecuencia de un régimen de vibraciones prolongadas.

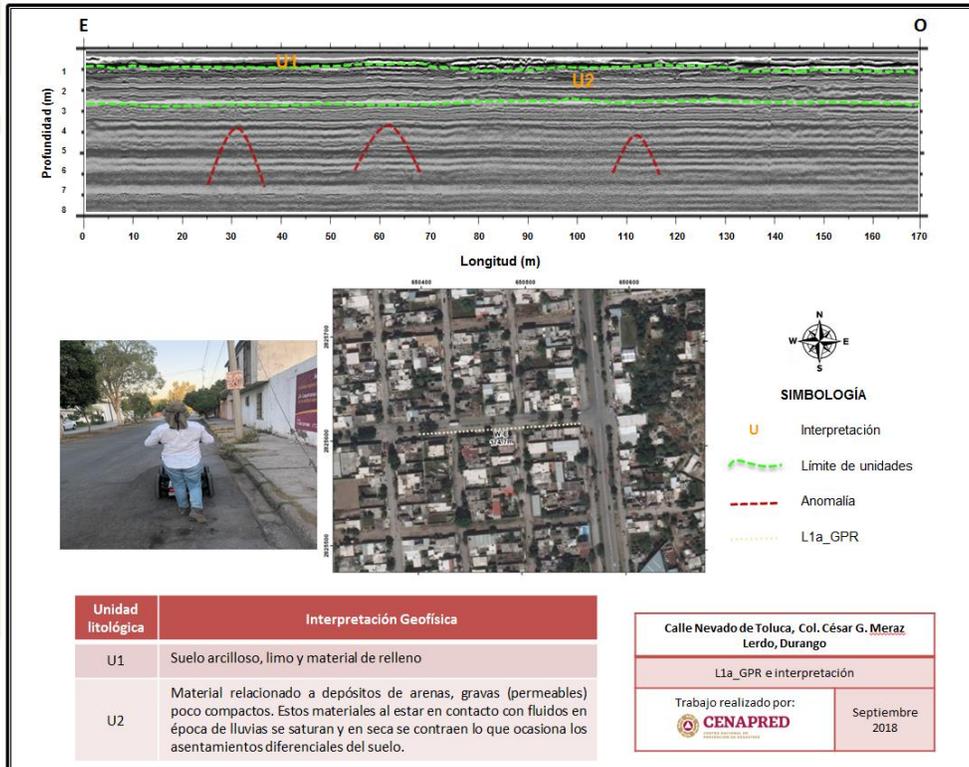
Además, se recomienda realizar perforaciones adicionales, mediante un Ensayo de Penetración Estándar (SPT por sus siglas en inglés) para conocer la porosidad, transmitividad, nivel freático y/o superficie piezométrica y gradiente hidráulico del acuífero libre.

Una vez que se tenga la verificación directa, se deberá tomar la decisión en cuenta a la posible remediación de la cavidad sobre la que se tengan construcciones o la reubicación de sus habitantes. Lo anterior implica analizar la aplicación de algún método de pilotaje y/o relleno. En este sentido, se recomienda la asesoría de un geotecnista que supervise las perforaciones y plantee un plan de continuidad de los sondeos a realizar.

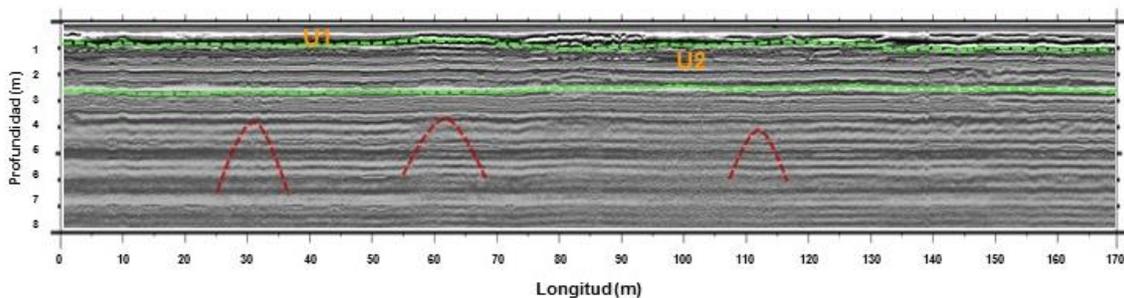
También se recomienda una verificación directa en el caso de la Línea 3 (tabla 3 y figura 14), que se encuentra sobre la calle Himalaya, por efecto de subsidencia y posible colapso, así como la Línea 4 (tabla 3 y figura 15) sobre la calle Pirineos, por el mismo efecto.

Anexo 1

En el radargrama de la línea L1a_GPR se observan ciertas anomalías que pudieran estar relacionadas con oquedades en formación, ya que a nivel superficial se presenta agrietamiento en el asfalto y ligeras irregularidades en la calle.



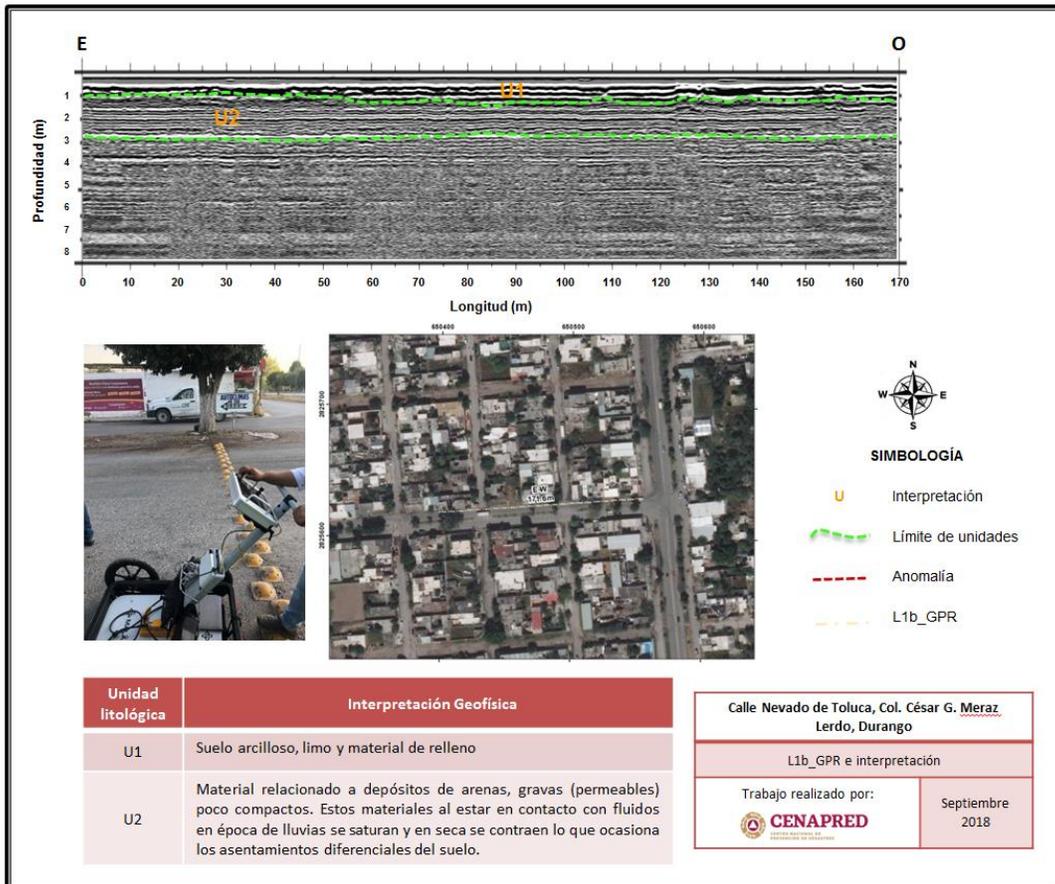
L1a_GPR



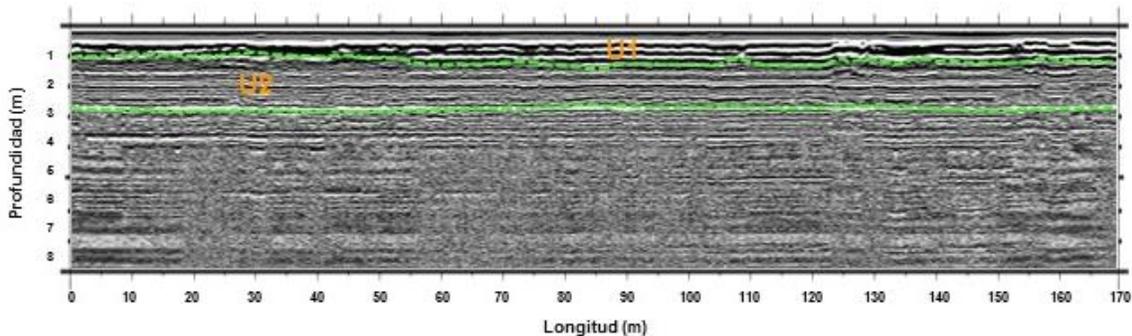
Radargrama obtenido en la L1a_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Nevado de Toluca de la colonia César G. Meraz



Entre las cotas 123 y 130 del radargrama de la línea L1b_GPR, se observa que en el pasado hubo trabajos de relleno por posibles hundimientos del suelo.



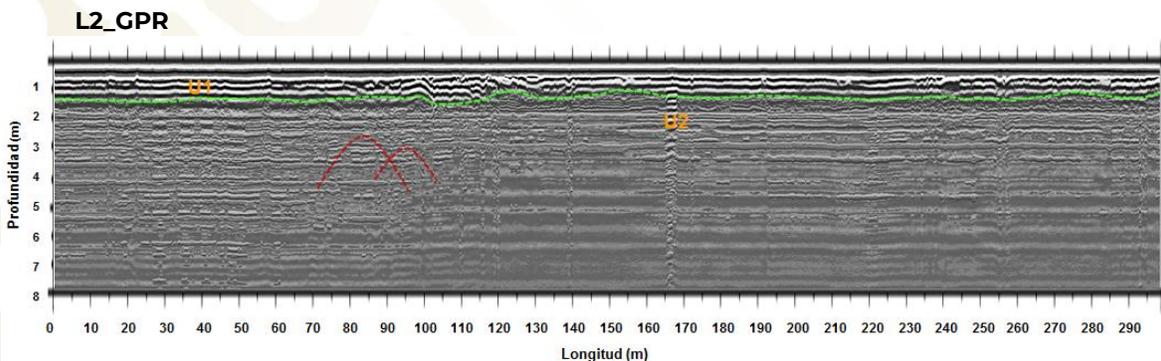
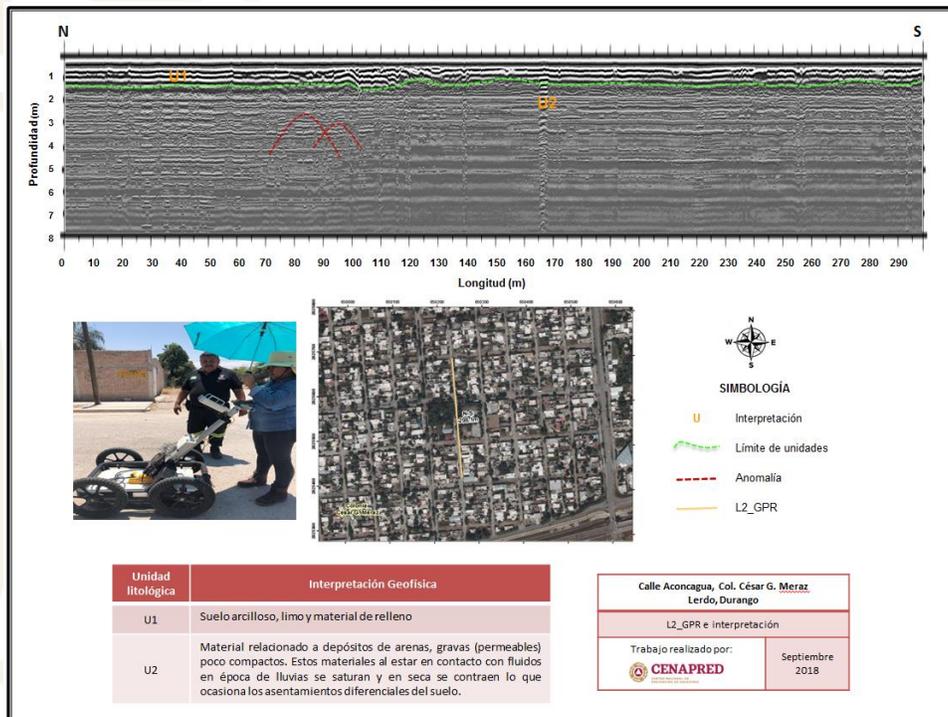
L1b_GPR



Radargrama obtenido en la L1b_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Nevado de Toluca de la colonia César G. Meraz



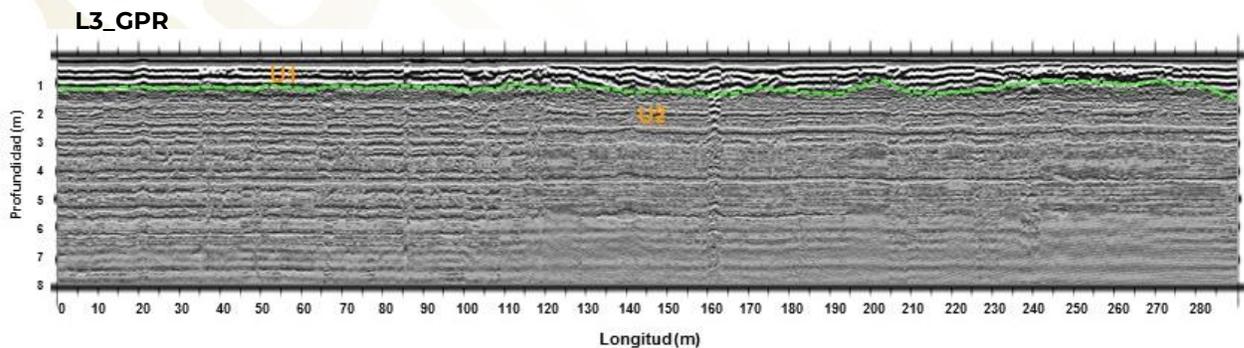
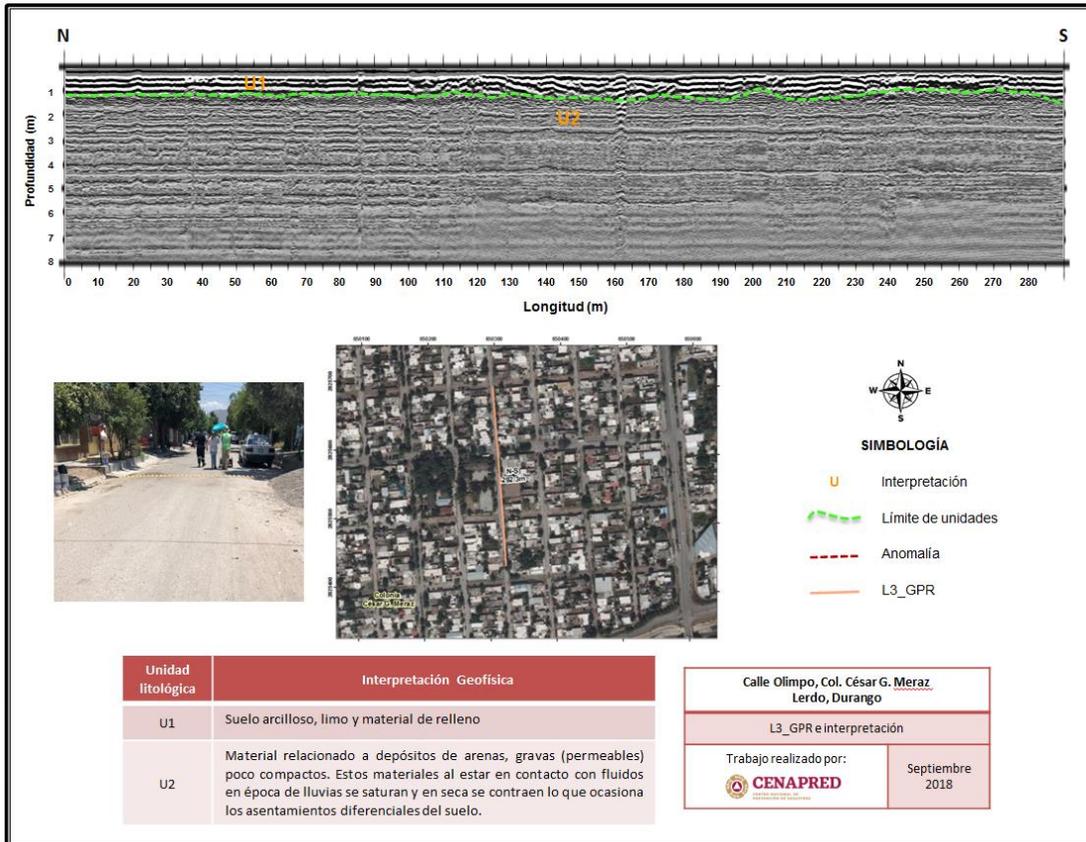
En el radargrama de la línea L2_GPR se observan entre las cotas 70 a 110 ciertas anomalías que pudieran estar relacionadas con la formación de oquedades ya que a nivel superficial se presenta irregularidades en la calle, tales como hundimiento diferencial.



Radargrama obtenido en la L2_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Aconagua, colonia César G. Meraz



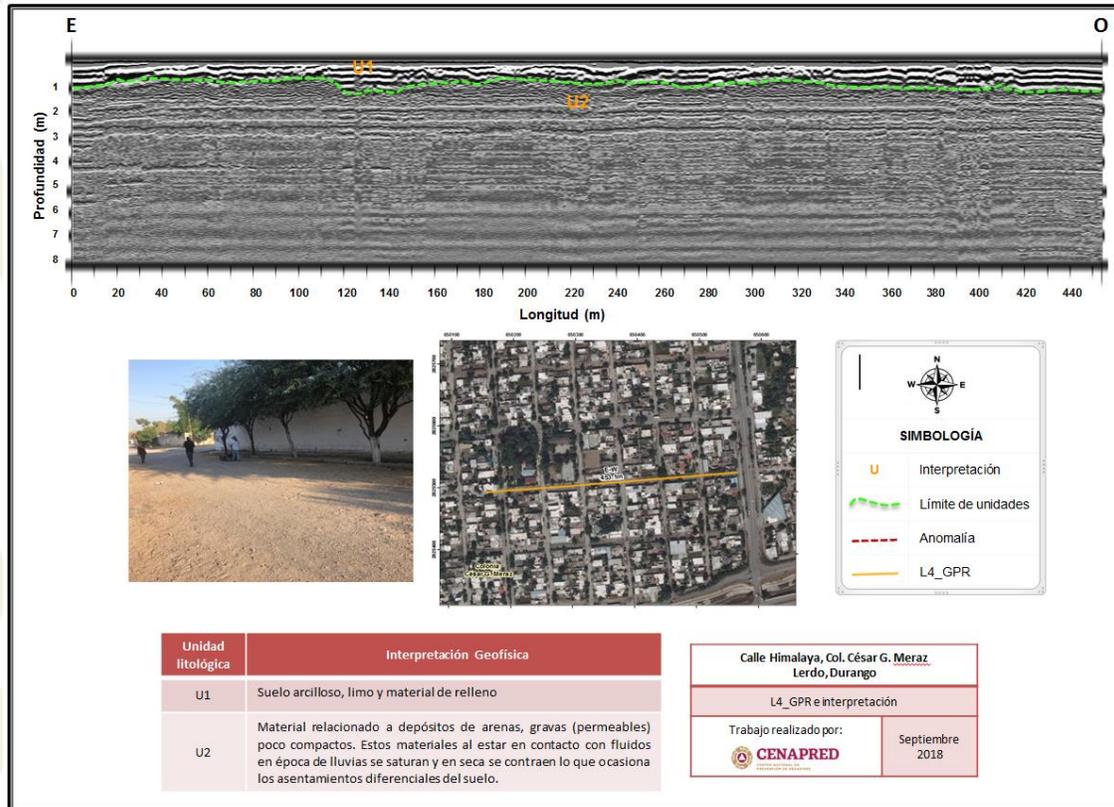
En el radargrama de la línea L3_GPR, se observa en el primer metro de profundidad el material está poco consolidado, desde los 110 m hasta 260 m, lo cual podría estar asociado a un asentamiento irregular en esa zona.



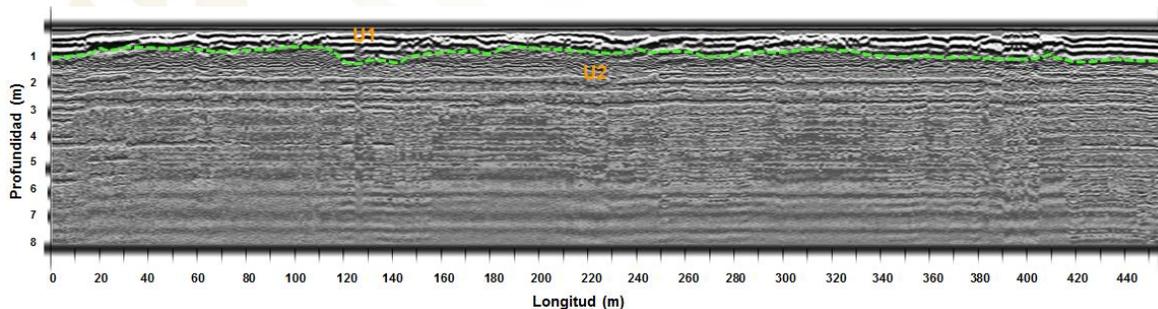
Radargrama obtenido en la L3_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Olimpo de la colonia César G. Meraz



En el radargrama de la línea L4_GPR, se observa en el primer metro de profundidad el material está poco consolidado, y que en superficie se ve reflejado con la irregularidad del suelo en esa zona.



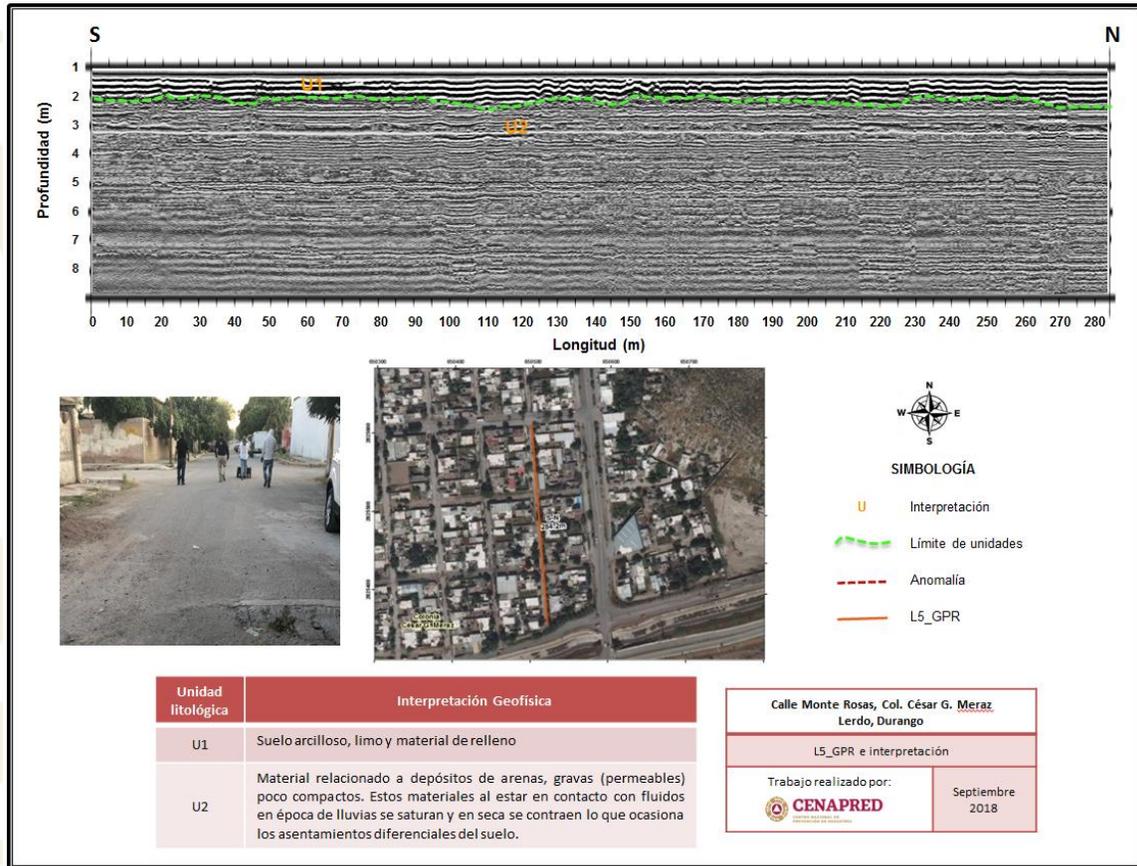
L4_GPR



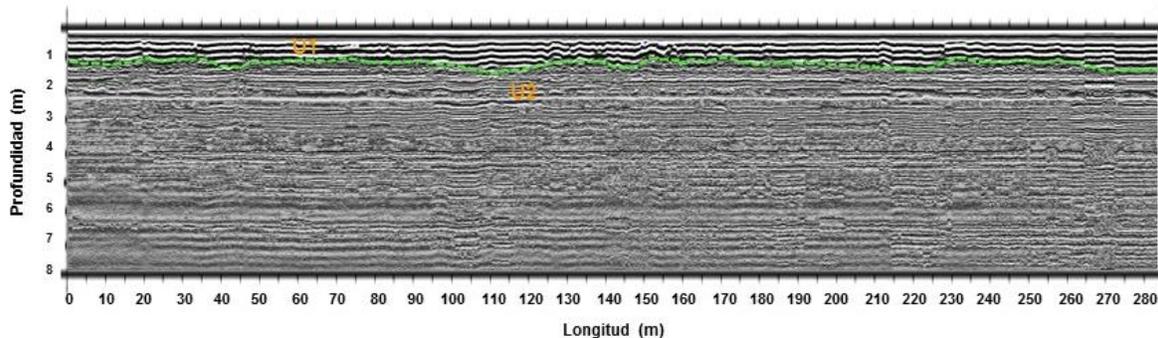
Radargrama obtenido en la L4_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Himalaya de la colonia César G. Meraz



La interpretación de la línea L5_GPR corresponde a materiales de relleno poco consolidados entre 1 y 1.5m, en los que se pueden producir asentamientos irregulares, como en el metro 125 del perfil.



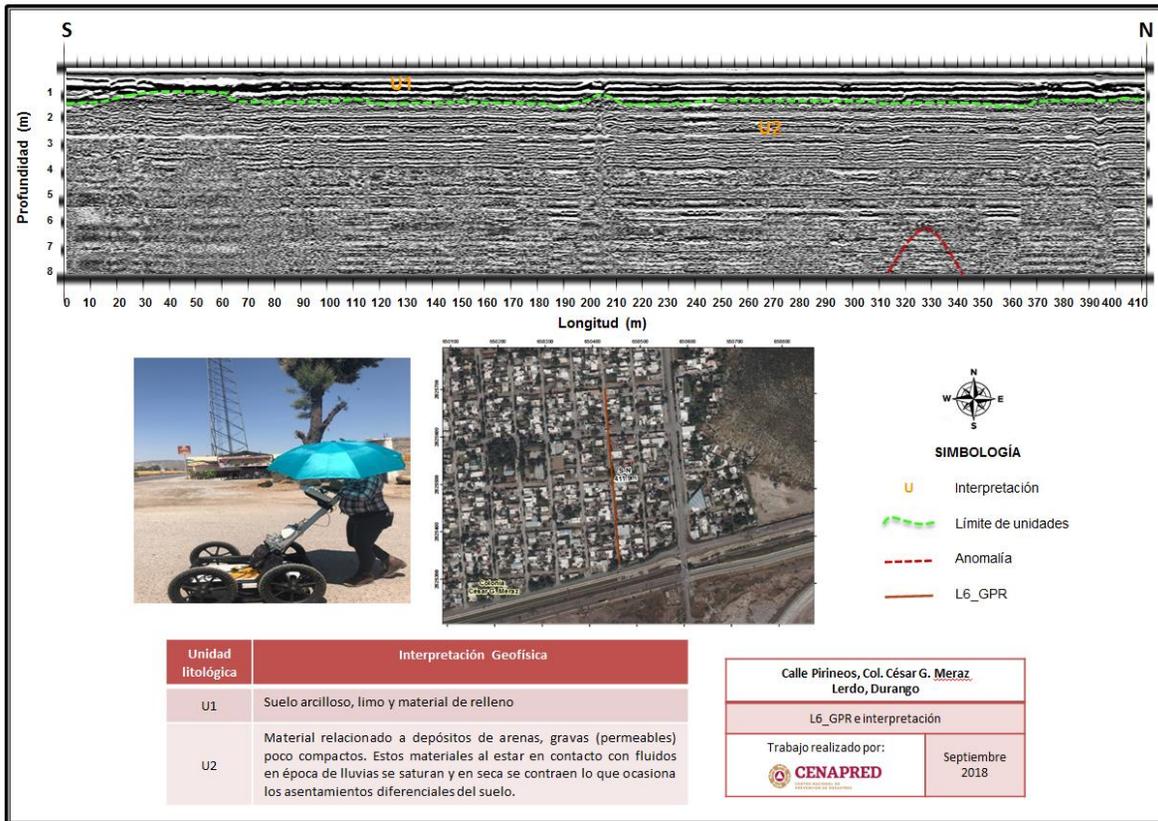
L5_GPR



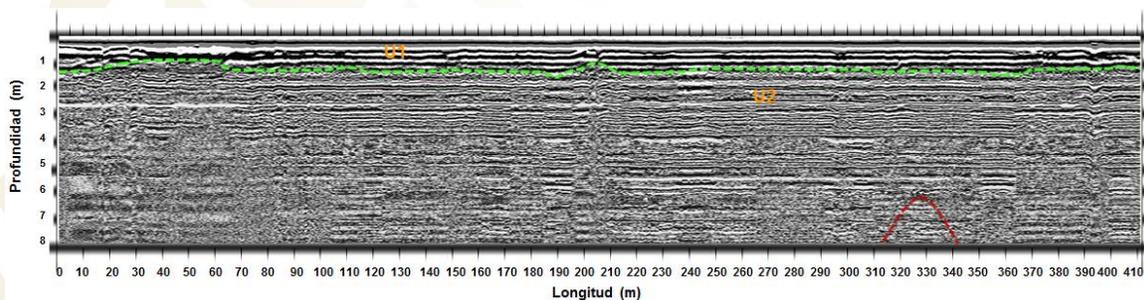
Radargrama obtenido en la L5_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Monte Rosas de la colonia César G. Meraz



En el radargrama de la línea L6_GPR, se observa una anomalía en el metro de distancia de 310 m a una profundidad de 6 m.



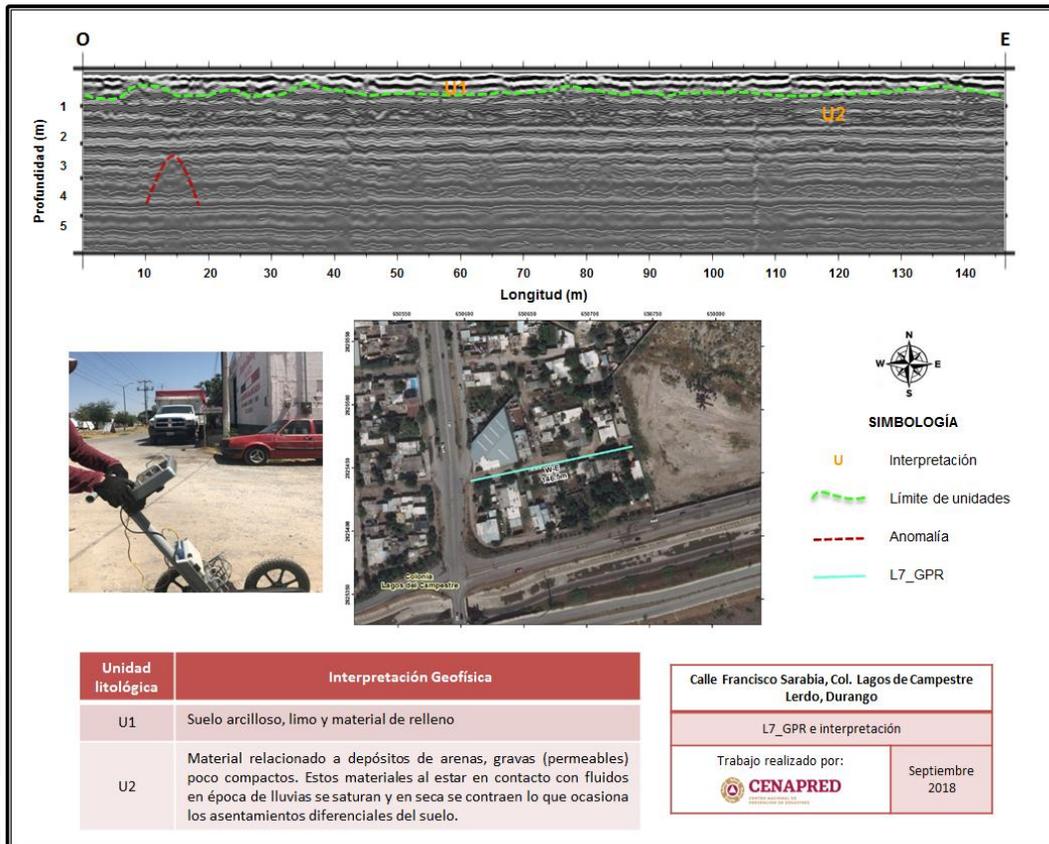
L6_GPR



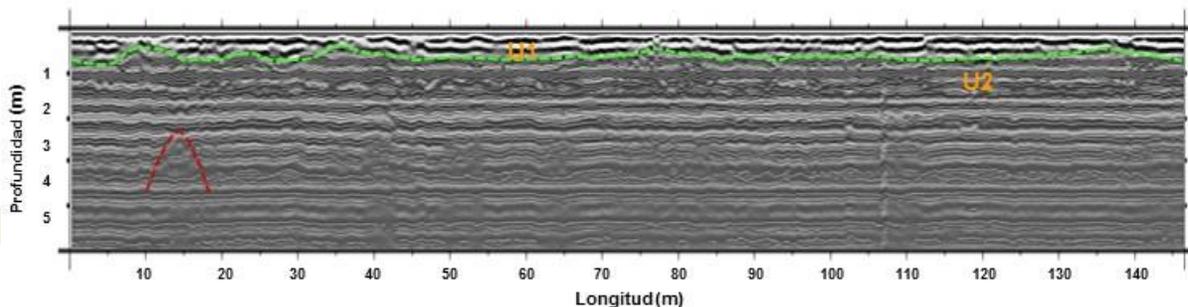
Radargrama obtenido en la L6_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Pirineos de la colonia César G. Meraz



En el radargrama de la línea L7_GPR, se observa una anomalía en el metro de distancia de 15 m, además de que superficialmente se identifica irregularidad en casi toda la calle.

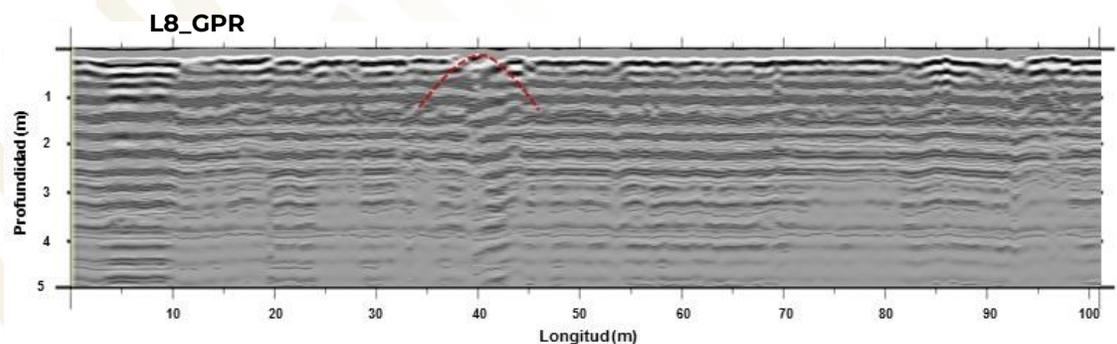
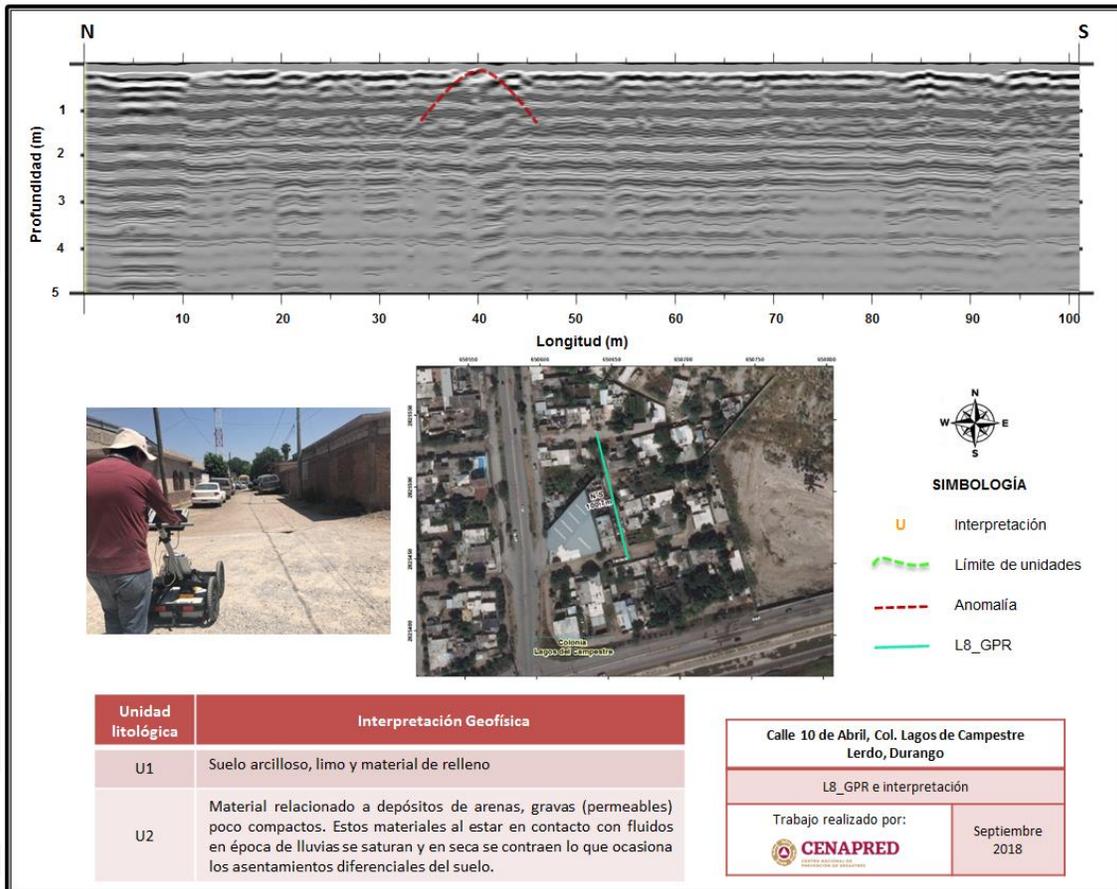


L7_GPR



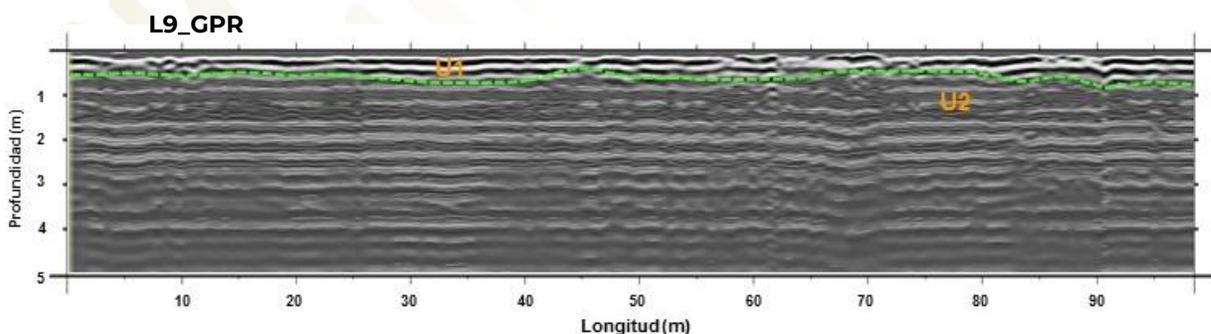
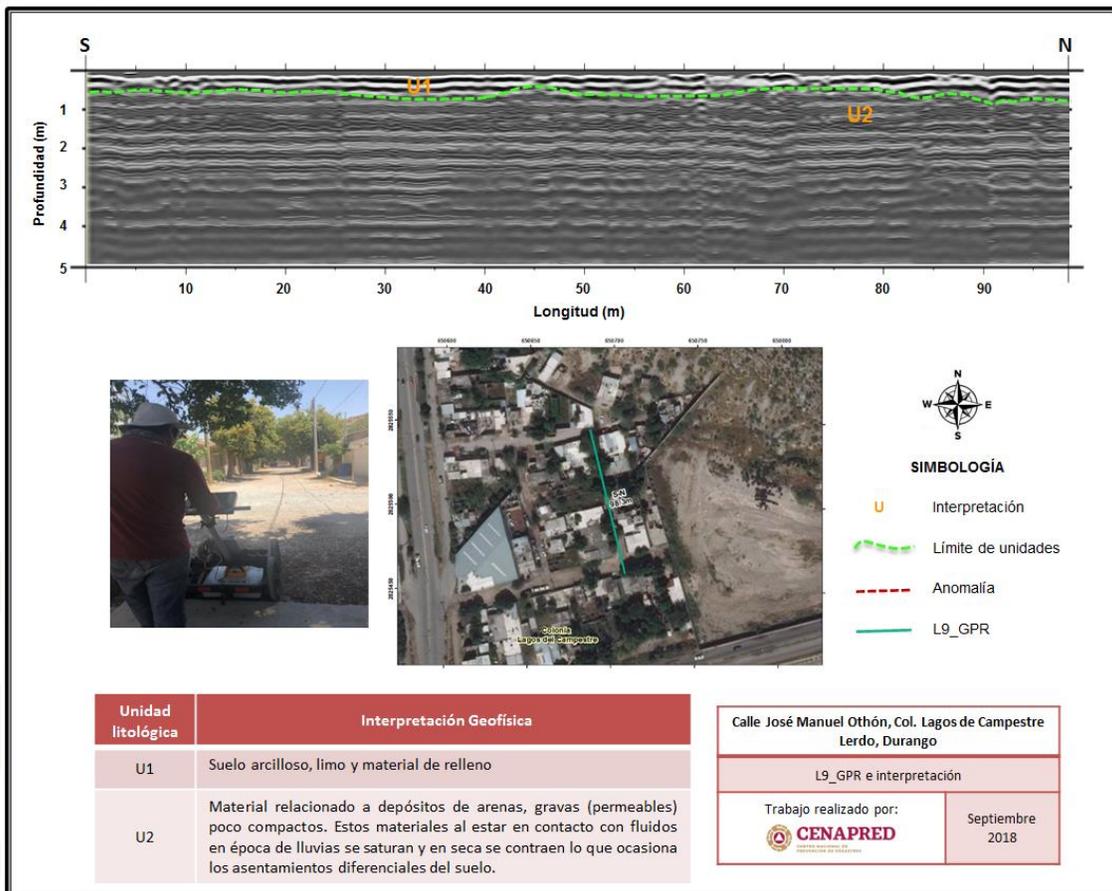
Radargrama obtenido en la L7_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Francisco Sarabia de la colonia Lagos de Campestre

En la línea L8_GPR, se identifica material poco consolidado. Aproximadamente en el metro 39 del perfil se observa un hundimiento en el terreno, también es visible superficialmente.



Radargrama obtenido en la L8_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle 10 de Abril de la colonia Lagos de Campestre

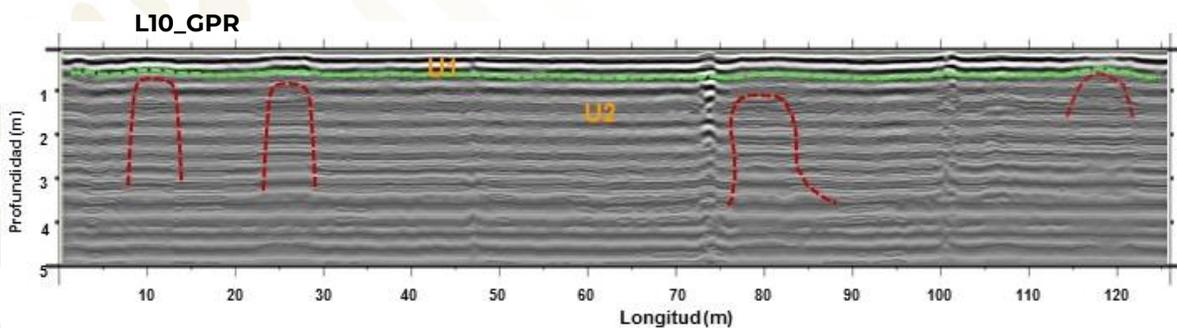
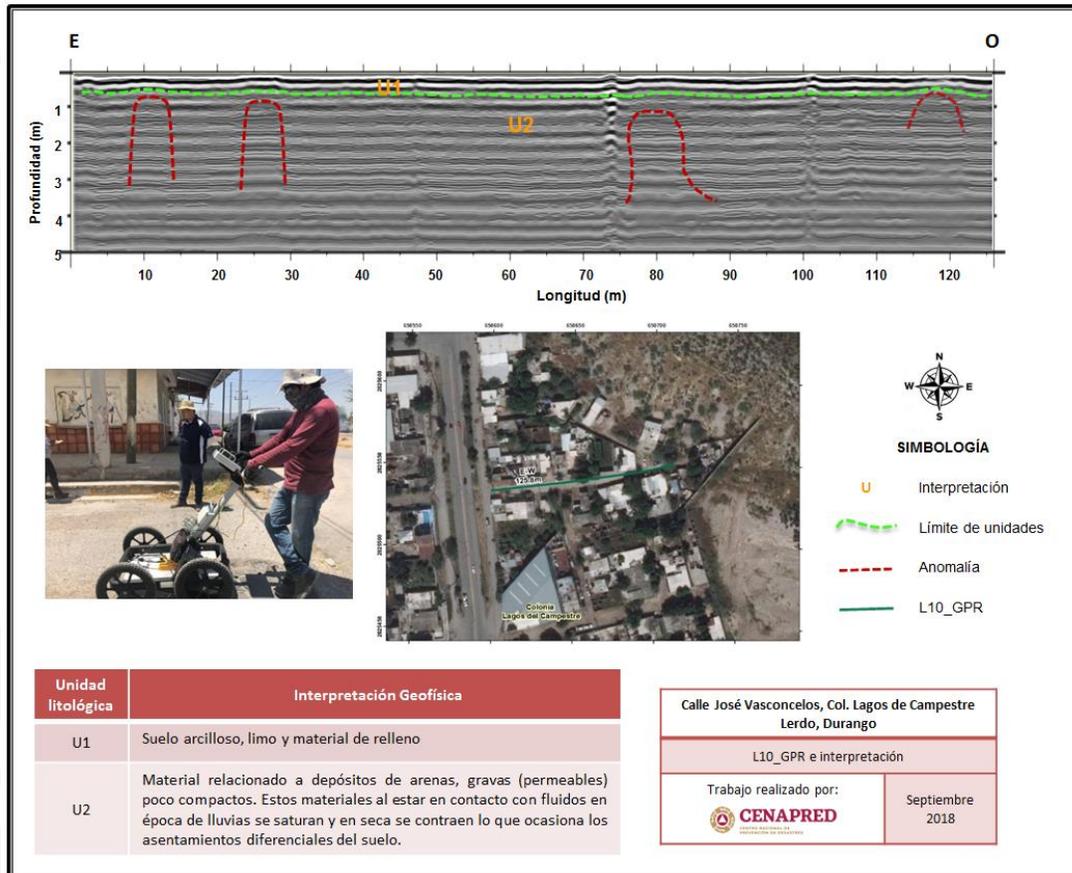
En la línea L9_GPR, se observa materiales poco consolidado, aproximadamente desde el metro 45 del perfil superficialmente se observa hundimientos diferenciales del terreno, que están provocando daños en las edificaciones cercanas.



Radargrama obtenido en la L9_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle José Manuel Othón de la colonia Lagos de Campestre

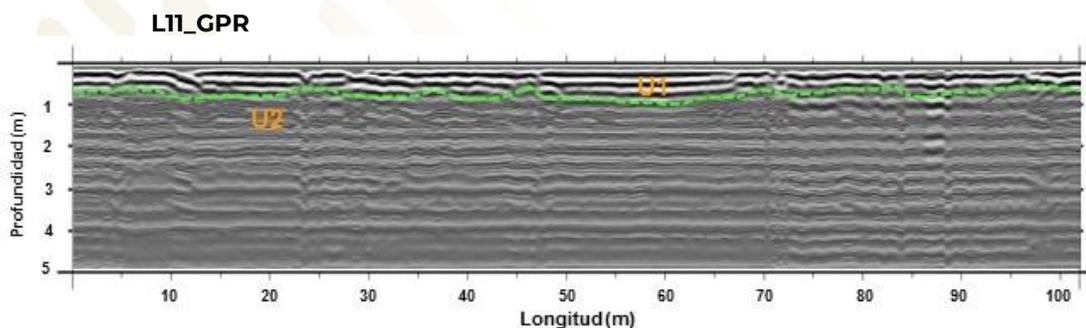
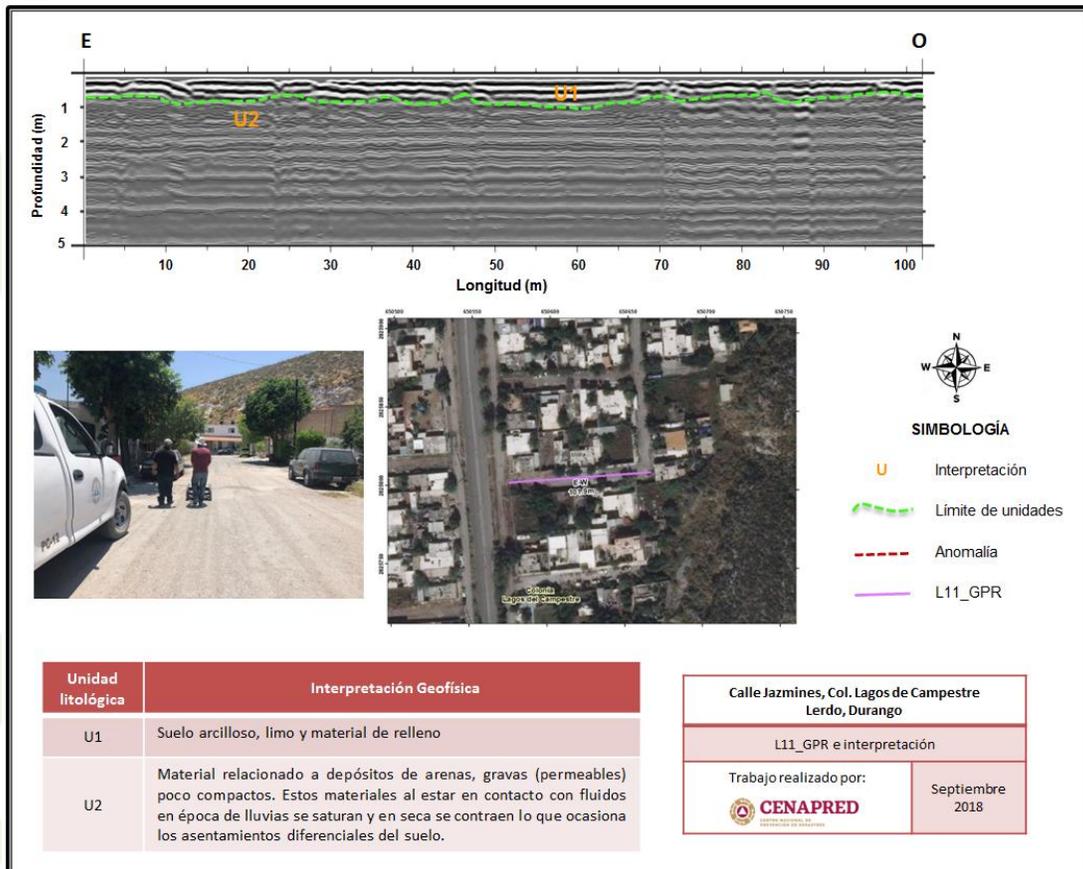


Como se puede observar en la línea L10_GPR, se presentan de anomalías que pudieran indicar que en algún momento esta zona fue rellenada, ya que a nivel de suelo se observan pequeñas variaciones en la topografía.



Radargrama obtenido en la L10_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle José Vasconcelos de la colonia Lagos de Campestre

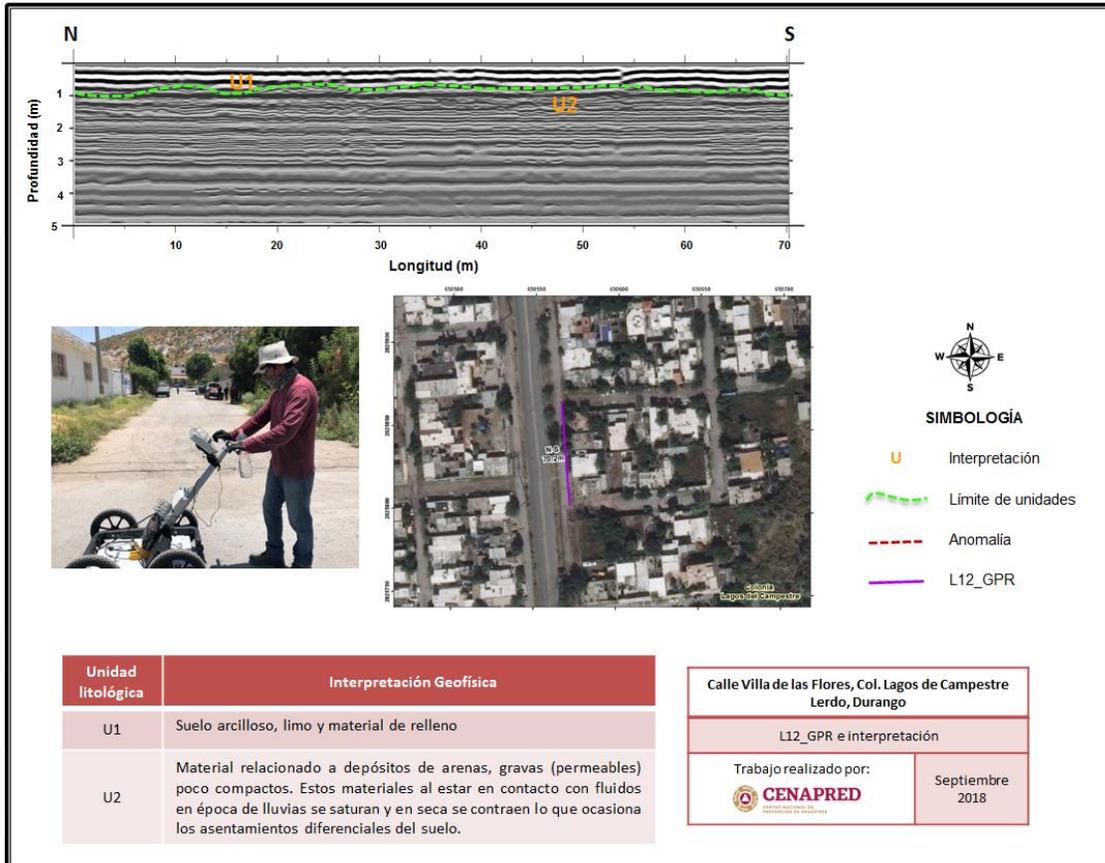
En la línea L11_GPR se observa materiales poco consolidado y discontinuos, por lo que puede indicar la presencia de hundimiento diferencial ya que también se observan algunas construcciones con afectaciones, tales como agrietamientos en sus fachadas.



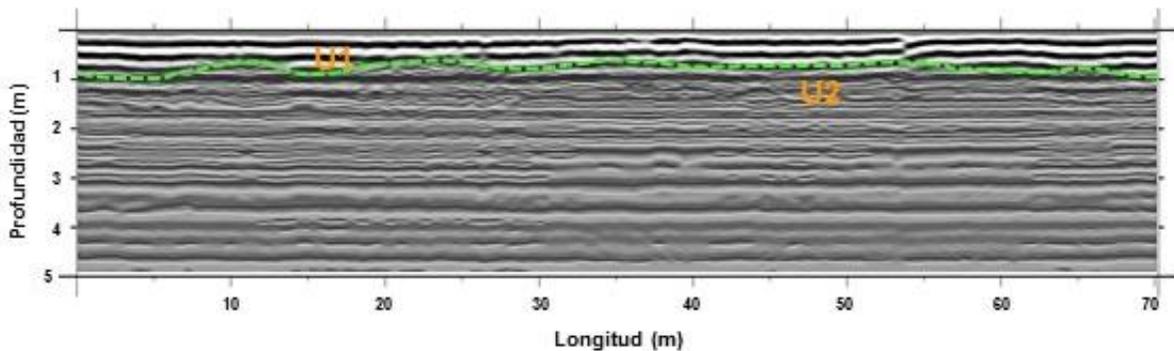
Radargrama obtenido en la L11_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Jazmines de la colonia Lagos de Campestre



En la línea L12_GPR, se observa en el primer metro de profundidad el material esta poco consolidado, en el metro 40 se observa subsidencia.



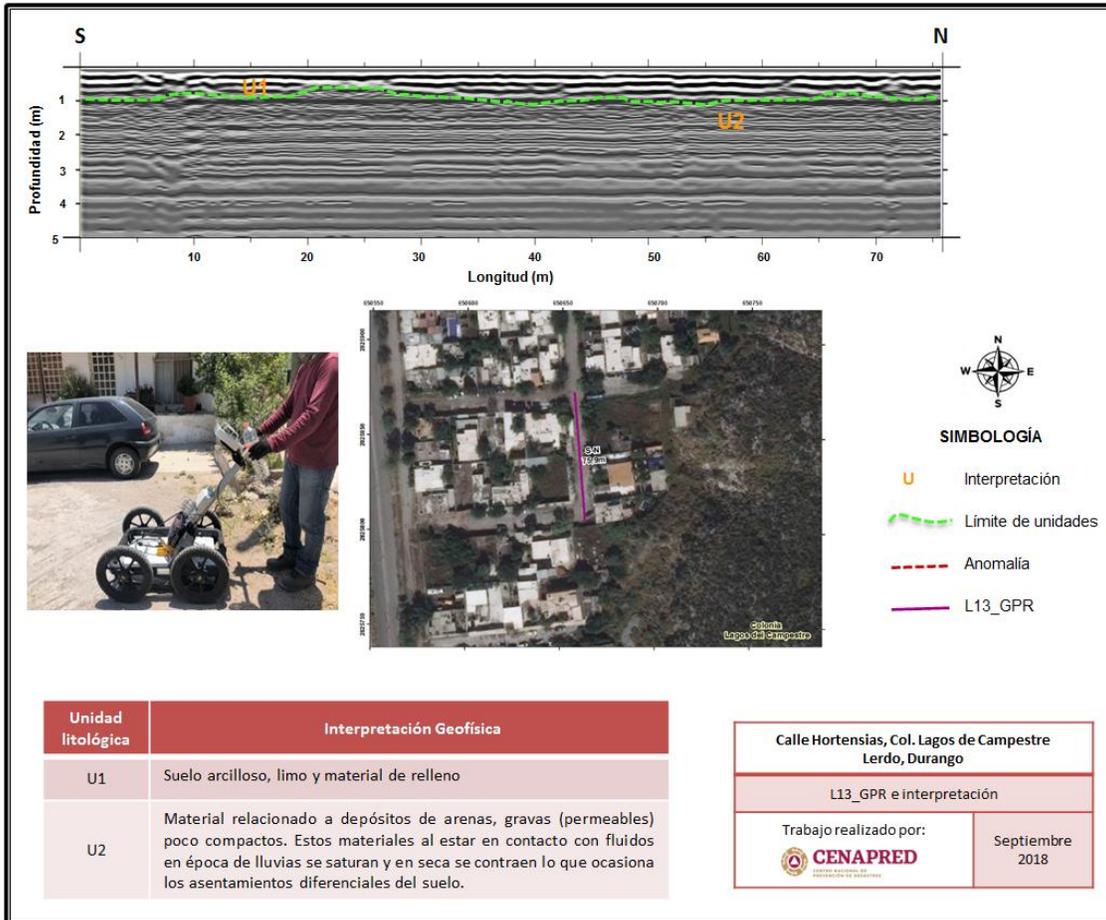
L12_GPR



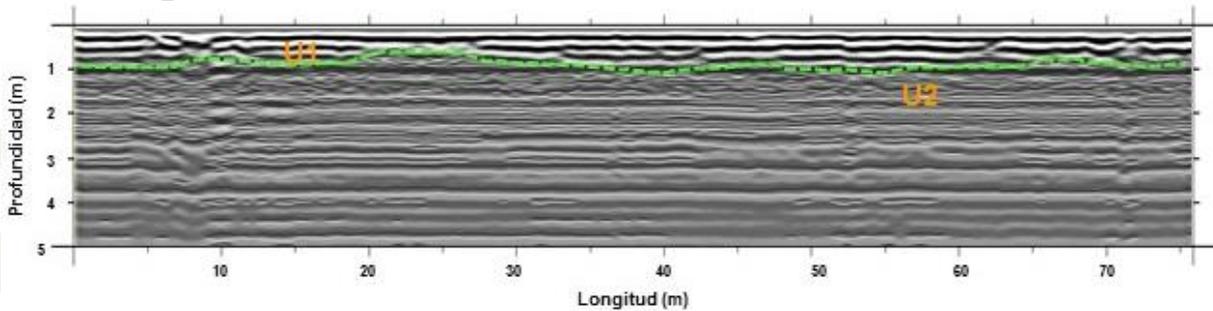
Radargrama obtenido en la L12_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Villa de las Flores de la colonia Lagos de Campestre



La línea L13_GPR, se observa en el primer metro de profundidad el material esta poco consolidado que produce el efecto de subsidencia a lo largo de la línea.

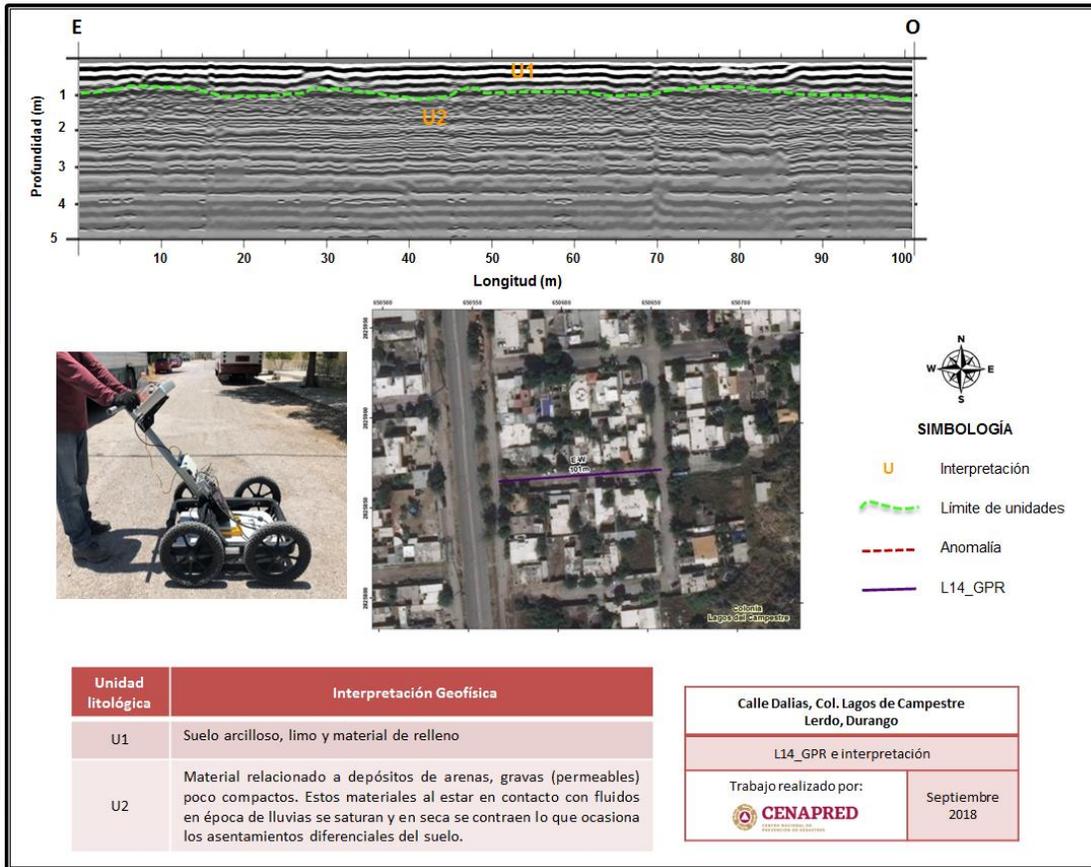


L13_GPR

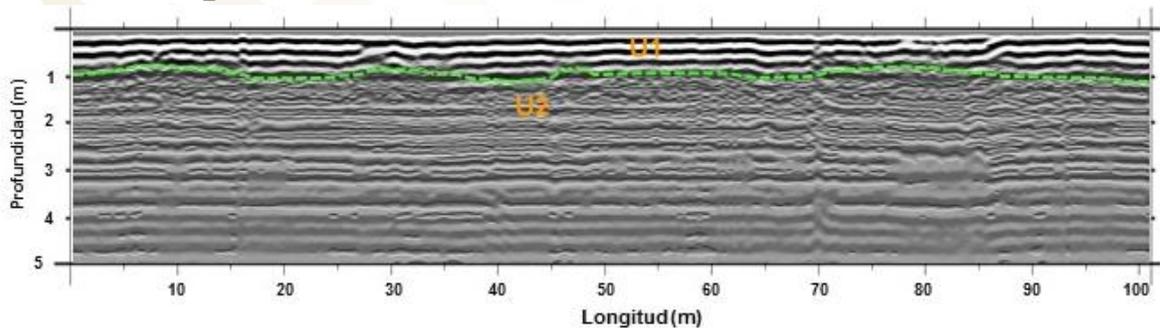


Radargrama obtenido en la L13_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Hortensia de la colonia Lagos de Campestre

La línea L14_GPR, se observa en el primer metro de profundidad el material esta poco consolidado que produce el efecto de subsidencia a lo largo de la línea.



L14_GPR



Radargrama obtenido en la L14_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle Dalias de la colonia Lagos de Campestre



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

TORREÓN, COAHUILA

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán
Ciudad de México, C.P. 04360, Tel. 52+(55) 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>



Contenido

Antecedentes	34
Introducción	34
Objetivo	34
Localización del proyecto	34
Marco geológico e hidrográfico	35
Geología Histórica	35
Geología local	35
Geología estructural	36
Geología estratigrafía	36
Hidrología superficial	37
Trabajo de campo	37
Actividades de campo	37
Resultados del levantamiento geofísico empleando georradar de penetración terrestre y tomografía de resistividad eléctrica	41
Resultados del levantamiento geofísico empleando Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	41
Resultados de la exploración con georradar (GPR)	44
Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica vs Georradar de Penetración Terrestre	46
Conclusiones y recomendaciones	49
Referencias	51
Anexo 2	52
Anexo 3	56



Antecedentes

Ante la eminente amenaza de hundimiento del terreno, agrietamientos, así como deformaciones y el colapso del suelo que han presentado algunas zonas de la Comarca Lagunera entre ellas el municipio de Torreón, Coahuila, personal de Centro Nacional, realizó un estudio con la finalidad de identificar zonas de peligro por posibles colapsos de suelo.

Por ello, y con el propósito de contar con mayor información sobre la posible distribución de dolinas o cavidades en el subsuelo, se realizó una visita a la cabecera municipal en comento, para aplicar dos técnicas geofísicas de exploración, las cuales consistieron en la adquisición de seis líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y ocho líneas con la técnica de Georradar (GPR). Lo anterior, con la finalidad de identificar la forma y distribución de las cavidades generadas por el fenómeno de karsticidad en la zona de estudio, las cuales al colapsar puede afectar a la población y a la infraestructura. De la misma manera, el presente estudio permite la identificación de otros sitios con posibilidad de presentar la misma problemática en el futuro.

INTRODUCCIÓN

Objetivos

Caracterizar la estratigrafía del subsuelo e identificar posibles cavidades hasta una profundidad de exploración de 20 m, mediante métodos geofísicos de exploración:

- Caracterización electro-estratigráfica, con la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), para identificar la posible distribución de cavidades en el subsuelo y obtener un modelo geológico a detalle.
- Determinar las variaciones del subsuelo debido a las cavidades presentes, para identificar zonas proclives a la generación de cavidades.

Estos resultados 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 del proyecto

El municipio de Torreón el cual forma parte de la Comarca Lagunera. Se encuentra ubicado en el extremo suroeste del estado de Coahuila entre las coordenadas geográficas, al norte 25°42', al sur 24°48' de latitud norte; al este 102°57', al oeste 103°31' de longitud oeste a una altura de 1120 metros sobre el



nivel del mar. La extensión territorial del municipio se encuentra separada en dos partes por los municipios de Matamoros y Viesca en el estado de Coahuila y los municipios de Gómez Palacio y Lerdo en el estado de Durango (figura 1).

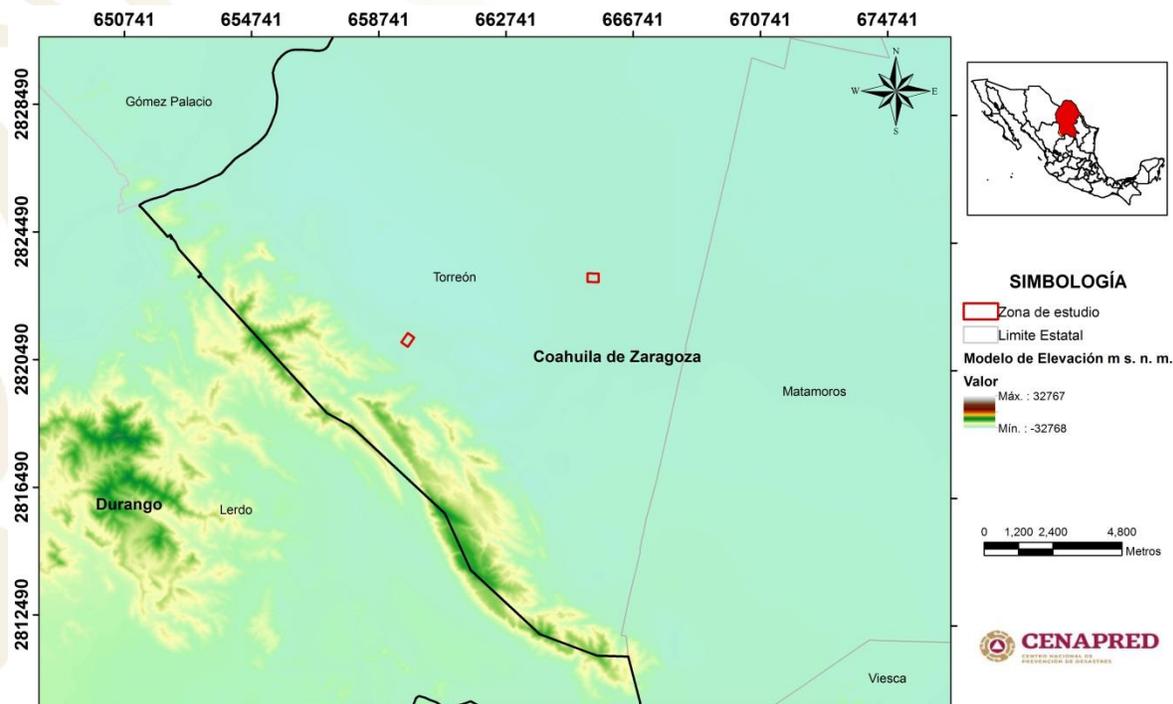


Figura 1 Localización de la zona de estudio (recuadros rojos)

MARCO GEOLOGICO E HIDROGRAFICO

Geología Histórica

La región lagunera se caracteriza por una serie de valles delimitadas por grandes fallas de movimiento vertical, donde el basamento irregular da lugar a la formación de bloques estructurales de fosas y pilares. Los sedimentos depositados en estas valles son depósitos continentales que pueden llegar a tener cientos de metros de espesor.

La formación de fosas y pilares debió ocurrir durante el Terciario tardío, tiempo en el que se llevó a cabo una fase de deformación de tipo distensivo, que trajo como consecuencia una diferencia de elevaciones del basamento que soporta los rellenos aluviales.

Geología

Torreón se localiza en la provincia geológica “Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas”, que se caracteriza por la presencia predominante de rocas sedimentarias plegadas que descansan sobre basamento Paleozoico y



Precámbrico. El rasgo fisiográfico más significativo lo constituye la flexión que sufre la Sierra Madre Oriental a la altura de la ciudad de Monterrey.

Geología estructural

Los rasgos del relieve presentan una orientación preferencial del noreste hacia el sureste (presente en las sierras de El Sarnoso, Las Noas, Jimulco San Lorenzo, con secuencias intercaladas de rocas calcáreas que muestran menos competencia a la deformación. Los valles que se formaron son paralelos a la sierra, formando sinclinales y anticlinales que han desarrollado lomeríos y cuevas de rocas sedimentarias (mármoles) en contacto con franjas de rocas jurásicas y rellenos conglomeráticos que tienden a formar lomeríos y mesetas con lagunas intermedias y, en ocasiones, grandes depresiones con cañones profundos, rellenos con materiales aluviales (figura 2).

Geología estratigráfica

Durante el mesozoico las rocas más antiguas son una secuencia de hechos rojos asociados con volcanismo ácidos que se correlacionan con la formación Nazas del triásico superior. El jurásico está representado por rocas sedimentarias e intrusivas batolíticas. Las rocas sedimentarias están representadas por la formación La Gloria, que infrayace a los extensos depósitos sedimentarios de la formación Mezcalera y de calizas arrecifales de la formación Cupido. Para el aptiano tardío, la mayor parte del área es transgredida por las aguas, originando el amplio depósito de caliza (lutita) de la formación La Peña.

En el albio cenomaniano se producen las condiciones favorables de arrecifes y calizas de plataformas pertenecientes a la formación Aurora. La transgresión de los mares es completa en el cenomaniano tardío y turoniano, formando los depósitos terrígenos de la formación Cuesta del Cura.

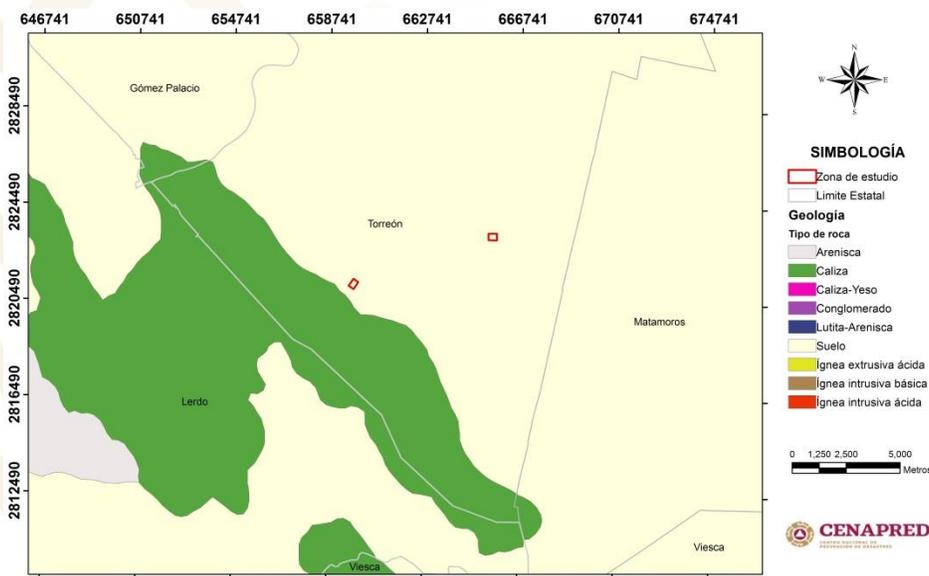


Figura 2 Geología regional del área de estudio



Hidrología Superficial

De la superficie total que abarca la región hidrológica del estado de Coahuila, el 63.2% (59,632 km²) corresponden a la cuenca del Río Nazas. Este río está dentro de cuencas endorreicas, las cuales drenan a las zonas desérticas llamadas “Lagunas de Mayrán” y “Viesca”.

El Río Nazca se origina en las porciones más elevadas de la Sierra Madre Occidental, al poniente de la Ciudad de Durango, llevando una dirección aproximada S-N, cambia su rumbo hacia al oriente pasando por la presa Francisco Zarco y posteriormente se interna en la Ciudad de Torreón, hasta llegar a Ciudad Lerdo en Durango; su traza se interna en la Ciudad de Torreón, para finalizar su recorrido en la antigua Laguna de Mayrán. Cuenta con una longitud de 220 km desde la presa Lázaro Cardenas hasta la Laguna de Mayrán.

TRABAJO 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 (estudios geofísicos), así como la interpretación posterior. Finalmente, se realizó la integración en gabinete de la información, la modelación e interpretación de la información.

Actividades de campo

Las figuras 3 y 4 presentan un mapa con la exploración geofísica realizada, TRE y GPR además de las tablas 1 y 2 con coordenadas y volumen de obra para cada técnica.

Tabla 1 Coordenadas y longitud de las seis líneas de tomografía de resistividad eléctrica

Línea	Inicio		Final		Longitud [m]
	X	Y	X	Y	
L1T_TRE	659704.839	2821156.694	659604.316	2821155.494	115.0
L2T_TRE	659604.316	2821155.494	659702.193	2821378.220	225.0
L3T_TRE	659743.130	2821233.589	659655.980	2821291.261	115.0
L4T_TRE	665611.038	2823222.611	665510.528	2823221.366	115.0
L5T_TRE	665509.156	2823332.131	665511.900	2823110.600	210.0
L6T_TRE	665611.038	2823222.611	665510.528	2823221.366	115.0



Tabla 2 Coordenadas y longitud de las ocho líneas de georradar realizadas con una antena de 250 MHz

Línea	Inicio		Final		Longitud [m]
	longitud	latitud	longitud	latitud	
L1T_GPR	659604.316	2821155.494	659806.685	2821047.132	262.0
L2T_GPR	659604.316	2821155.494	659801.391	2821490.184	386.4
L3T_GPR	659602.994	2821266.257	659805.362	2821157.895	264.9
L4T_GPR	659706.162	2821045.931	659903.236	2821380.623	368.3
L5T_GPR	665711.548	2823223.857	665410.019	2823220.121	382.5
L6T_GPR	665609.665	2823333.376	665611.038	2823222.611	238.4
L7T_GPR	665711.548	2823223.857	665410.019	2823220.121	380.7
L8T_GPR	665507.784	2823442.896	665511.900	2823110.600	293.2

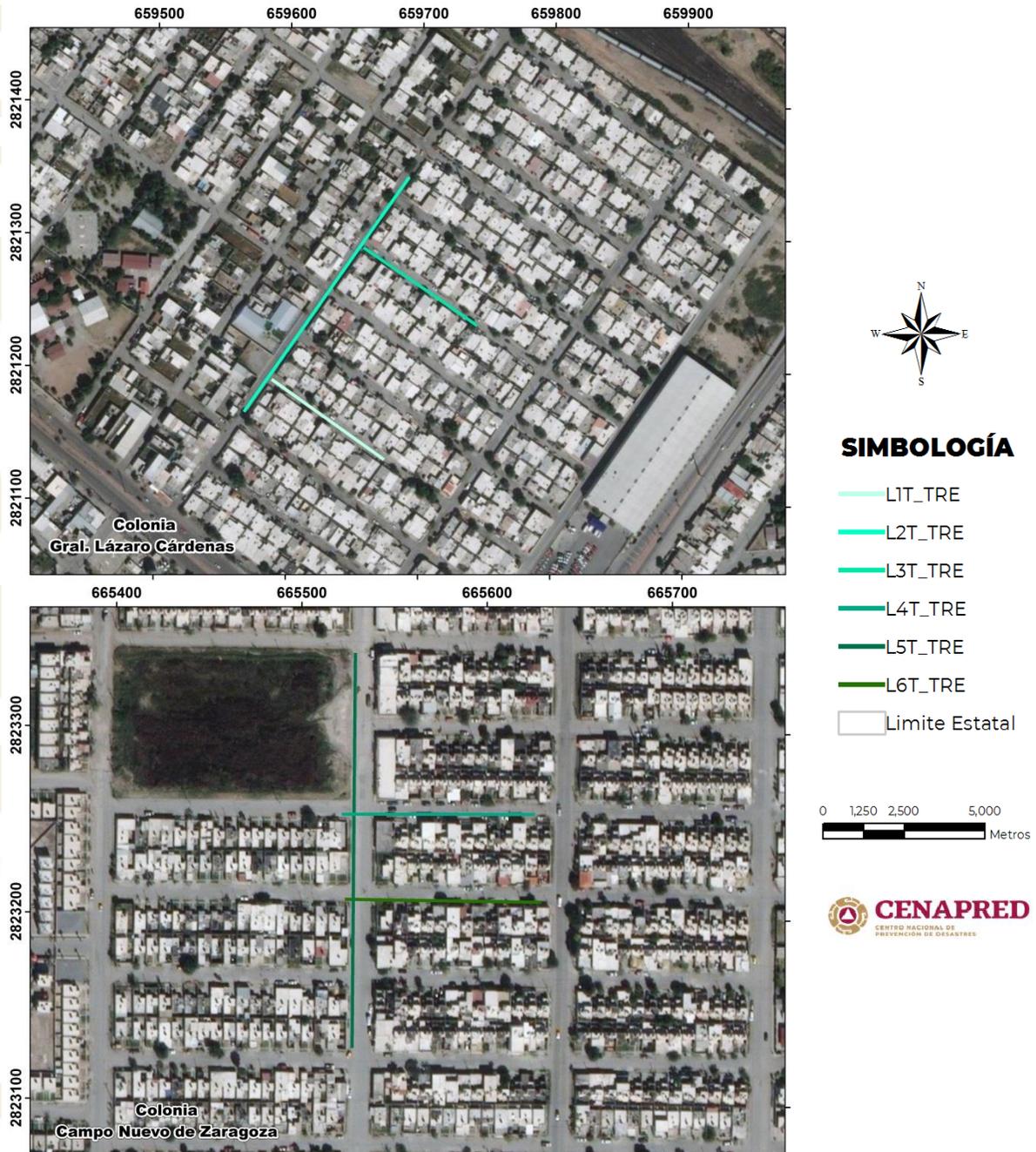
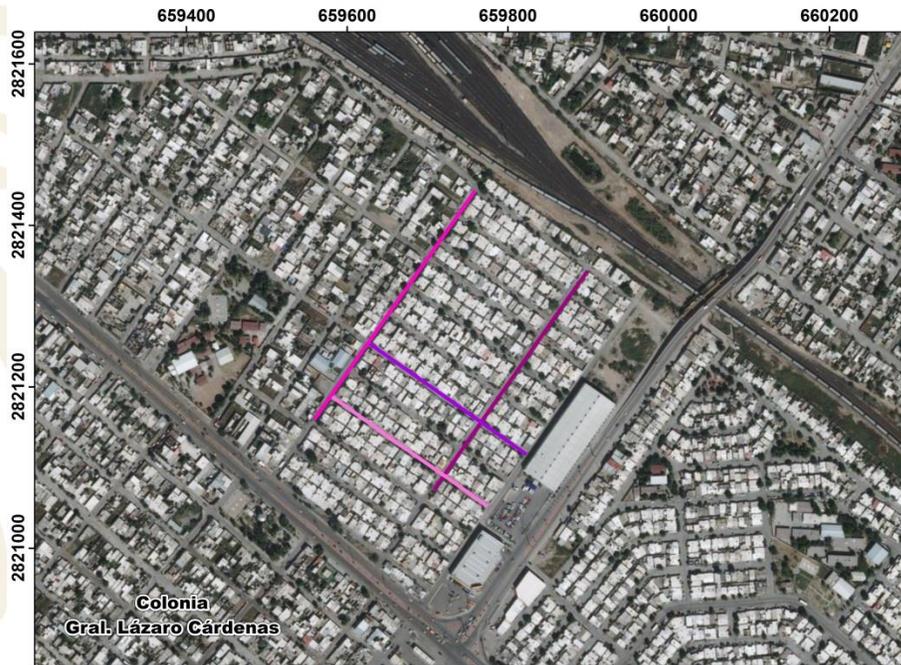


Figura 3 Área de exploración geofísica con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) en las colonias Gral. Lázaro Cárdenas y Campo Nuevo de Zaragoza, Torreón, Coah.



SIMBOLOGÍA

- L1T_GPR
- L2T_GPR
- L3T_GPR
- L4T_GPR
- L5T_GPR
- L6T_GPR
- L7T_GPR
- L8T_GPR
- Limite Estatal



Figura 4 Área de exploración geofísica con Georradar de Penetración Terrestre (GPR) en las colonias Gral. Lázaro Cárdenas y Campo Nuevo de Zaragoza, Torreón, Coah.

RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO GEOFÍSICO EMPLEANDO TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y GEORRADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE

Resultados del levantamiento geofísico empleando tomografía de resistividad eléctrica

Se aplicó el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), para caracterizar la distribución de resistividad de los materiales que conforman el subsuelo e identificar las zonas susceptibles a la formación de cavidades. Para la adquisición se utilizó un resistímetro marca Syscal Pro de 48 canales. Los resultados de las seis líneas obtenidos en las colonias Gral. Lázaro Cárdenas y Campo Nuevo de Zaragoza se muestran en las figuras siguientes.

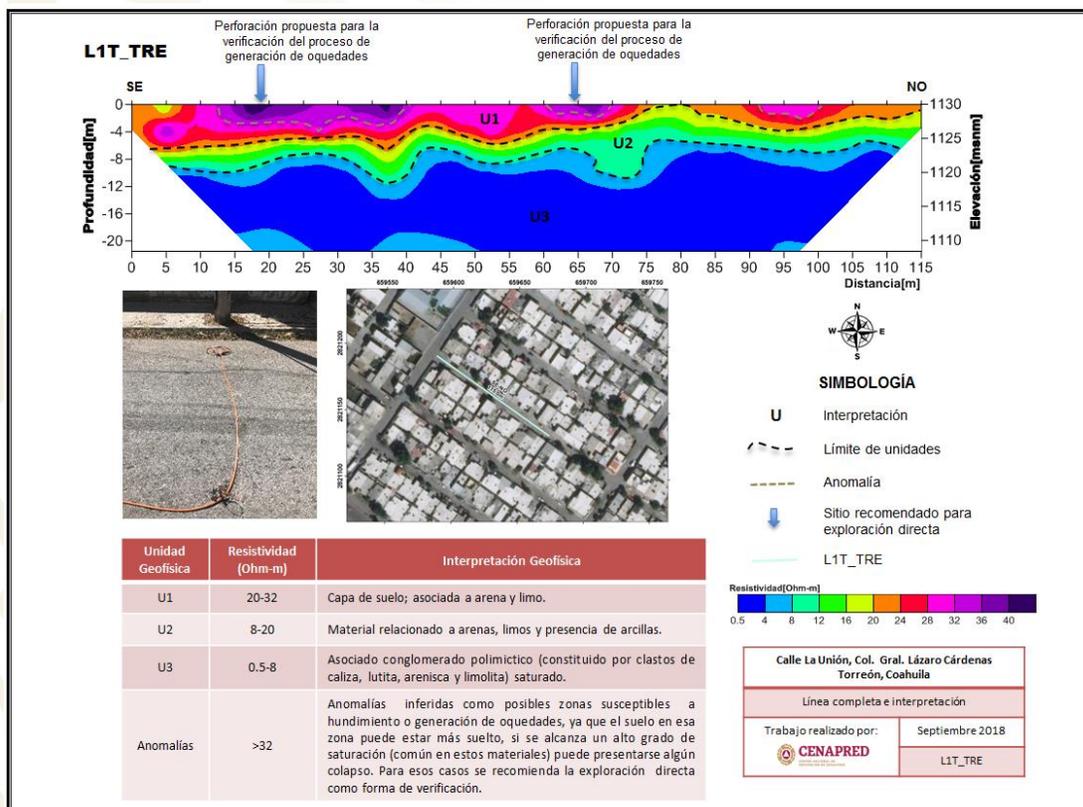


Figura 5 Perfil L1T_TRE obtenido en la calle La Unión, donde se muestran las diferentes unidades geoelectrica propuestas, y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

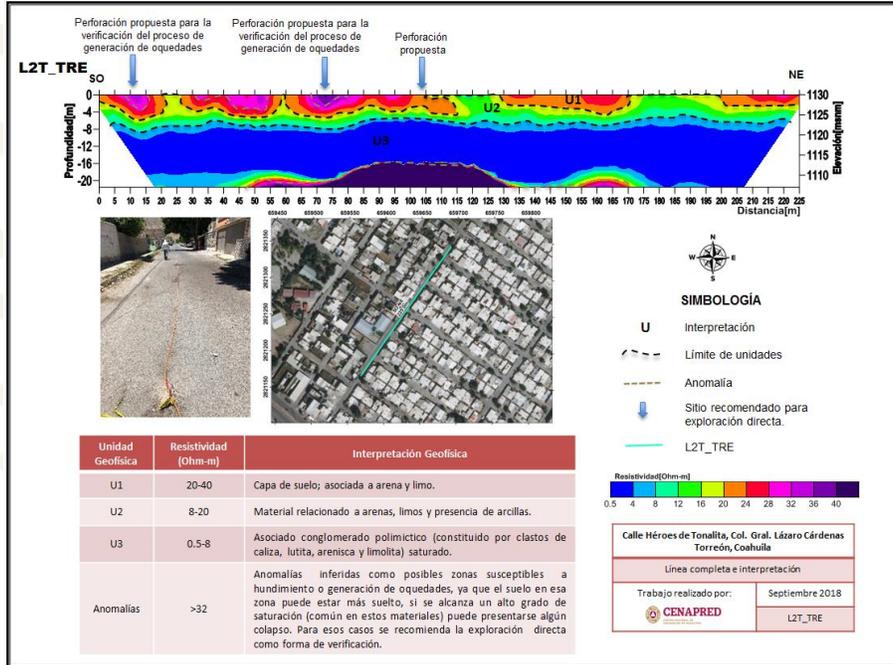


Figura 6 Perfil L2T_TRE obtenido en la calle Héroes de Tonalita, donde se muestran las diferentes unidades geoelectrica propuestas, y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

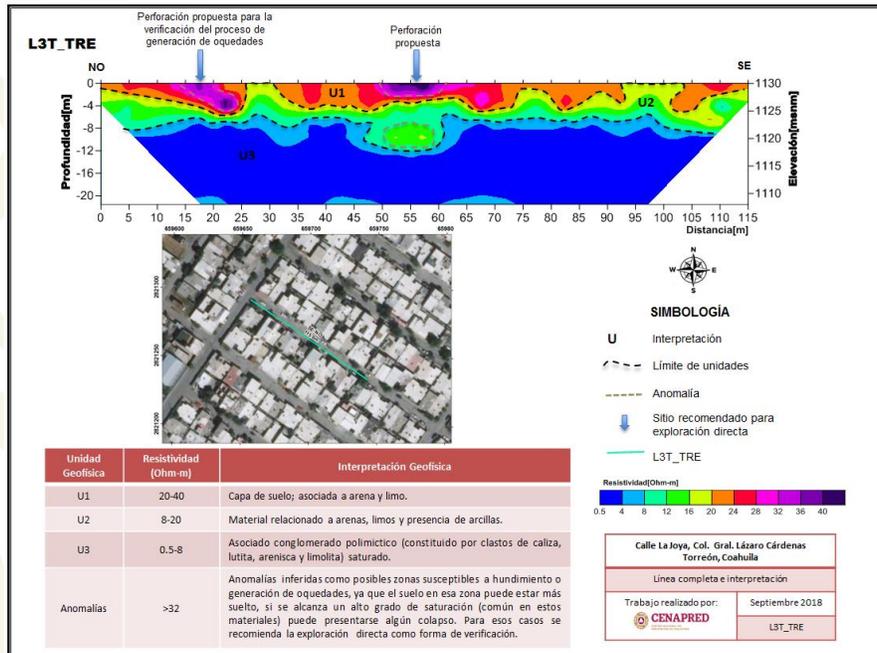


Figura 7 Perfil L3T_TRE obtenido en la calle La Joya, donde se muestran las diferentes unidades geoelectrica propuestas, y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

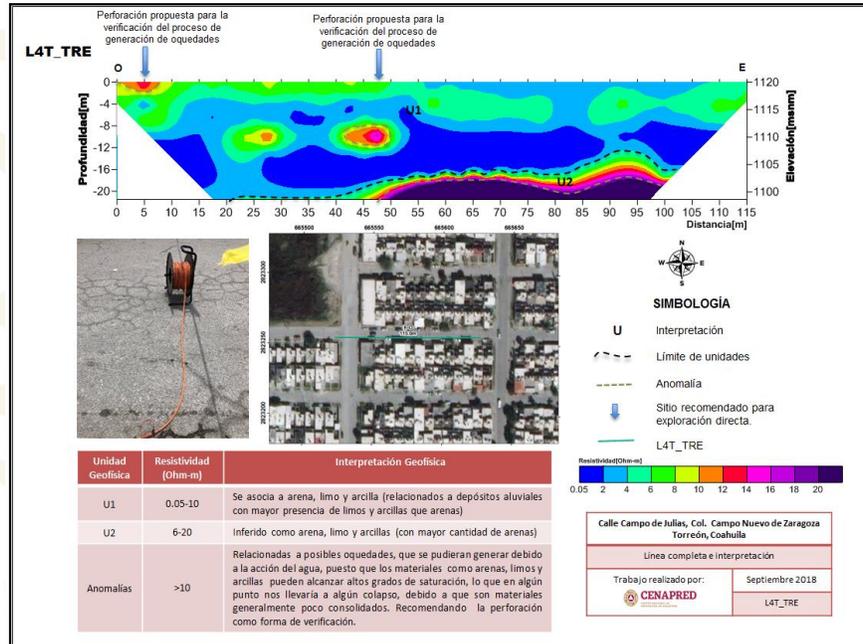


Figura 8 Perfil L4T_TRE obtenido en la calle Campo de Julias, donde se muestran las diferentes unidades geoelectrónica propuestas, y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

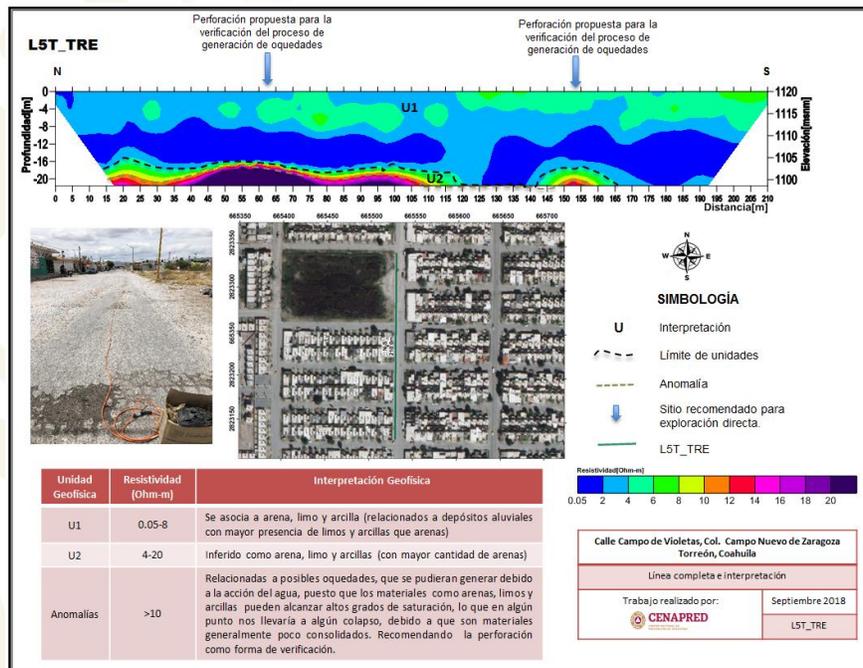


Figura 9 Perfil L5T_TRE obtenido en la calle Campo de Violetas, donde se muestran las diferentes unidades geoelectrónica propuestas, y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

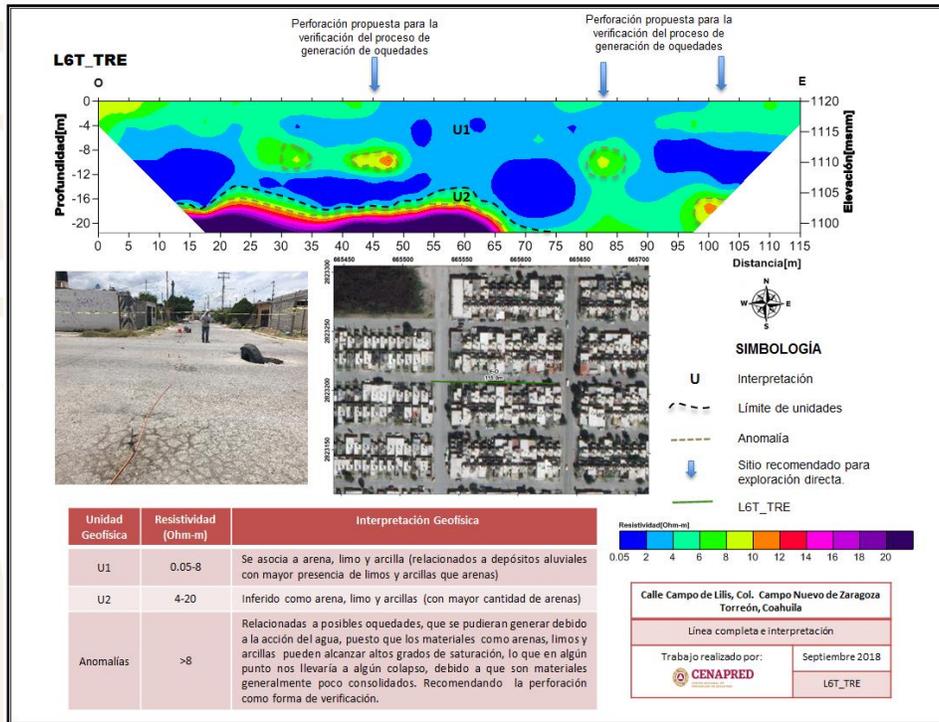


Figura 10 Perfil L6T_TRE obtenido en la calle Campo de Lilis, donde se muestran las diferentes unidades geoléctrica propuestas, y se indica la zona (morada) con altos valores resistivos que pueden asociarse a cavidades

Resultados de la exploración con georradar (GPR)

Se aplicó el método de GPR para inferir la distribución de los materiales del subsuelo y poder asociar de manera indirecta las posibles fracturas y los horizontes, que son susceptibles de contener cavidades. Las mediciones consistieron en el levantamiento de cuatro líneas en la colonia General Lázaro Cardenas y otras cuatro en Campo Nuevo de Zaragoza. Para el levantamiento se utilizó el equipo de radar MALA, con una antena de 250 MHz.

En la figura 11 se muestra el resultado que se obtuvo en la línea LIT_GPR. Con líneas verdes punteadas se indica el contacto entre los materiales, las hipérbolas en rojo corresponden a las anomalías presentes en esa línea. Una anomalía se refiere a una propiedad física de la tierra, que en un volumen definido, difiere apreciablemente con respecto a su valor común o normal correspondiente a esa región o tipo de roca o suelo.

De acuerdo con la distribución de la velocidad y permitividad, se observan dos unidades principales en la interpretación geofísica. En la Tabla 3 se describe las correspondientes unidades, así como el material con el que se asocian las mismas.

Tabla 3 Interpretación general para la técnica de Georradar

Unidad litológica	Interpretación Geofísica
U1	Suelo tipo Xerosol con contenido de arenas y limos, rico en arcillas (predominancia de limos y arcillas con menores cantidades de arenas)
U2	Material relacionado a depósitos de arenas, limos y arcillas poco compactos (predominancia de arenas con menores cantidades de limos y arcillas).
U3	Material asociado a conglomerados polimíticos compuestos por clastos de limolitas, lutitas, calizas y areniscas

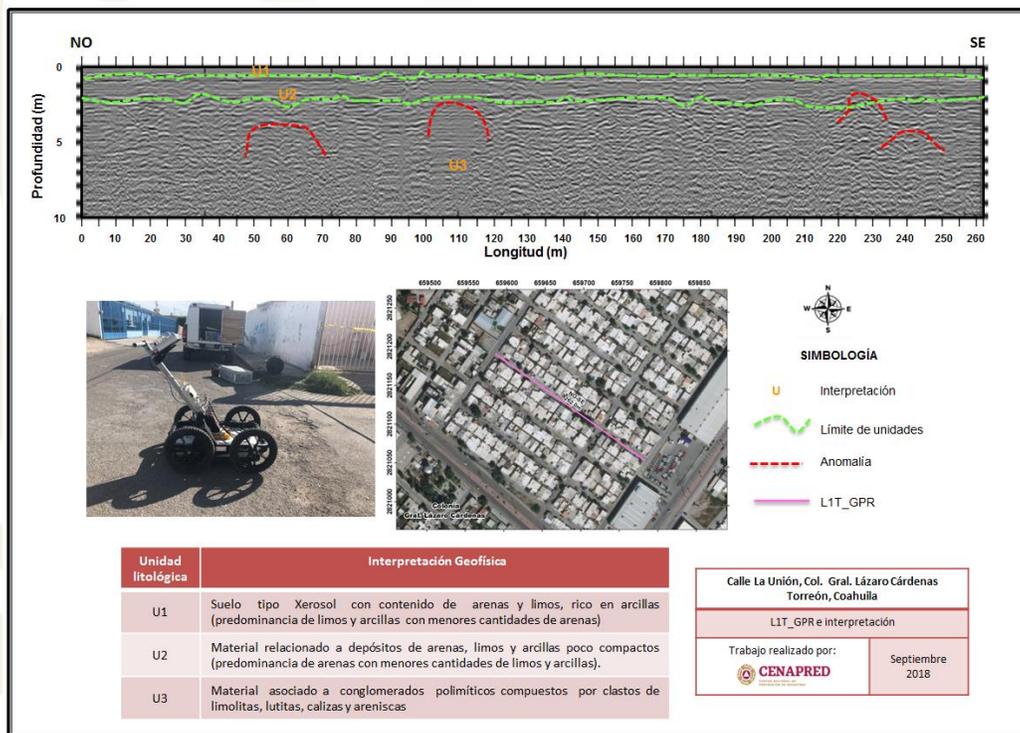


Figura 11 Radargrama obtenido en la L1T_GPR con la antena de 250 MHz, en la calle La Unión, Col. Gral. Lázaro Cárdenas, Torreón, Coah.

En el Anexo 2 que se encuentra al final del este documento se muestran las líneas restantes que se realizaron en las colonias Gral. Lázaro Cárdenas y Campo Nuevo de Zaragoza.

Resultados de Tomografía de Resistividad Eléctrica vs Georradar de Penetración Terrestre

Para simplificar la información de los resultados obtenidos de los estudios de georradar (GPR) y de tomografía de resistividad eléctrica (TRE), se manejaron líneas desde la 1 hasta 5, tal como se muestra en la Tabla 4 considerando que en estas líneas se realizaron las técnicas de GPR y TRE. Se hace una breve descripción de los resultados obtenidos.

Tabla 4 Relación de líneas de GPR y TRE del municipio de Torreón, Coah

Línea	Georradar	Tomografía de Resistividad Eléctrica
Línea 1	L1T_GPR	L1T_TRE
Línea 2	L2T_GPR	L2T_TRE
Línea 3	L5T_GPR	L4T_TRE
Línea 4	L8T_GPR	L5T_TRE
Línea 5	L7T_GPR	L6T_TRE

Línea 1

En el perfil de tomografía eléctrica L1_TRE existe una anomalía superficialmente muy clara del metro 15 al 40, indicando el posible hundimiento del terreno (color morado). Así mismo, bajo la anomalía se tiene una zona de saturación, como la unidad U3, que se presenta a lo largo de la línea. En la línea L1T_GPR se aprecia algunas anomalías que se pueden correlacionar con las líneas de tomografía de resistividad eléctrica.

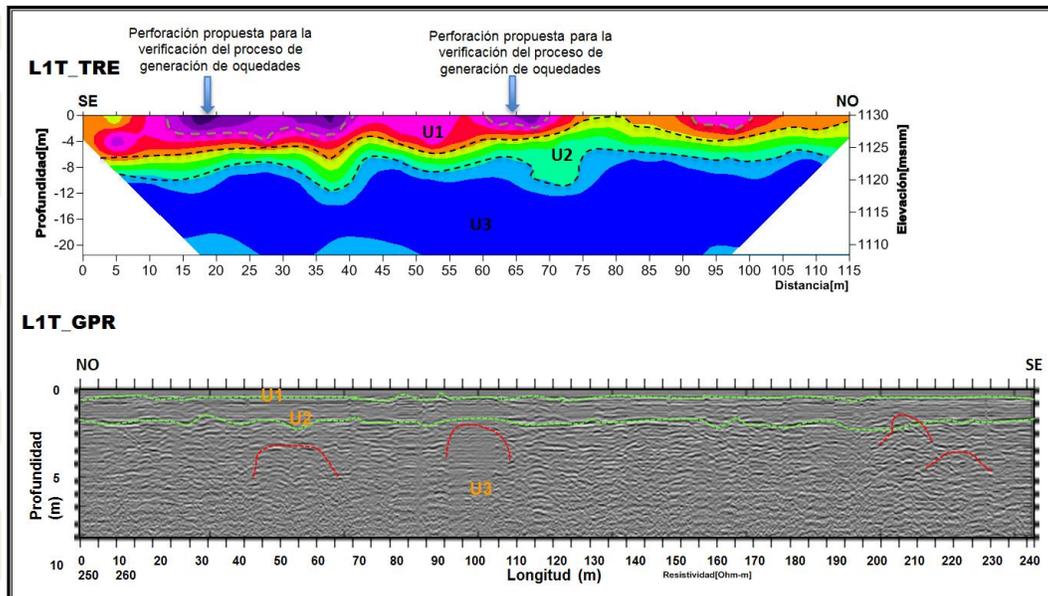


Figura 12 Línea 1 (L1T_TRE y L1T_GPR)

Línea 2

En el perfil de tomografía eléctrica L2T_TRE se observa algunas anomalías superficiales las que pudieran ocasionar en algún momento agrietamientos en el suelo y posteriormente hundimiento diferencial. No es posible correlacionar con el radargrama L2T_GPR.

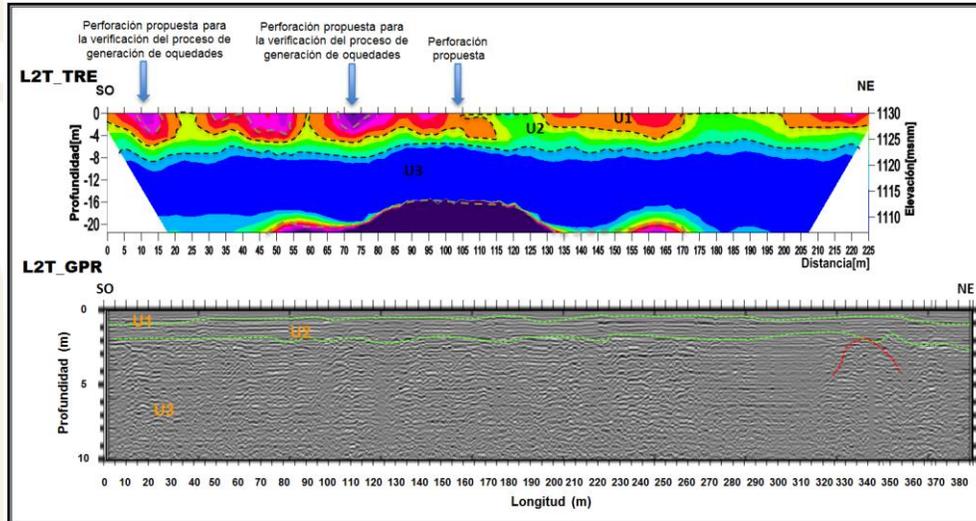


Figura 13 Línea 2 (L2T_TRE y L2T_GPR)

Línea 3

En la Línea L4T_TRE se aprecian unas pequeñas anomalía a una profundidad de 8 metros, indicando la posible formación de cavidades (color rosado), ya que debajo se observa una zona de saturación (azul oscuro). En tanto en la línea L5T_GPR, no se aprecia este elemento.

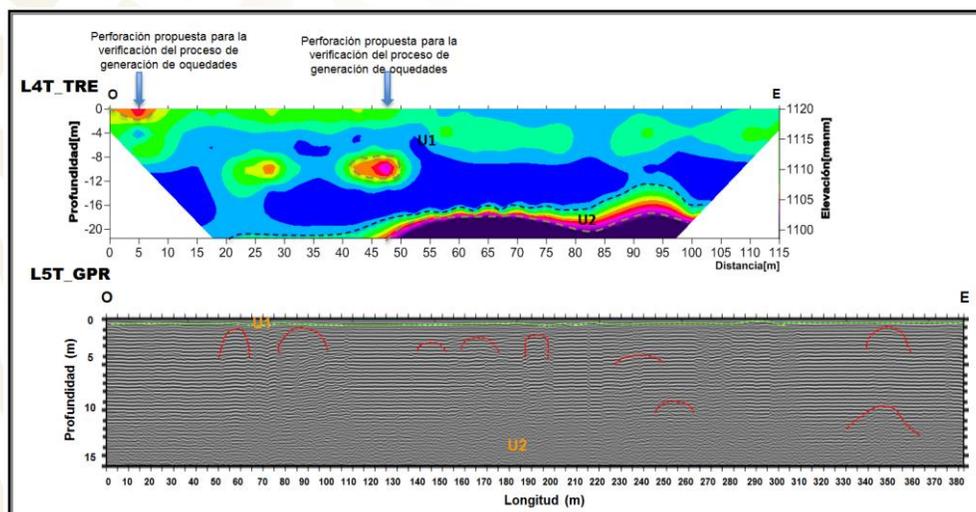


Figura 14 Línea 3 (L4T_TRE y L5T_GPR)

Línea 4

En la Línea L5T_TRE se aprecia desde una profundidad de 16 metros, una anomalía que se observa en gran parte de todo lo largo de la línea, indicando la posible formación de cavidades (color morado). En tanto en la línea L8T_GPR, no se aprecian ningún elemento que se pueda correlacionar con perfil de tomografía de resistividad eléctrica, esto se debe a que la calidad de los datos obtenidos con el método de georradar no son buenos por las características del suelo.

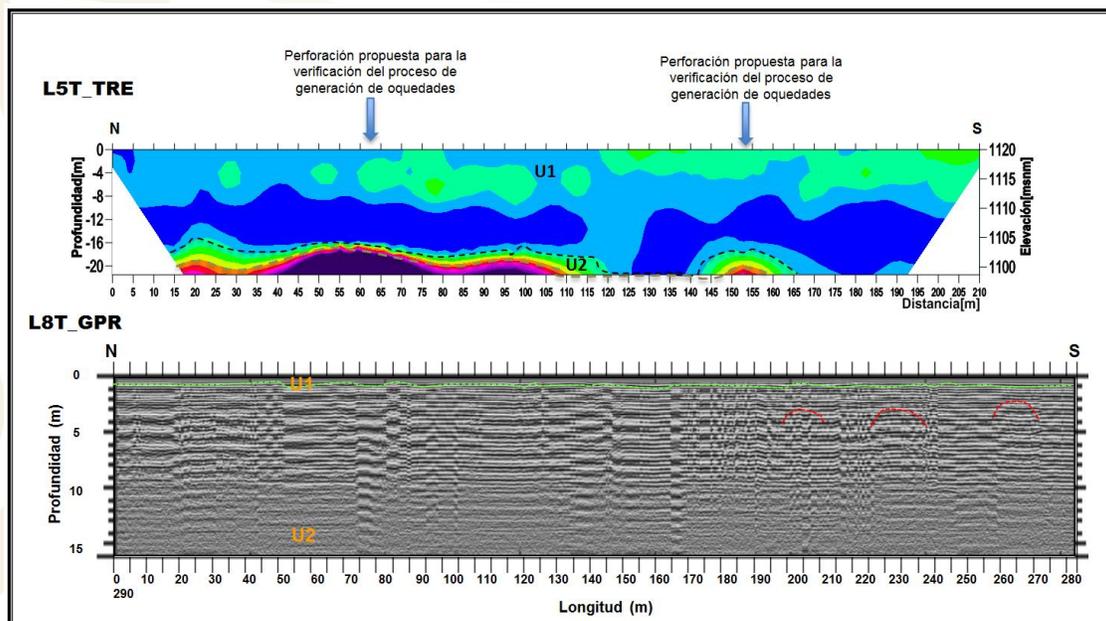


Figura 15 Línea 4 (L5T_TRE y L8T_GPR)

Línea 5

En la Línea L6T_TRE se aprecia desde una profundidad de 16 metros, una anomalía que se observa hasta el metro 65 de lo largo del perfil, indicando la posible formación de cavidades (color morado). En tanto en la línea L7T_GPR, no se aprecian ningún elemento que se pueda correlacionar con perfil de tomografía de resistividad eléctrica, esto se debe a que la calidad de los datos obtenidos con el método de georradar no son buenos.

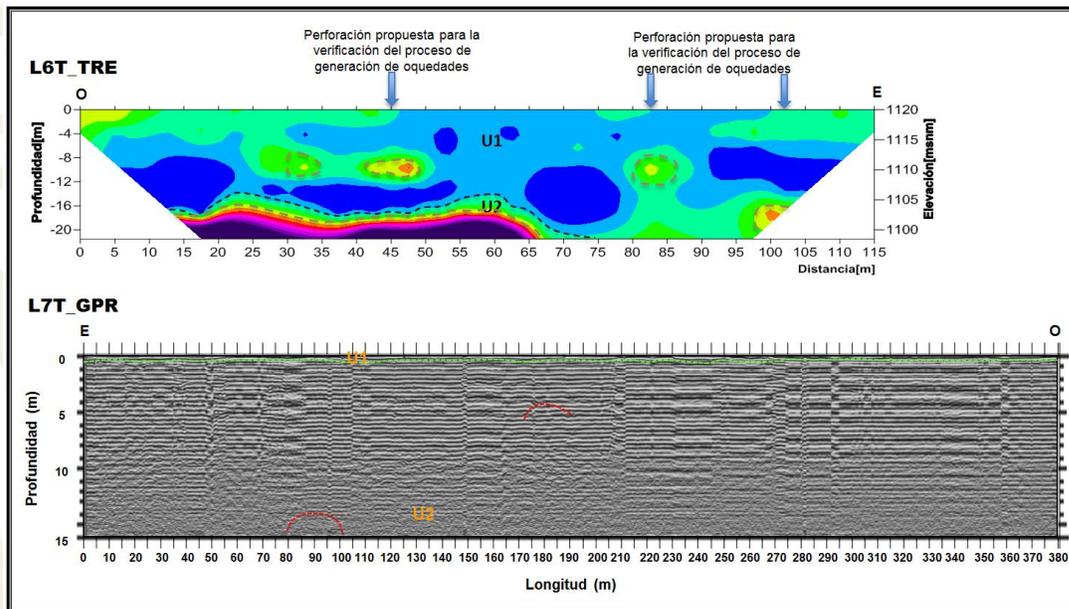


Figura 16 Línea 5 (L6T_TRE y L7T_GPR)

Los resultados e interpretación de estas dos técnicas están en función del tipo de materiales que componen el subsuelo de la zona de estudio. En cuanto a la tomografía, los resultados influyen respecto al grado de saturación de los materiales, el cual puede variar en función del nivel freático en que se encuentre la zona de estudio y la temporada de lluvia. De igual manera, en la técnica de georradar, los resultados están influenciados principalmente por la existencia de un medio de alta conductividad eléctrica; por ejemplo, cuando hay alto contenido de humedad o saturación de agua en los materiales que componen el suelo, la propagación de la señal en profundidad es débil, ya que se atenúa rápidamente y proporciona incertidumbre a mayor profundidad.

Para comprobar o verificar la presencia de cavidades con base en los resultados de las investigaciones realizadas con georradar, mostrados en la figura 11 y en el Anexo 2, las variaciones en el semiespacio anómalo, tanto de resistividad como de velocidad y permitividad, se recomienda hacer perforaciones, considerando los resultados del método TRE, hasta llegar a la profundidad de la base de la anomalía, en los lugares señalados en los perfiles (ver figuras 5-7); esto considerando rebasar el tope o la zona en donde inician las anomalías.

Conclusiones y Recomendaciones

La fisiografía de la zona de estudio es prácticamente plana, con evidencia de rasgos kárstico (dolinas o cavidades), cuya presencia constituye un peligro, ya que pueden migrar hacia la superficie y provocar fracturamiento y



hundimientos súbitos que afecten la infraestructura local y, sobre todo, a los habitantes de las colonias de la zona.

Cuando los materiales y/o cavidades se reacomodan o reblandecen por infiltración de agua, éstas pueden colapsar, generando graves daños en las construcciones debido a asentamientos diferenciales; en casos extremos una o varias viviendas pueden hundirse completamente a consecuencia de la falta del techo de la cavidad. Por tal motivo, se llevó a cabo una campaña de exploración geofísica con las técnicas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Georradar de Penetración Terrestre (GPR), dada su rápida aplicación.

Se debe tomar en cuenta que los métodos geofísicos aplicados en este estudio constituyen una primera etapa de análisis, al ser métodos indirectos y no proporcionan una evidencia física de las anomalías del subsuelo. Por lo tanto, la segunda etapa debe consistir en la exploración directa con estudios geotécnicos (perforaciones) en los sitios indicados como anómalos y, como tercera etapa se debe proceder a la remediación de las cavidades localizadas. En el Anexo 3 se describe la forma en la que se puede llevar a cabo la remediación de las cavidades.

De acuerdo con los resultados de los estudios geofísicos realizados, y los antecedentes de hundimientos y colapsos por cavidades en los suelos aluviales y fluviales de la zona metropolitana de La Laguna, se pudo determinar que existen anomalías geológicas que pueden estar asociadas a la formación de nuevas zonas de hundimiento, lo cual deberá ser confirmado con sondeos directos (perforación) en los sitios donde se identificaron dichas anomalías.

Con base en las interpretaciones de todas las líneas de adquisición de datos, el mayor riesgo se ubica en las Líneas 1 (figura 12) que se encuentra en la calle de La Unión y L3T_TRE (figura 7), que se encuentra en la calle La Joya. Es necesario verificar de manera directa con perforación, para reconocer la forma, extensión y geometría de las posibles cavidades. Para lo anterior se deberá emplear una perforadora direccional, evitando estar sobre la cavidad durante la operación del equipo, con la finalidad de evitar algún posible colapso, como consecuencia de un régimen de vibraciones prolongadas.

Además, se recomienda realizar perforaciones adicionales, mediante un Ensayo de Penetración Estándar (SPT por sus siglas en inglés) para conocer la porosidad, transmitividad, nivel freático y/o superficie piezométrica y gradiente hidráulico del acuífero libre.

Una vez que se tenga la verificación directa, se deberá tomar la decisión en cuenta a la posible remediación de la cavidad sobre la que se tengan construcciones o la reubicación de sus habitantes. Lo anterior implica analizar la



aplicación de algún método de pilotaje y/o relleno. En este sentido, se recomienda la asesoría de un geotecnista que supervise las perforaciones y plantee un plan de continuidad de los sondeos a realizar.

También se recomienda una verificación directa en el caso de la Línea 2 (figura 13), que se encuentra sobre la calle Héroes de Tonalita.

REFERENCIAS

Cervantes R., Marta C y Franco-González Angélica M. "Diagnóstico Ambiental de la Comarca Lagunera", UNAM.

Domínguez L. y Gómez J., 2007 "Análisis y pruebas de laboratorio de las mezclas de lechada de hidróxido de calcio y mineral de perlita, propuestas para el relleno de cavidades en zonas minadas", Sistema Nacional de Protección Civil, informe interno, Dirección de Investigación, CENAPRED, 11 p.

Nieto-Samaniego, A. F., Barajas-Gea, C.I., Gómez-González, J.M., Alaniz-Álvarez S.A., y Shunshan Xu, 2012. "Geología, evolución estructural (Eoceno al actual) y eventos sísmicos del Graben de Santiaguillo, Durango, México". Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 29, no.1, p 115-130.

Orellana, E. (1982). "Prospección Geoeléctrica en corriente continua". Madrid: Ediciones Paraninfo.

Órgano de Gobierno Constitucional del Estado Independiente, Libre y Soberano de Coahuila de Zaragoza. Periódico Oficial. Febrero 2014.

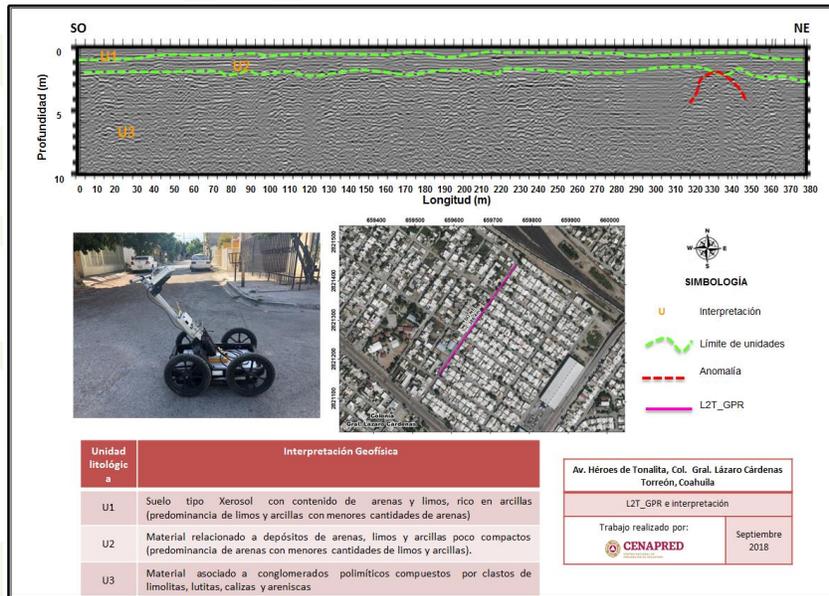
Servicio Geológico Mexicano, 2007. "Estudio de Peligros Geológico-Geofísico en la Colonia Villa de las Flores, Municipio de Lerdo, Estado de Durango".



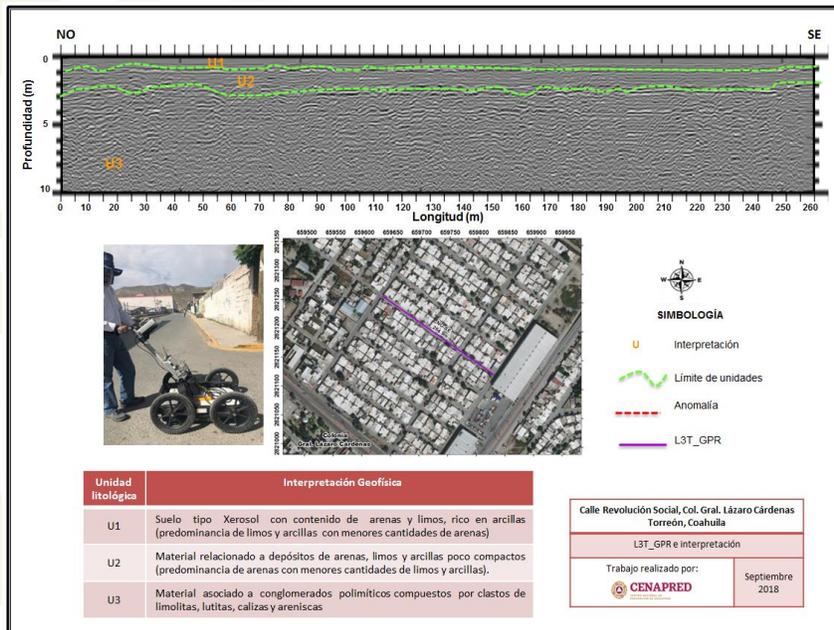
ANEXO 2

En los siguientes radargrama no se observan claramente algunas anomalías en las que nos puedan indicar alguna evidencia de posible hundimiento del terreno o colapso.

L2T_GPR

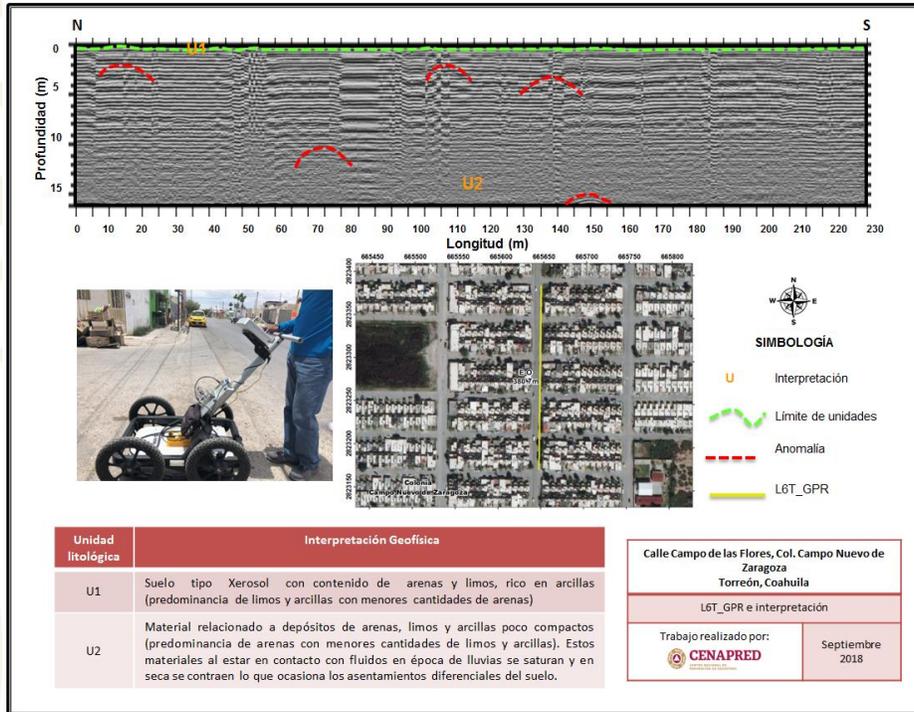


L3T_GPR

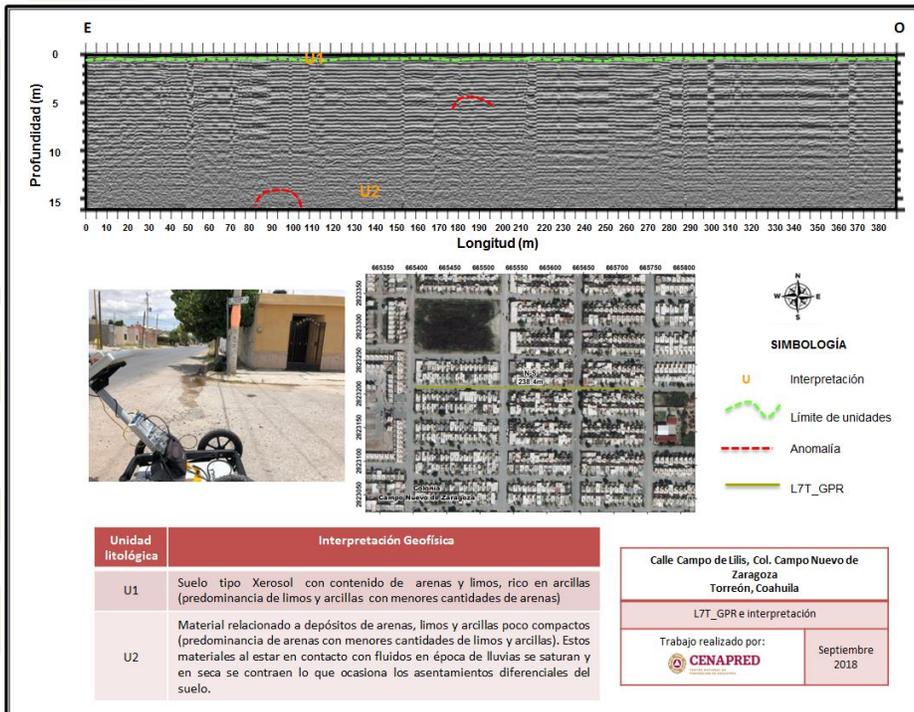




L6T_GPR

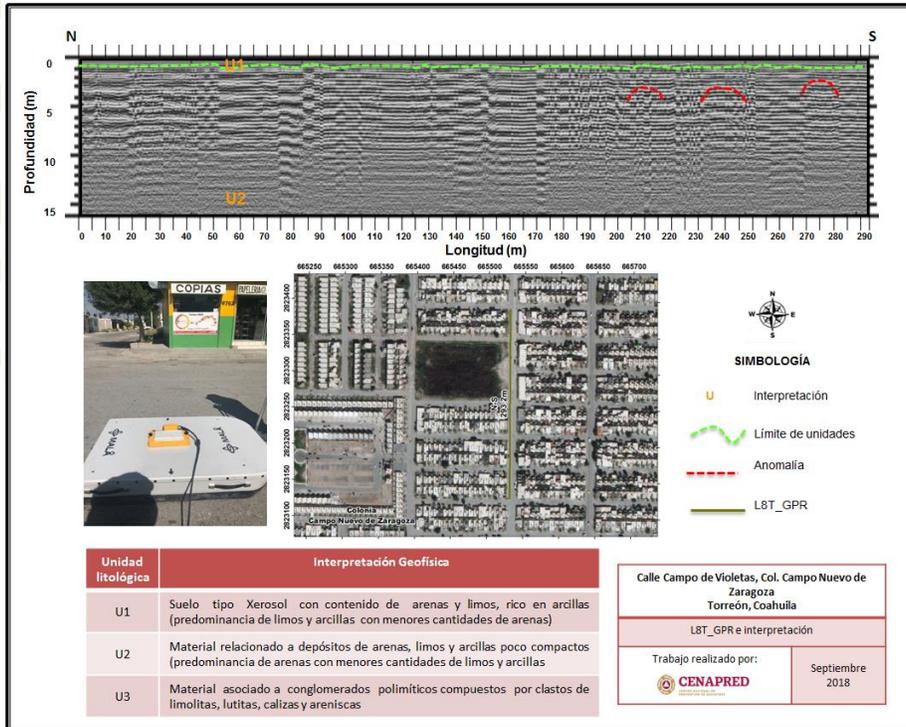


L7T_GPR





L8T_GPR





ANEXO 3

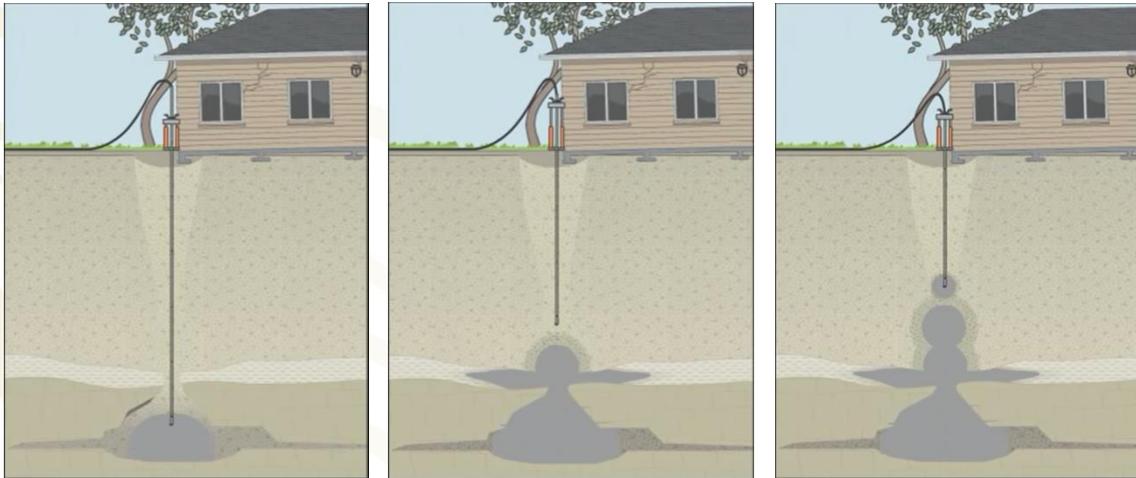
Recomendaciones para el relleno de huecos o cavidades (dolinas) subterráneas en depósitos de suelos aluviales afectados por disolución.

Una vez que se verifique la existencia de tales anomalías y se ratifique su localización, se tiene el reto de implementar alguna técnica de relleno que permita retardar o impedir que se produzcan hundimientos súbitos que pudieran afectar a la población. Desde el punto de vista geotécnico, el relleno de dichas anomalías, es un proceso que requiere la participación de especialistas en la materia o empresas que tengan amplia experiencia en casos similares.

El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de Norteamérica, ha desarrollado una técnica para el relleno de cavidades (US Army, 2017), la cual consiste en inyectar una lechada de cemento, o una mezcla de cemento y agregados, desde la parte más baja de la cavidad, con la finalidad de generar un sello y una base desde dicho fondo que sirve como soporte para el relleno de abajo hacia la parte más superficial (figura). Para ello, se debe tener gran certeza de la profundidad y de las dimensiones de dicha cavidad. Así mismo, se deberá tener un conocimiento muy detallado de las propiedades geomecánicas del subsuelo, a fin de no inducir fracturamiento excesivo en el mismo.

Cabe comentar que el éxito de cualquier técnica de remediación radica en el claro conocimiento de las propiedades del subsuelo y de las dimensiones de las cavidades a rellenar, ya que se corre el riesgo de verter grandes cantidades de cementantes si no se logra definir el fraguado y el revenimiento de las mezclas a utilizar. En la actualidad existe un gran número de materiales que se pueden utilizar para el relleno de cavidades, como las mezclas de hidróxido de calcio y mineral de perlita (Domínguez y Gómez, 2007), ampliamente utilizados en minas subterráneas en algunas alcaldías de la Ciudad de México y municipios del Estado de México.

La selección de la mezcla a utilizar debe ser tal que, al final del fraguado, ésta tenga las propiedades de resistencia, deformación y permeabilidad de los suelos que prevalecen en el sitio, ya que de no tenerlas se corre el riesgo de generar daños indeseados, como la posible propagación del fenómeno hacia zonas que no estaban afectadas.



Etapas en las que se muestra los pasos para el relleno de cavidades y mejoramiento del suelo. Tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=O5zJeLki6Jc>