



**“ASESORÍA TÉCNICA EN  
ASPECTOS ESTRUCTURALES  
PARA LA CONSTRUCCIÓN  
DE LA AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 12  
Tramo Mixcoac-Observatorio”**  
(Convenio No. IISGCONV-016-2016/1)

**“ESTUDIOS DE TOMOGRFÍA ELÉCTRICA Y DE RADAR  
DE PENETRACIÓN TERRESTRE EN LAS CALLES  
CERCANAS A LA LUMBRERA CALLE E, PARA LA  
DETECCIÓN DE CAVIDADES EN EL SUBSUELO, EN  
RELACIÓN CON LOS ASPECTOS ESTRUCTURALES  
DE LA AMPLIACIÓN DE LA L-12 DEL METRO,  
MIXCOAC-OBSERVATORIO”**

PARA:  
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS, GDF  
DIRECCIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN DE  
OBRAS PARA EL TRANSPORTE (DGCOT)

POR:  
INSTITUTO DE INGENIERÍA  
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.  
NOVIEMBRE DE 2017



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**  
INGENIERÍA ESTRUCTURAL



**CDMX**  
CIUDAD DE MÉXICO

"ASESORÍA TÉCNICA EN ASPECTOS ESTRUCTURALES  
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA AMPLIACIÓN DE  
LA LÍNEA 12 TRAMO MIXCOAC-OBSERVATORIO"  
TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y DE  
RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE EN CALLES  
CERCANAS A LA LUMBREERA CALLE E  
(NOVIEMBRE DE 2017)



## INTRODUCCIÓN

Las excavaciones realizadas para la Ampliación de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México cubren una zona amplia que involucra distintas colonias del Poniente; durante los trabajos de dicha obra se están ejecutando perforaciones profundas, de poco más de 30 m de profundidad. El desarrollo de estos trabajos de excavación y construcción han coincidido con la aparición de fisuras y grietas en viviendas de la colonia "Primera Victoria", de la delegación Álvaro Obregón. La solicitud del presente estudio geofísico se hizo con fines de analizar el subsuelo somero y cercano a las viviendas afectadas, para poder dar un enfoque más preciso de los fenómenos que están ocurriendo en el lugar de interés. Al final se presenta el Anexo Fotográfico con diversas vistas que describen los trabajos de interés realizados en campo, en relación con las pruebas TRE y RPT, descritas enseguida.

## METODOLOGÍA

### 1) MÉTODOS ELÉCTRICOS

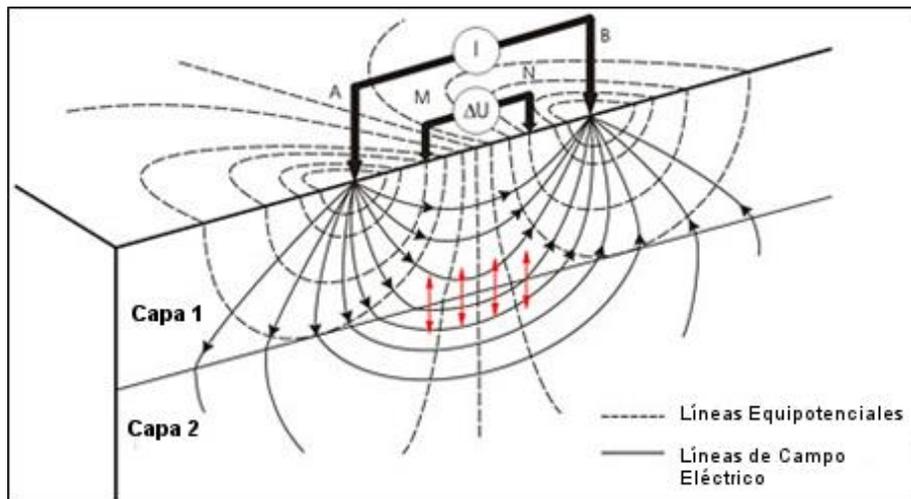
Los métodos eléctricos DC, más identificados como métodos eléctricos, se basan en producir un arco eléctrico a través de un par de electrodos conectados a una fuente (electrodos AB), para posteriormente medir la respuesta del subsuelo a través de un par de electrodos adicionales (electrodos MN), por medio de la diferencia de potencial entre ellos (ver fig 1).

El propósito de los sondeos eléctricos es determinar la distribución de resistividades en el subsuelo, realizando mediciones en la superficie de la tierra. A partir de estas mediciones, la resistividad verdadera en el subsuelo puede ser estimada. Esta resistividad puede ser asociada a varios parámetros geológicos como el contenido de fluidos y minerales, la porosidad y el grado de saturación de agua en la roca. Los sondeos eléctricos han sido empleados por varias décadas en investigaciones hidrogeológicas, mineras y geotécnicas. Actualmente, se están implementando en investigaciones ambientales (Loke, 2004).

Los métodos eléctricos se basan en los contrastes de resistividad (o su inverso, conductividad) de los materiales en el subsuelo; por ejemplo, cuando hay la presencia de una oquedad en el subsuelo, el contraste entre esta anomalía y los

materiales circundantes será evidente. La resistencia eléctrica,  $R$ , de un material está relacionada con sus dimensiones físicas, su área transversal  $A$  y su longitud  $l$ ; la resistividad  $\rho$  o su inverso, la conductividad  $\sigma$ , se definen por:

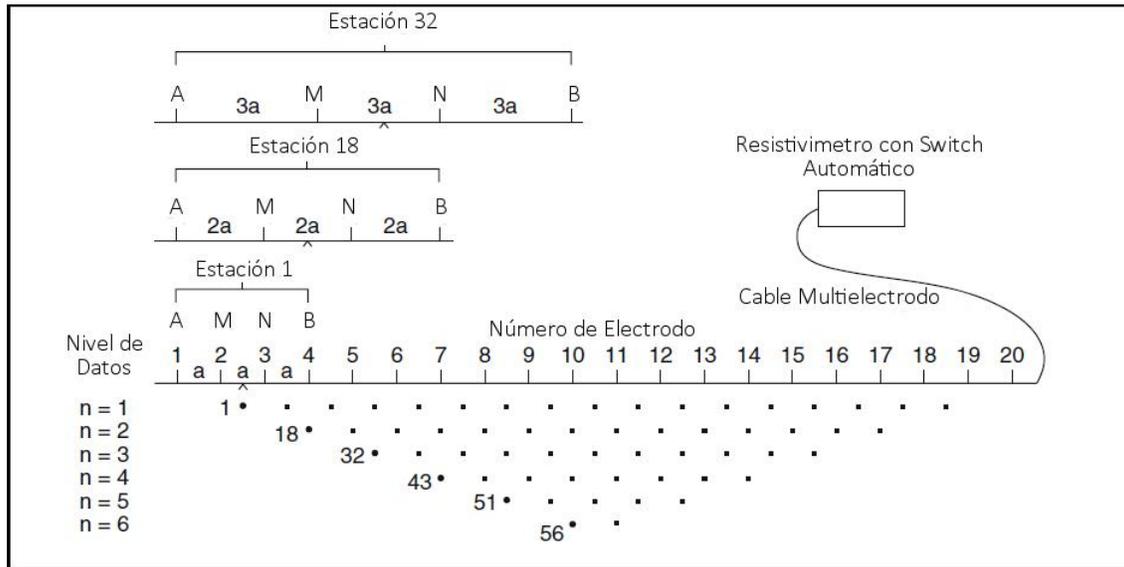
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{RA}{l} \quad (1)$$



**Figura 1.** Diagrama básico del método eléctrico de corriente continua

### TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (TRE)

A partir de la teoría del método eléctrico, la tomografía eléctrica se basa en adquirir varios puntos en un perfil con la finalidad de obtener las variaciones de las resistividades en el subsuelo, tanto de forma vertical como horizontal. El método consiste colocar en la superficie una serie de electrodos colineales con una determinada configuración y poder realizar calicatas eléctricas en varios niveles de profundidad, variando la distancia entre los electrodos, dependiendo de la configuración seleccionada (ver fig 2) (Orellana, 1982).



**Figura 2.** Diagrama de adquisición de la TRE

## 2) RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (RPT)

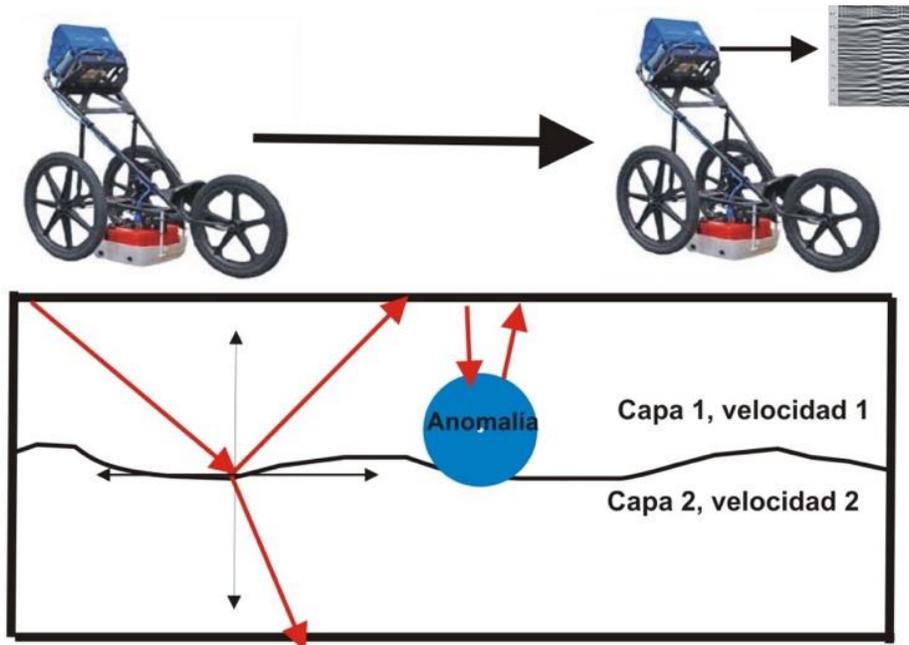
La prospección electromagnética tiene numerosas técnicas con distintos dispositivos de campo y técnicas de evaluación y procesamiento de datos. Estas técnicas relacionan la propagación de la energía electromagnética con la penetración del sondeo. Una clasificación de los métodos electromagnéticos es haciendo variar un parámetro que se relacione con la penetración, tales como geometría de adquisición, frecuencia y tiempo; sin embargo, el RPT es el único método electromagnético donde las tres variables están en función de la penetración.

Los fundamentos del Radar de Penetración Terrestre (RPT), yacen en los fenómenos de inducción electromagnética, mientras que las relaciones constitutivas cuantifican las propiedades del medio. En este método el tiempo es una variable determinante conjuntamente con las coordenadas espaciales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Las líneas de campo de inducción o campo primario, en principio son de la misma frecuencia que la corriente asociada al transmisor. El campo primario varía en el tiempo al penetrar en el medio, que por las leyes de inducción genera corrientes secundarias que emergen del medio al exterior y son medidas por un receptor (Nabighian *et al*, 1988).

El estudio, evaluación e interpretación del campo secundario respecto al primario, así como su cambio de amplitud y fase permite determinar las propiedades físicas de las ondas electromagnéticas (E.M.) mediante relaciones matemáticas generales

o casos particulares de diferentes medios de propagación, tal como el dieléctrico disipativo.

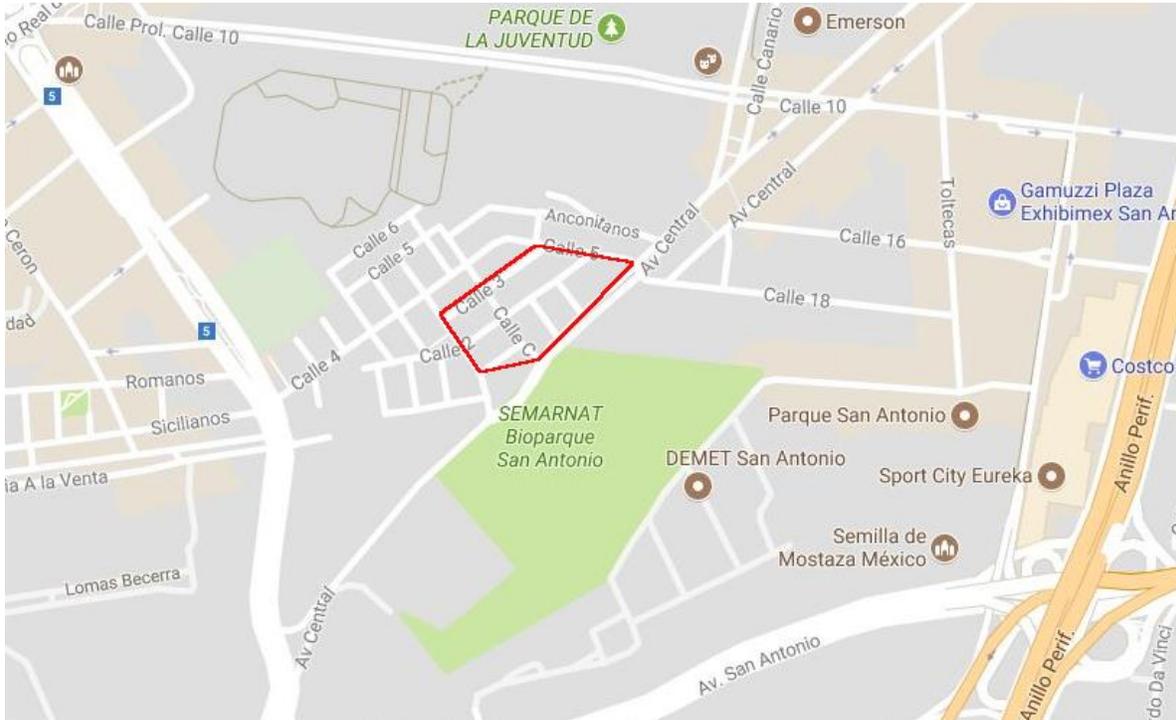
El RPT trabaja utilizando ondas electromagnéticas que se propagan en materiales dieléctricos con poca pérdida, es decir en medios clasificados como dieléctricos disipativos. En estos medios la escala de penetración puede ir desde algunos metros hasta centímetros, debido a que, en ambientes ricos en arcillas, saturados o áreas de agua subterránea salada, pueden generar condiciones donde la penetración sea muy limitada (ver fig 3).



**Figura 3.** Esquema del principio físico del Radar de Penetración Terrestre

## ZONA DE ESTUDIO

La zona afectada se encuentra en la esquina de la Calle C y Calle 2 de la colonia "Primera Victoria", en la delegación Álvaro Obregón; a su vez el área de estudio se extendió a calles aledañas a este punto (ver polígono rojo en la fig 4).

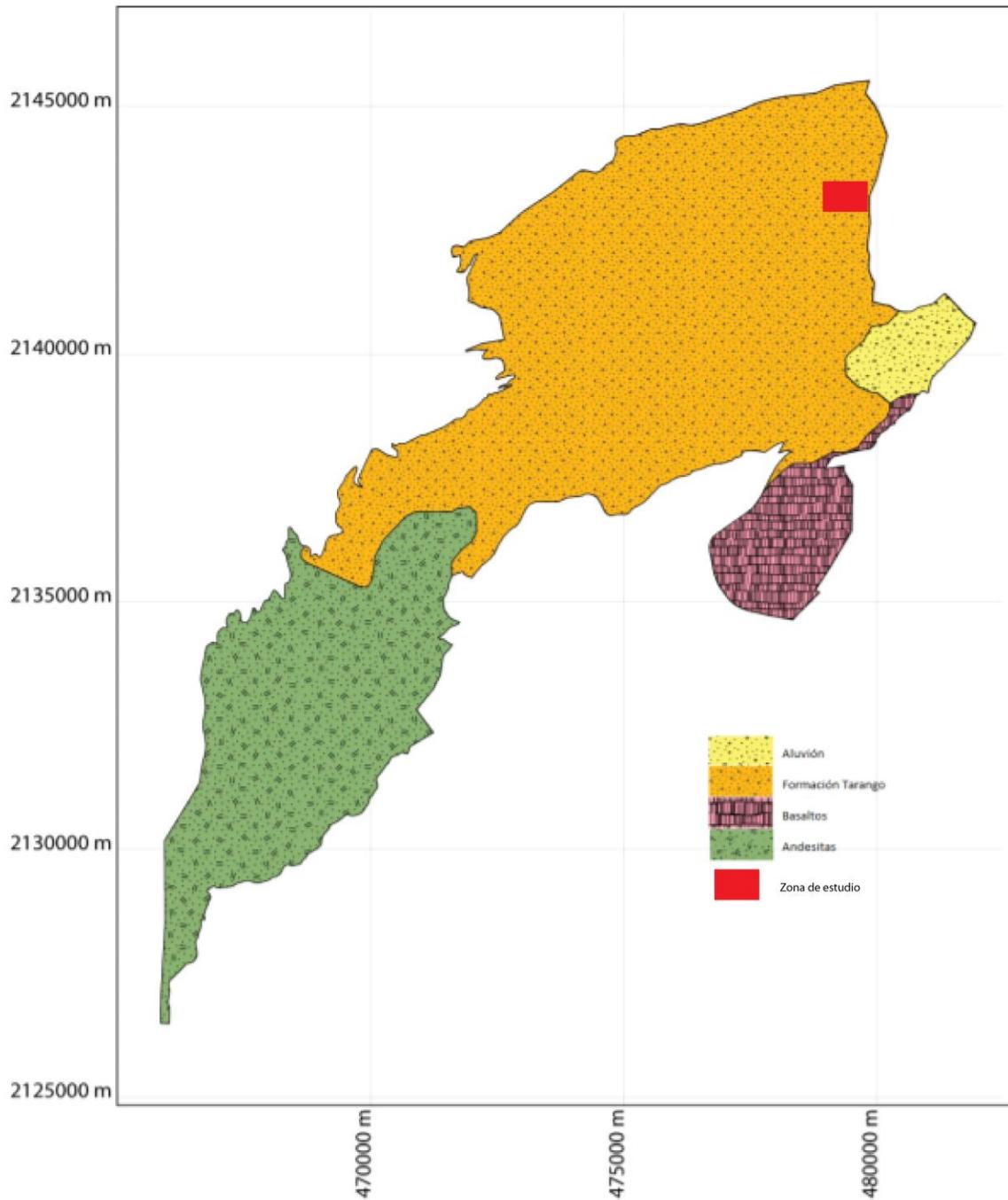


**Figura 4.** Ubicación de la zona de estudio de la colonia “Primera Victoria”, delegación Álvaro Obregón



## GEOLOGÍA

Las rocas que afloran en la Delegación Álvaro Obregón son del Terciario-Cuaternario; su posición estratigráfica y edad absoluta han sido establecidas gradualmente en los últimos años. Pero, cabe mencionar que no de forma definitiva. En el área solo afloran rocas de origen volcánico, así como materiales derivados de éstas, cuyas edades son consideradas del Oligoceno al Reciente (ver fig 5). El área está constituida por una alternancia de depósitos vulcano-sedimentarios resultado de la actividad volcánica que dio origen al conjunto morfo-estructural de la Sierra de las Cruces, indicio del fin del gran vulcanismo en la región. La unidad más antigua consiste en rocas volcánicas andesíticas y dacitas del mioceno, con intercalación de depósitos de arenas pumicíticas, tobas arenosas y arcillosas, lahares de fragmentos de diversos tamaños en una matriz tobácea y arcillosa, y, por último, tobas alteradas, horizontes de pómez y suelos arcillosos. Esta zona se denomina de Lomas, formada por rocas generalmente firmes, depositadas fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En el Sureste se extiende una gran losa rocosa conformada por basaltos y andesitas basálticas que fluyeron desde el Volcán Xitle, intercalados con horizontes de escoria (tezontle) y con estructuras primarias como túneles de lava y chimeneas de explosión. El área de afloramiento de esta unidad corresponde a la zona de los pedregales. La parte más baja de la Delegación Álvaro Obregón está cubierta por acumulaciones lacustres. En el lecho de los ríos y en las desembocaduras de las cañadas existen depósitos de materiales fluviales consistentes en arenas y gravas de rocas ígneas andesíticas y dacíticas y fragmentos de piroclastos de pómez. La zona lacustre está integrada por potentes depósitos de arcilla altamente comprensible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables. Suelen estar cubiertos por suelos aluviales y rellenos artificiales.



**Figura 5.** Mapa geológico de la Delegación Álvaro Obregón y localización de la zona de interés para realizar los estudios de Tomografía Eléctrica y del Radar



## ADQUISICIÓN

Con el fin de realizar una caracterización integral del terreno se utilizaron dos métodos geofísicos para complementar, a saber: El método de TRE y el RPT. El método TRE, por la logística de adquisición, se limitó a líneas sobre las calles de la colonia. Sin embargo, la versatilidad del RPT permitió levantar datos dentro de algunas viviendas dañadas.

### 1) ADQUISICIÓN DE DATOS TRE

La tabla 1 y fig 6 muestran los parámetros de adquisición TRE, así como también la ubicación de las TRE, respectivamente, dentro del área de interés.

**Tabla 1.** Parámetros de adquisición TRE

Línea	Espaciamiento electrodic	Número de electodos	Distancia de la línea	Arreglo electrodic
L1	1 m	56	55 m	Dipolo-dipolo
L2	2 m	56	110 m	Dipolo-dipolo
L3	2 m	53	104 m	Dipolo-dipolo
L4	1 m	42	41 m	Dipolo-dipolo
L5	2 m	52	102 m	Dipolo-dipolo

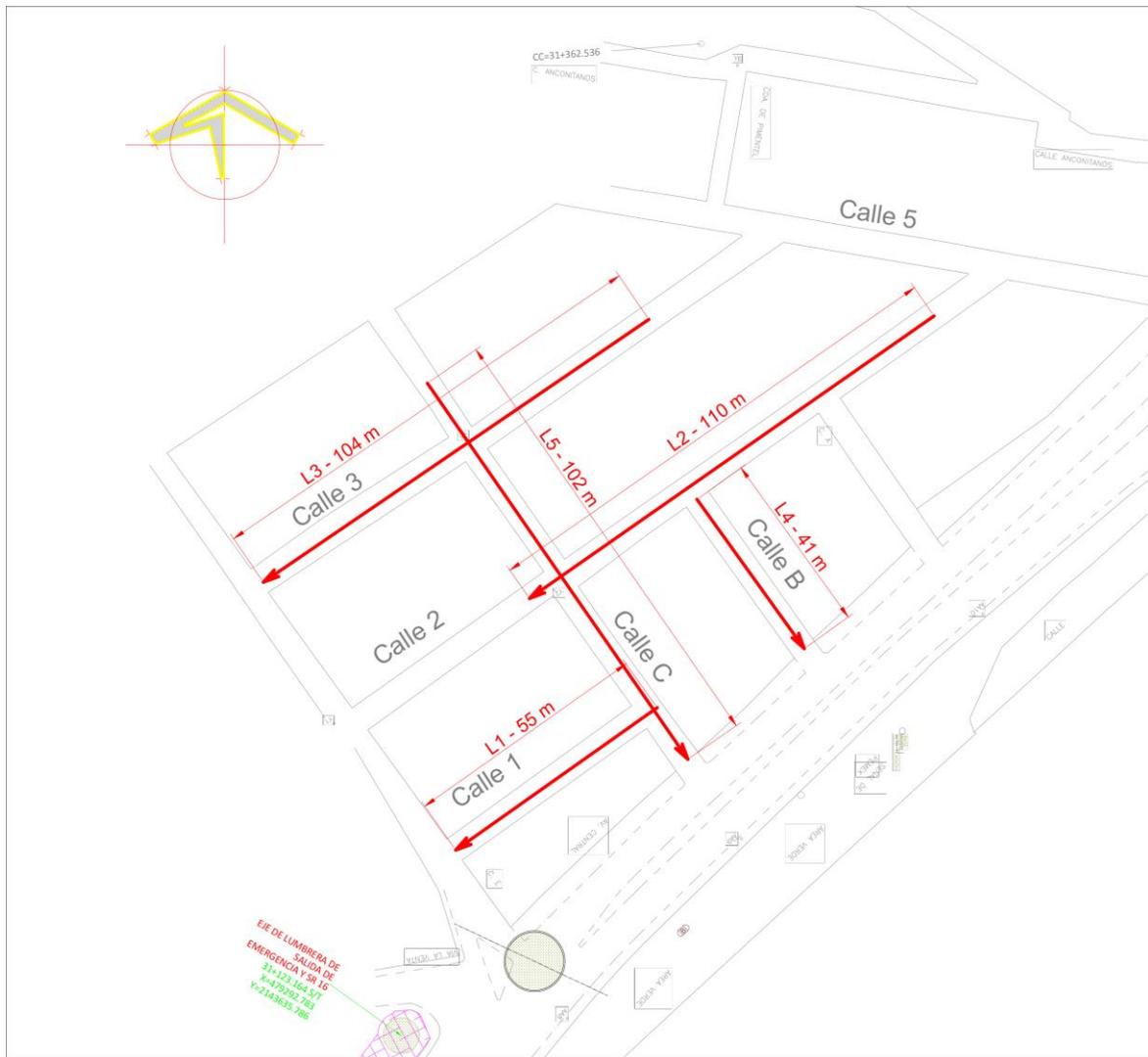


Figura 6. Croquis de la ubicación de las TRE

## EQUIPO UTILIZADO

Se utilizó el instrumento de resistividad SuperSting R8 Automático, Marca AGI, con ocho niveles de medición simultánea para cada inyección de corriente, transmisor interno de 200 W, corriente de salida de 1 a 2000 mA, sistema de compensación automática de potencial espontáneo y soporte para diferentes configuraciones de levantamiento de datos. La tabla 2 tiene la ficha técnica del equipo utilizado, que se muestra en la respectiva fig 7.



**Tabla 2.** Ficha técnica del equipo utilizado

<b>FICHA TÉCNICA SUPER STING R8 IP</b>	
Modos de Medidas	Resistividad aparente, resistencia, polarización inducida (PI), voltaje de batería.
Rango de Medidas	+/- 10V.
Resolución de Medidas	Max 30 nV, depende del nivel del voltaje.
Resolución de Pantalla	4 dígitos en anotaciones de ingeniería.
Intensidad de corriente de salida	1mA - 2000mA continuo, medido a gran exactitud.
Voltaje de salida	800 Vp-p, el voltaje actual del electrodo depende de la corriente transmitida y la resistividad del subsuelo.



**Figura 7.** Equipo utilizado SuperSting R8

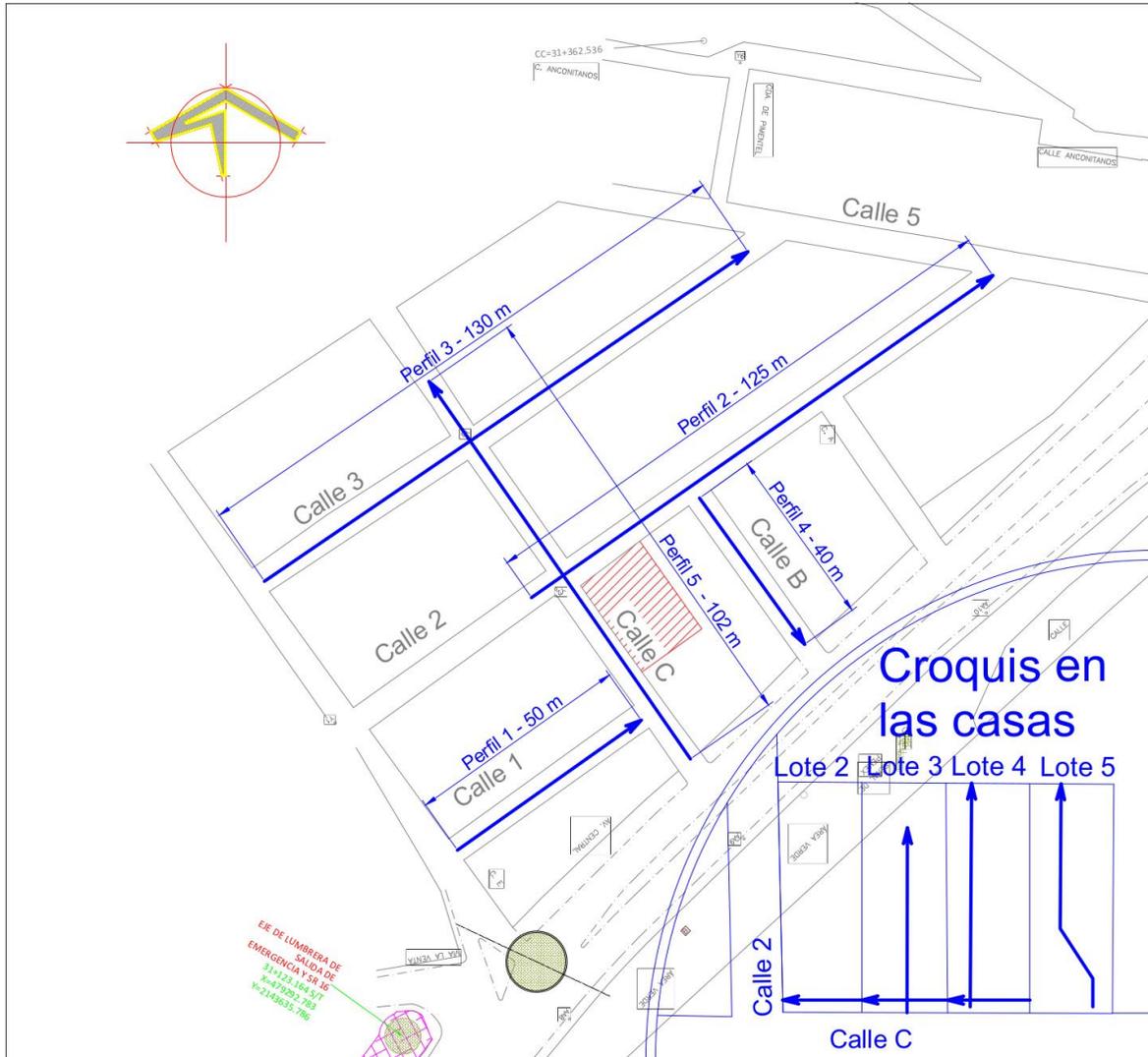


## 2) ADQUISICIÓN DE DATOS RPT

La tabla 3 y fig 8 muestran los datos de la caracterización de perfiles de RPT, así como también la ubicación y orientación de perfiles de RPT, respectivamente, dentro del área de interés.

**Tabla 3.** Caracterización de perfiles de RPT

Línea	Longitud	Localización y orientación
Perfil 1	50 m	Sobre Calle 1, de la Calle E a la Calle C
Perfil 2	125 m	Sobre Calle 2, de Calle E a Calle 5
Perfil 3	130 m	Sobre Calle 3, de Calle E a Calle 5
Perfil 4	40 m	Sobre Calle B, de Calle 2 a Av. Central
Perfil 5	102 m	Sobre Calle C, de Av. Central a Calle 4
Perfil 6	4 m	Dentro del lote 2, paralelo a Calle C, SE-NW
Perfil 7	10 m	Dentro de lote 3, paralelo a Calle 2, SW-NE
Perfil 8	3 m	Dentro de lote 3, paralelo a Calle C, SE-NW
Perfil 9	4 m	Dentro de lote 4, paralelo a Calle C, SE-NW
Perfil 10	10 m	Dentro de lote 4, paralelo a Calle 2, SW-NE
Perfil 11	12 m	Dentro de lote 5, paralelo en general a Calle 2, con una inflexión



**Figura 8.** Ubicación y orientación de perfiles de RPT

### EQUIPO UTILIZADO

En este trabajo, para la adquisición de los datos RPT, se utilizó un equipo de la marca Geophysics System Survey Inc. (GSSI), modelo SIR-3000, con una frecuencia central de 400 MHz (ver fig 9). Esta frecuencia puede penetrar en promedio de tres a cuatro metros de profundidad, e inferir interferencias estructurales en el subsuelo si existe una variación en la permitividad dieléctrica de los diferentes materiales. Para este estudio, los perfiles se adquirieron con una resolución de 50 trazas por metro; cada traza tiene 512 muestras.



**Figura 9.** Adquisición de los perfiles de Radar de Penetración Terrestre (RPT)

El sitio de estudio se encuentra en las siguientes calles: Calle C, Calle 3, Calle 2, Calle 1 y Calle B, así como al interior de cuatro viviendas localizadas en la Calle C, en la Colonia 1ra. Victoria Sección Bosques, Delegación Álvaro Obregón, Ciudad de México (ver fig 8), con la finalidad de conocer anomalías geológicas (deformación del subsuelo), a partir de dichas mediciones.

## PROCESAMIENTO DE DATOS

### 1) PROCESAMIENTO DE DATOS DE RESISTIVIDAD

Las imágenes eléctricas 2D son ampliamente usadas para mapear áreas de geología compleja a moderada, donde los sondeos de resistividad 1D y las técnicas de perfilaje no son adecuadas. Los resultados de este tipo de sondeos son usualmente representados gráficamente en forma de secciones interpoladas, lo que distorsiona la distribución real de la propiedad en el subsuelo (Loke, 2010).



Para tal efecto, es necesario recurrir a un proceso de inversión. Es decir, a través de un algoritmo basado en la teoría de la inversión es posible recuperar el sistema (en este caso, el subsuelo) que generó los datos que se midieron en campo, dados ciertos parámetros iniciales de adquisición. En este trabajo, el algoritmo utilizado es el desarrollado por Loke y Barker (1996), basado en el método de inversión de mínimos cuadrados de Gauss–Newton con restricción de suavizado, para producir un modelo 2D del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente. Este algoritmo además ha sido optimizado para una inversión de una gran cantidad de datos, así como el uso de la memoria disponible para reducir el tiempo de cómputo.

Para poder ingresar los datos adquiridos en este algoritmo de inversión, es necesario que cumplan con ciertas características relativas a su calidad. Para tal efecto, inicialmente se procede a evaluar su continuidad y consistencia a lo largo de todo el perfil. Todo punto que se salga de los parámetros esperados es eliminado para que su inclusión no afecte el proceso de inversión. Una vez que los datos han sido evaluados y aceptados, se procede a invertirlos de acuerdo con los parámetros controlables en el algoritmo citado.

## MODELO DIRECTO E INVERSIÓN 2D

Un algoritmo de inversión contiene una parte de sustancial importancia, el cálculo del modelo directo, pues es necesario para calcular la respuesta del medio y compararla con la que resulta de la modificación de los parámetros a invertir. Para llevar a cabo el cálculo de los valores de resistividad aparente en el modelado directo, el algoritmo de Loke y Barker (1996) usa la técnica de la optimización no lineal de mínimos cuadrados de forma iterativa. Este método de optimización reduce la diferencia entre los valores de resistividad aparente medida y los calculados, y se utiliza el error cuadrático medio para medir esta diferencia. Sin embargo, un error cuadrático medio muy bajo puede, en ciertas ocasiones, presentar grandes variaciones en los modelos del subsuelo que no se correlacionan con un modelo geológico verdadero (Geotomo, 2011).

El algoritmo de mínimos cuadrados de Loke y Baker (1995, 1996) en el que la resistividad aparente puede ser expresada como una serie de Taylor:



$$\rho_a = F(\vec{\rho}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\vec{\rho})}{\partial \rho_k} \delta \rho_k \quad (2)$$

donde  $\rho_k$  es un vector de parámetros de dimensión M conformado por las resistividades verdaderas de cada bloque,  $F(\rho)$  es la función que determina la resistividad aparente.

La diferencia entre la resistividad observada y la obtenida se define como:

$$\delta \rho_{aj} = \rho_a^{obs} - \rho_{aj}^{cal} \quad (3)$$

donde  $\rho_a^{obs}$  es la resistividad observada y  $\rho_{aj}^{cal}$  es la resistividad calculada a partir del modelo.

El error cuadrático se puede escribir como:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N \delta \rho_a = \sum_{j=1}^N (\rho_a^{obs} - \rho_{aj}^{cal})^2 \quad (4)$$

Sustituyendo la resistividad aparente estimada en la ec (2), se tiene:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N \left( \rho_a^{obs} - F(\vec{\rho}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\vec{\rho})}{\partial \rho_k} \delta \rho_k \right)^2 \quad (5)$$

donde N es el número de mediciones.

Lo que se desea es hallar el mínimo error cuadrático respecto al vector de resistividades P, por tanto, derivando se tiene:

$$\frac{\partial E^2}{\partial \delta \rho_1} = 2 \sum_{j=1}^N \left( \rho_a^{obs} - F_j(\rho) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\rho)}{\partial \rho_1} \right) \left( \frac{-\partial F_j(\rho)}{\partial \rho_1} \right) = 0 \quad (6)$$

donde  $j=1, \dots, M$ .

La última ec (6) puede ser expresada matricialmente como (Loke y Barker, 1995):



$$\delta \vec{\rho} = (J^T J' + \lambda C^T C)^{-1} J \delta \vec{\rho}_a \quad (7)$$

Donde  $\lambda$  es el factor de amortiguamiento y  $C$  un filtro de convergencia para minimizar las perturbaciones y aproximarla a un valor constante.

Los elementos de la matriz jacobiana de la ec (7) son de la forma:

$$J_{jk} = \frac{\partial F(\vec{\rho})}{\partial \rho_k} \quad (8)$$

Cuando se calcula el modelo directo, la solución que se tiene es única; sin embargo, cuando se habla de inversión se pueden tener diversas soluciones.

Para realizar la inversión de los datos, el programa de cómputo, elaborado para estos fines, utiliza un modelo que consiste en un cierto número de bloques rectangulares, distribuidos en la pseudo-sección, tratando de cubrir los puntos de atribución según el arreglo electródico escogido.

Para llevar a cabo la inversión de los datos se utilizó el método de diferencias finitas, el cual tiene una mayor velocidad cuando no se utiliza la topografía. En la zona de estudio, el desnivel topográfico es despreciable, por lo que se puede utilizar este esquema sin sacrificar tiempo de cálculo. Según Loke y Barker (1995), el factor de amortiguamiento debe ser elegido lo más pequeño posible, de manera que entre menor sea, la resolución de modelo obtenido será mejor.

## 2) PROCESAMIENTO DE DATOS DE RPT

El procesamiento de perfiles RPT se obtuvo siguiendo un diagrama de flujo, tal como se muestra en la fig 10, utilizando el paquete MatGPR. A partir de los datos de campo se realiza una corrección de posición para eliminar la información de la señal de la superficie del suelo a la antena del RPT; en este proceso de debe seleccionar el número de muestras a eliminar o un intervalo de tiempo (ver fig 11).

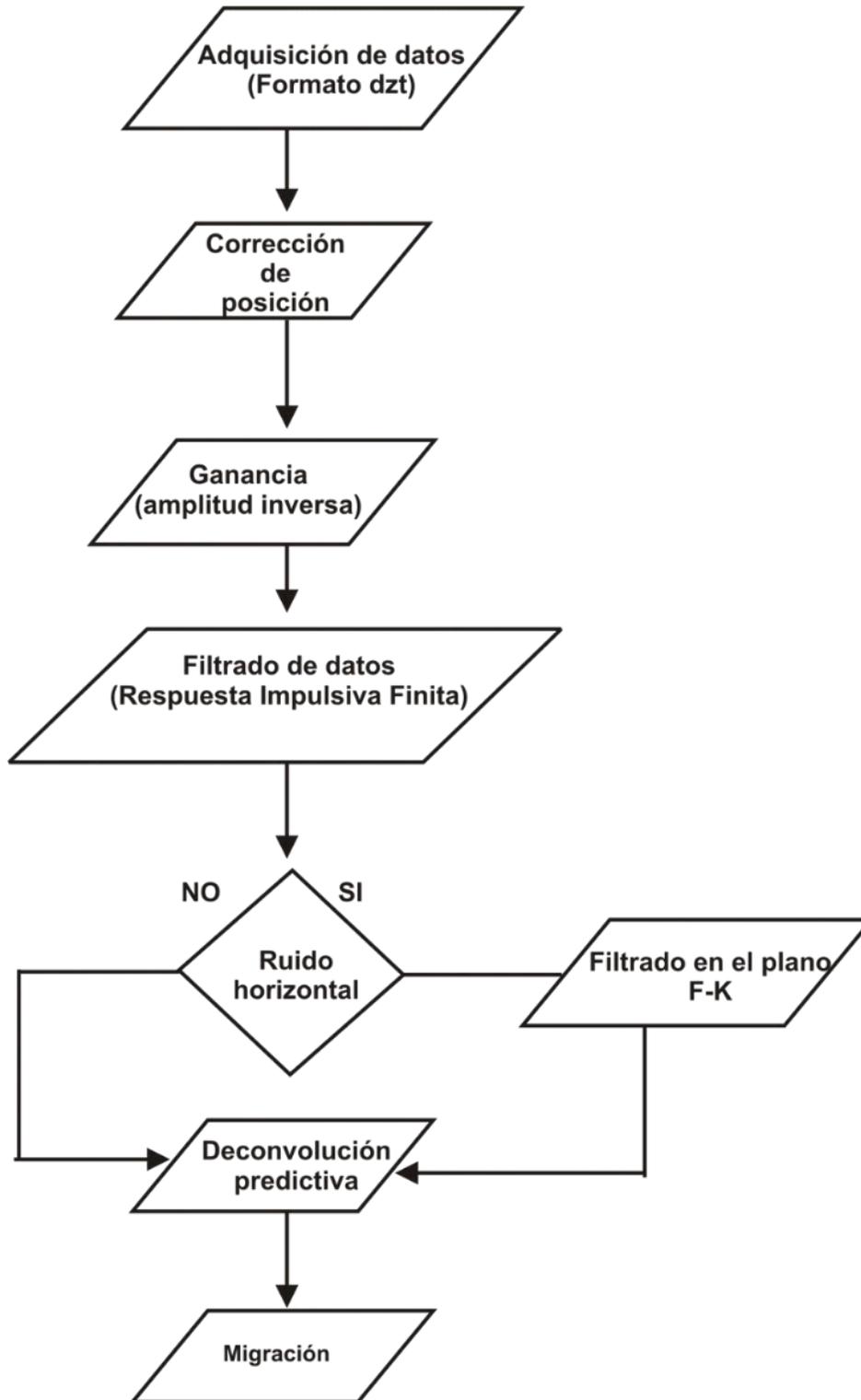
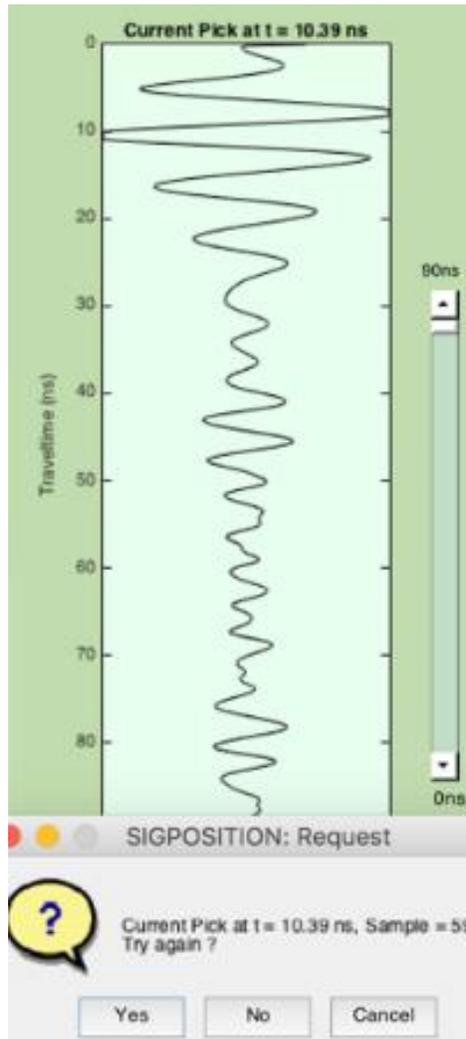
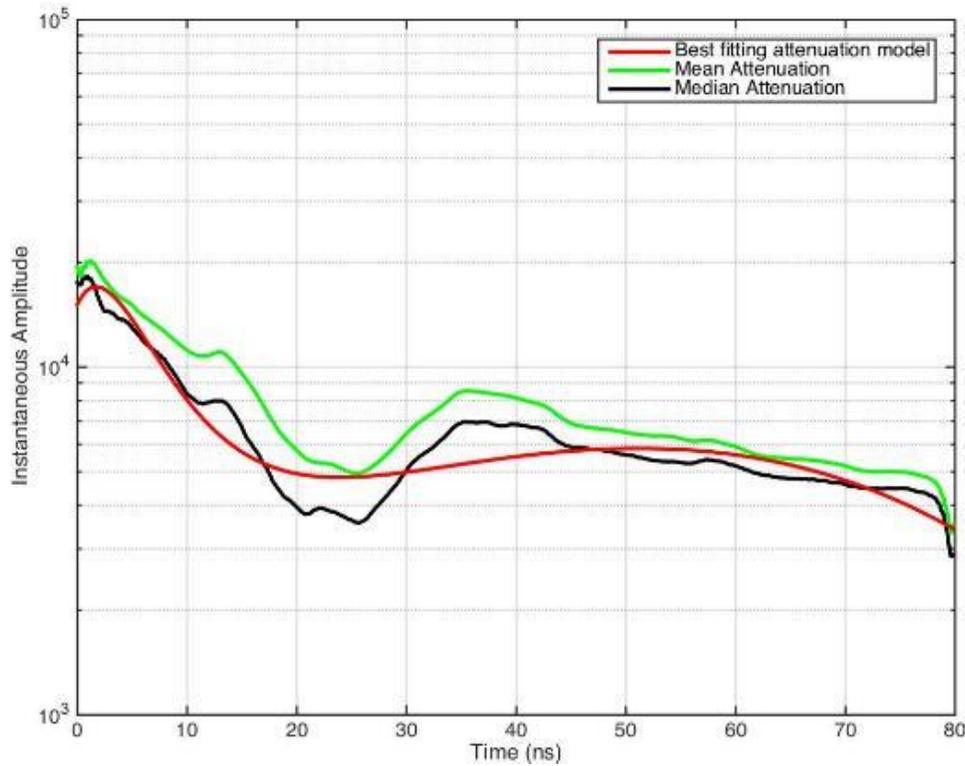


Figura 10. Diagrama de flujo del procesamiento de datos de RPT



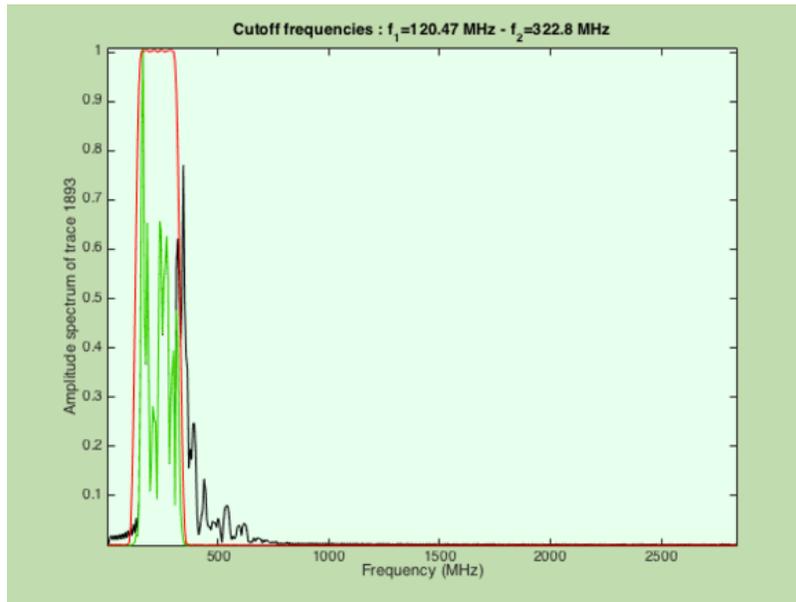
**Figura 11.** Corrección de posición usando MatGPR

Se realiza un proceso de ganancia utilizando una subrutina de amplitud inversa para analizar todas las trazas del perfil y calcular la media y la mediana de la función de atenuación de la amplitud, y determinar la ganancia necesaria para cada muestra en función del tiempo de propagación (fig 12).



**Figura 12.** Ganancia de amplitud inversa utilizando MatGPR

El filtrado de datos se realiza mediante filtros pasa banda mediante la técnica de Respuesta Impulsiva Finita (FIR), se construye una BoxCar en el dominio espectral para realizar las frecuencias de corte (ver fig 13). Si los datos tienen ruidos en el eje horizontal se debe realizar un filtrado en el espacio Frecuencia-Número de Onda (F-K), con la finalidad de atenuar transitorios en el tiempo y altos números de onda en el espacio.



**Figura 13.** Filtrado en el dominio espectral utilizando MatGPR

Los datos de RPT, al penetrar en el subsuelo, realizan una convolución, es decir, la Tierra funciona con un filtro pasa bajas; por lo tanto, es una condición necesaria realizar una deconvolución para regenerar la resolución vertical de las trazas en el tiempo. El proceso utilizado es la deconvolución predictiva, en el cual se estima la longitud del operador convolucionado por medio del periodo de la señal y se estima la autocorrelación que hay entre cada traza.

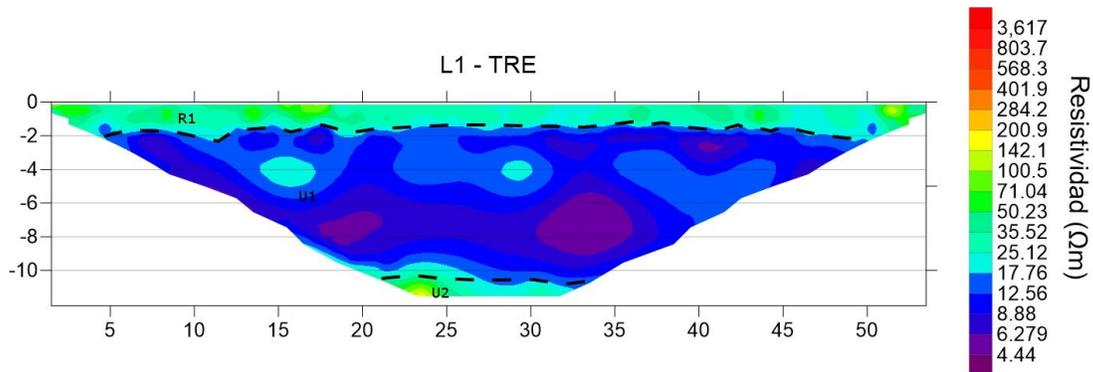
Un proceso opcional, en función de la inclinación de las estructuras geológicas, es la migración. Este proceso lleva a suposición original los reflectores que se desfazaron por las irregularidades topográficas. El proceso utilizado es la migración de Split-Step Fourier, con base en el algoritmo de Stoffa *et al* (1990).

## RESULTADOS

Enseguida se presentan las secciones transversales generadas a partir de los datos adquiridos en campo.

## 1) RESULTADOS TRE

### SECCIÓN L1



**Figura 14.** Tomografía de Resistividad Eléctrica L1

### Descripción de la sección

Esta sección se ve dominada por tres unidades distintas de geometría homogénea lateralmente, una capa superficial de unos 2 metros de espesor, en promedio con valores de resistividad de entre 17 a 100 Ohm-m, unidad R1. Debajo de esta se tiene un espesor de unos 8 m de materiales con resistividades entre 1 y 17 Ohm-m, unidad U1. Debajo de esta se encuentra un basamento resistivo de más de 17 Ohm-m, unidad U2.



## SECCIÓN L2

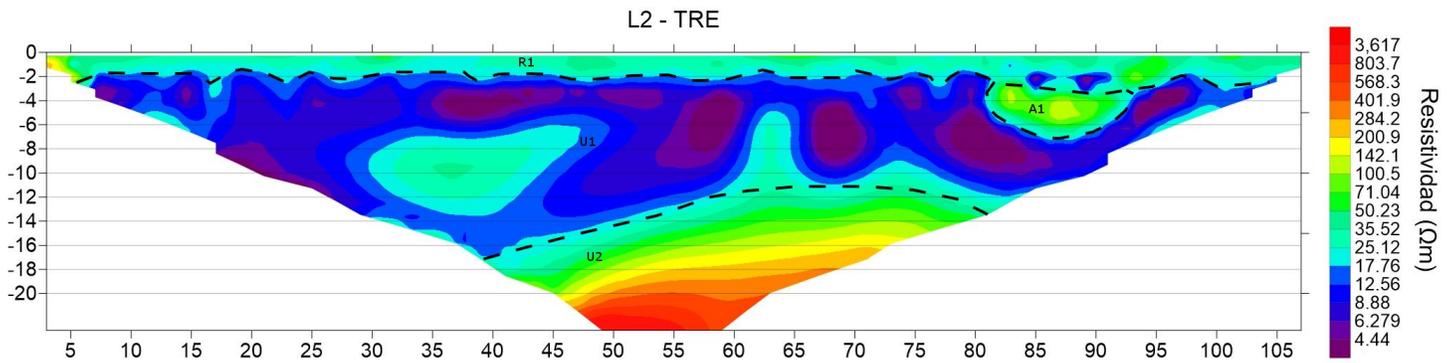


Figura 15. Tomografía de Resistividad Eléctrica L2

### Descripción de la sección

Se observan tres unidades dominantes. La superficial de 2 m de espesor en promedio, con valores de resistividad entre 17 y 300 Ohm-m. Enseguida, debajo de ésta, se encuentran valores de resistividad menores a 17 Ohm-m que corresponden con la unidad U1. Y por debajo de los 12 m de profundidad, aproximadamente, se encuentra un basamento eléctrico con resistividades superiores a los 17 Ohm-m. Además de estas capas continuas lateralmente, se detecta una anomalía (A1) de valores aproximados de resistividad a 100 Ohm-m, y altos respecto a la unidad circundante U1 que se encuentra en la parte superficial derecha del perfil.



## SECCIÓN L3

L3 - TRE

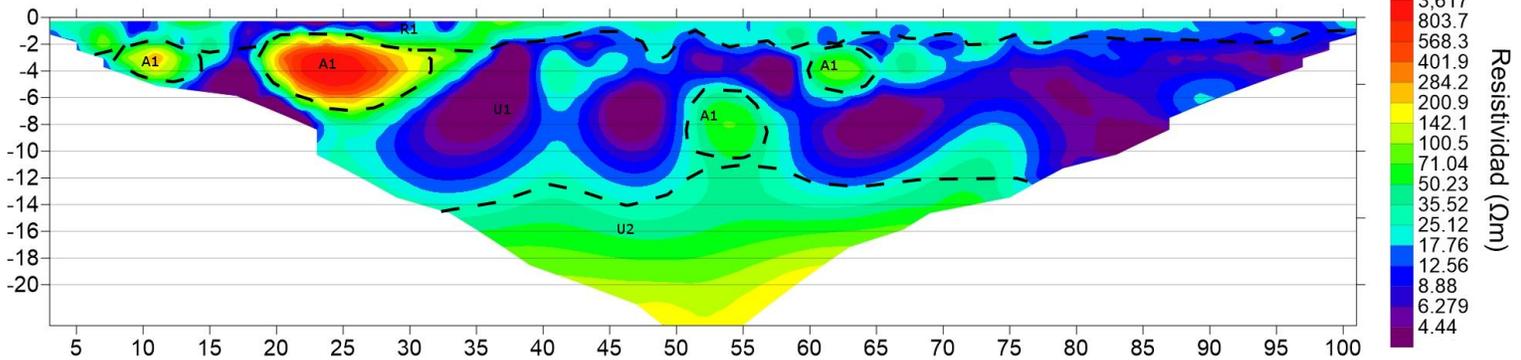


Figura 16. Tomografía de Resistividad Eléctrica L3

### Descripción de la sección

Presenta una capa superior de 2 m de espesor, caracterizada por resistividades superiores a 17 Ohm-m. Con una capa intermedia de 8 m de espesor, identificada como unidad U1, con resistividades menores a 17 Ohm-m; en esta capa se encuentran dispersas anomalías de resistividad señaladas como A1. El basamento eléctrico se detecta en el perfil con resistividades superiores a 17 Ohm-m.



## SECCIÓN L4

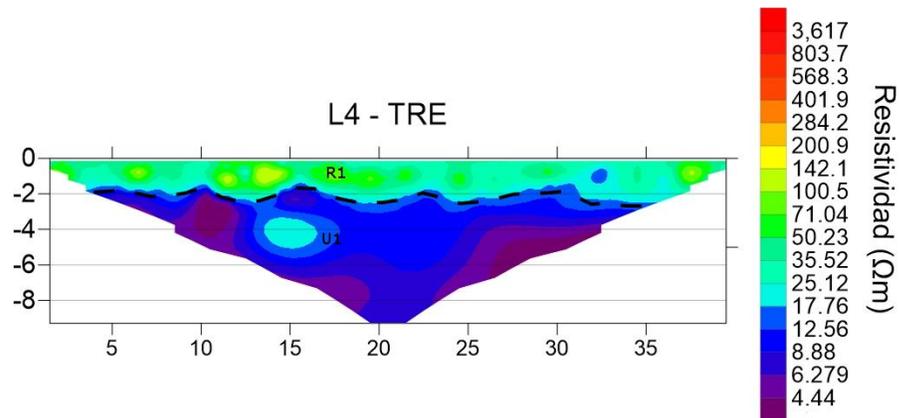


Figura 17. Tomografía de Resistividad Eléctrica L4

### Descripción de la sección

Esta sección es la más corta de todas, su profundidad de investigación fue a los 9 m, aproximadamente. Por esta razón no se alcanzó el basamento eléctrico. Se perciben solamente las unidades superficial R1 e intermedia U1.

## SECCIÓN L5

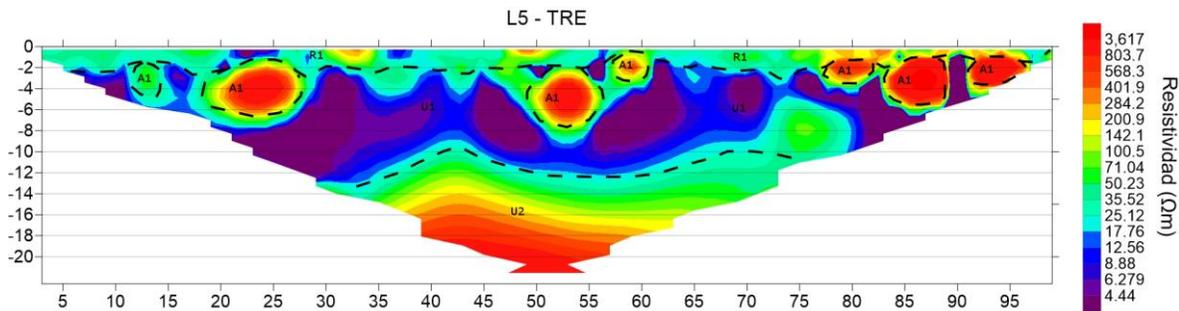


Figura 18. Tomografía de Resistividad Eléctrica L5

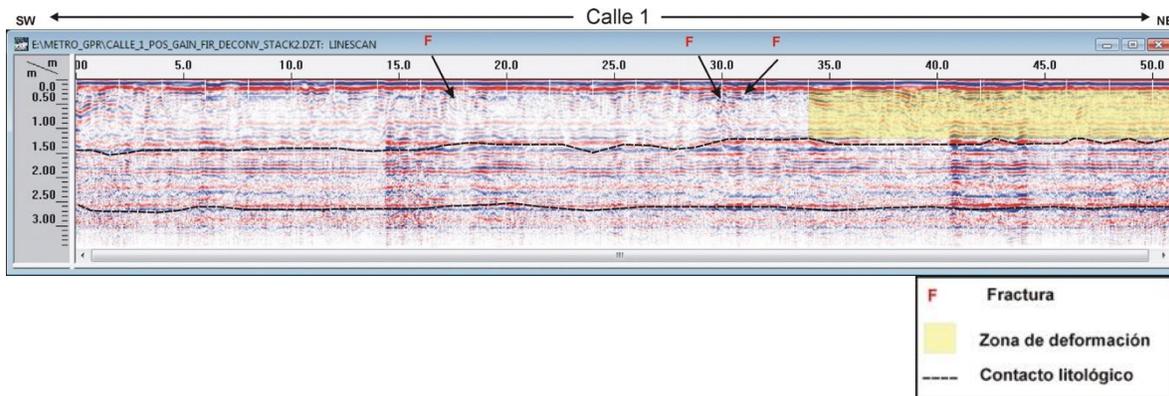
### Descripción de la sección

Esta tomografía cruzó tres calles (Calle 3, Calle 2 y Calle 1, de izquierda a derecha), y, además, pasó enfrente de las casas que presentan daños. Se observan tres unidades eléctricas principales. En la unidad intermedia, la U1, se tienen intercalaciones de cuerpos resistivos A1. Estos cuerpos en su localización coinciden con los cruces de las calles.

## 2) RESULTADOS RPT

### PERFIL 1: CALLE 1 ENTRE CALLE E Y CALLE C

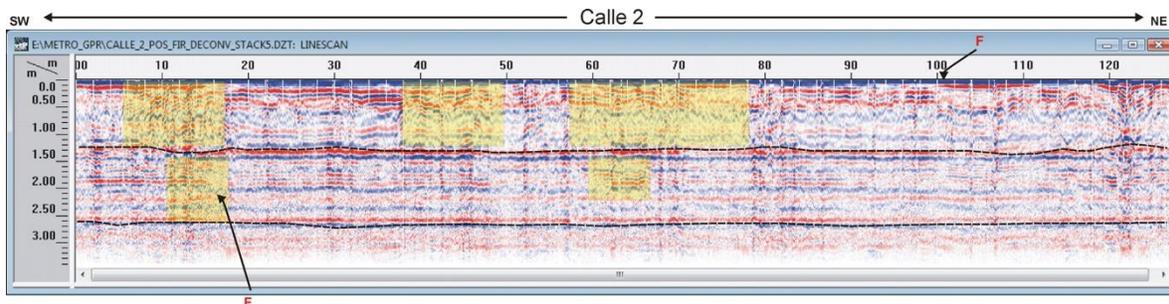
En la Calle 1 se adquirió un perfil RPT con una longitud de 50 metros y orientación SW-NE. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.4 metro y 2.5 metros de profundidad; estos contactos tienen tendencia a ser continuos en el eje de la profundidad, por lo que el espesor de las formaciones se conserva. Se infirieron tres fracturas: la primera a 18 metros de longitud, entre 0.5 a 2 metros en el eje de la profundidad; la segunda se localiza a 30 metros de longitud, se manifiesta en la superficie y se propaga hasta 2.4 metros de profundidad; la tercera se encuentra a 31 metros de longitud y se propaga de 0.3 a 2 metros en el eje de la profundidad. Entre los 34 y 50 metros de longitud se determinó una zona de deformación en la primera formación, aun sin presentar fracturamiento.



**Figura 19.** Interpretación del perfil RPT de la Calle 1

## PERFIL 2: CALLE 2 ENTRE CALLE E Y CALLE 5

Se adquirió un perfil RPT en la Calle 2 con una longitud de 125 metros y orientación SW-NE. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.3 metro y 2.6 metros de profundidad; estos contactos tienden a ser continuos en el eje de la profundidad, por lo que el espesor de las formaciones se conserva. Se determinaron dos fracturas; la primera a 16 metros de longitud, entre 1.5 y 2 metros de profundidad; la segunda a 101 metros de longitud y entre 0.3 a 2.3 metros en el eje de la profundidad. Se infirieron tres zonas de deformación: la primera entre 5 y 17 metros de longitud, propagada en el eje de la profundidad de la superficie a 2.5 metros; la segunda se presenta entre 38 y 50 metros de longitud y el eje de la profundidad se localiza de la superficie a 1.3 metros; la tercera se localiza entre 57 y 77 metros de longitud, y de la superficie a los dos metros de profundidad.



**Figura 20.** Interpretación del perfil RPT de la Calle 2

### PERFIL 3: CALLE 3 ENTRE CALLE E Y CALLE 5

En la Calle 3 se adquirió un perfil RPT con una longitud de 130 metros y orientación SW-NE. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.5 metro y 2.6 metros de profundidad, el primer contacto tiende a ser continuo en el eje de la profundidad, por lo que el espesor de las formaciones se conserva; el segundo contacto presenta un salto a los 122 metros de longitud, de manera que el espesor de la formación es más delgado en esa zona. Se infirieron tres fracturas: la primera a 23 metros de longitud, entre 0.3 a más de 3 metros en el eje de la profundidad; la segunda se localiza a 64 metros de longitud, se manifiesta en la superficie y se propaga hasta 1.5 metros de profundidad; la tercera se encuentra a 68 metros de longitud y se propaga de la superficie a 2.5 metros en el eje de la profundidad. Entre los 19 y 27 metros de longitud se determinó una zona de deformación, presente desde la superficie hasta la máxima profundidad del perfil; entre los 40 y 75 metros de longitud se presenta una zona de deformación, donde una primera parte se propaga de la superficie a 0.7 metros y otra parte de la superficie a la máxima profundidad del perfil (3.2 metros).

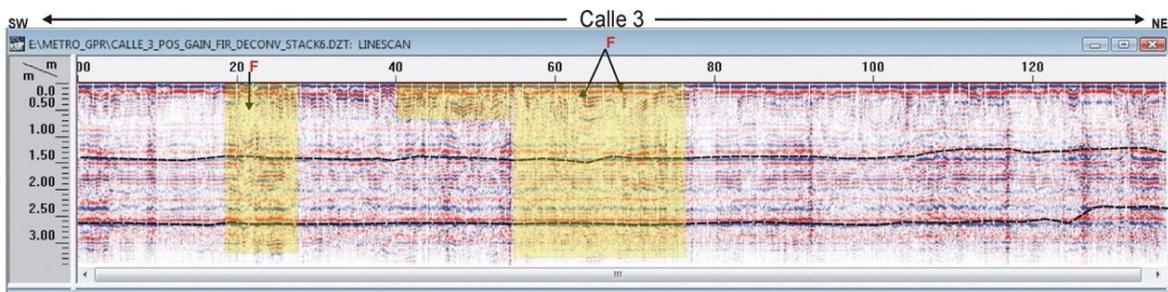
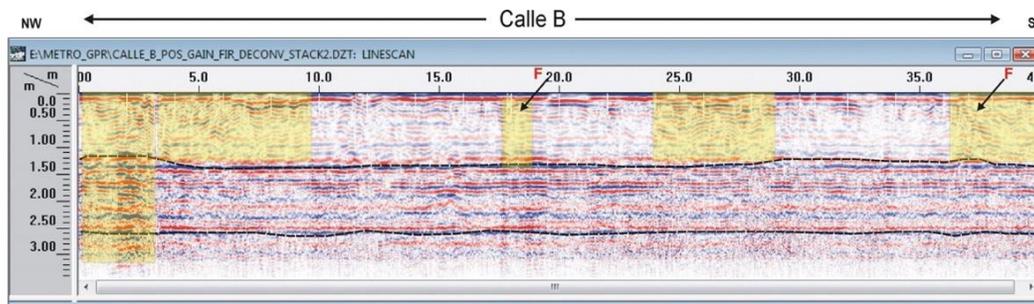


Figura 21. Interpretación del perfil RPT de la Calle 3

### PERFIL 4: CALLE B ENTRE CALLE 2 Y AV. CENTRAL

En la Calle B se adquirió un perfil RPT con una longitud de 40 metros y orientación NW-SE. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.3 metro y 2.6 metros de profundidad, estos contactos tienden a ser continuos en el eje de la profundidad, por lo que el espesor de las formaciones se conserva. Se infirieron dos fracturas: la primera a 18 metros de longitud y se propaga de la superficie a 2 metros, en el eje de la profundidad; la segunda se localiza a 37.5 metros de longitud, se manifiesta en la superficie y se propaga hasta 2.5 metros de profundidad. Se infirieron cuatro

zonas de deformación que se manifiestan en la superficie: la primera entre 0 y 10 metros de longitud, propagada hasta 3 metros de profundidad; la segunda se presenta entre 18 y 19 metros de longitud y se propaga hasta 1.3 en el eje de la profundidad; la tercera se localiza entre 24 y 29 metros de longitud y se propaga hasta 1.3 metros de profundidad; la cuarta se localiza entre 36 y 40 metros de longitud y se propaga hasta 1.3 metros de profundidad.

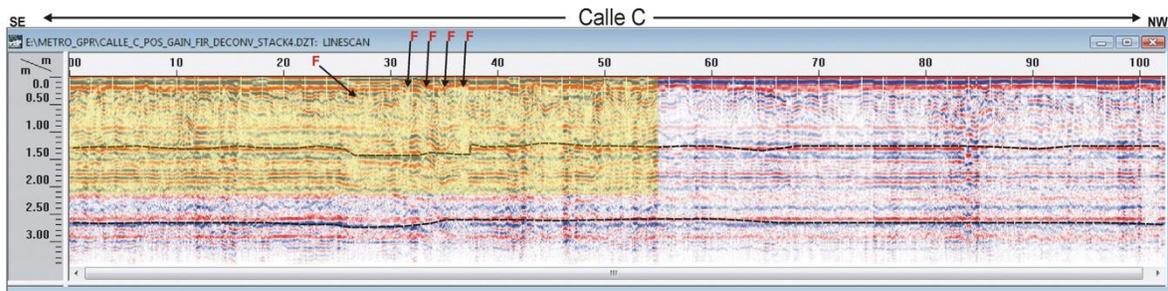


**Figura 22.** Interpretación del perfil RPT de la Calle B

#### **PERFIL 5: CALLE C ENTRE AV. CENTRAL Y CALLE 4**

Se levantó un perfil RPT en la Calle C con una longitud de 102 metros y orientación SE-NW. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.4 metro y 2.5 metros de profundidad; estos contactos tienen tendencia a ser continuos en el eje de la profundidad, por lo que el espesor de las formaciones se conserva. Se infirieron cinco fracturas: la primera a 27 metros de longitud, entre 0.3 a 2 metros en el eje de la profundidad; la segunda se localiza a 31 metros de longitud, se manifiesta en la superficie y se propaga hasta 2.2 metros de profundidad; la tercera se encuentra a 33 metros de longitud y se propaga de la superficie a más de 3 metros en el eje de la profundidad; la cuarta se localiza a 35 metros de longitud y se propaga de la superficie a 2 metros de profundidad; la quinta se localiza a 37 metros de longitud y se propaga de la superficie hasta más de tres metros de profundidad. Entre los 0 y 54 metros de longitud se determinó una zona de deformación en la primera formación de la superficie, a 2.2 metros de profundidad.

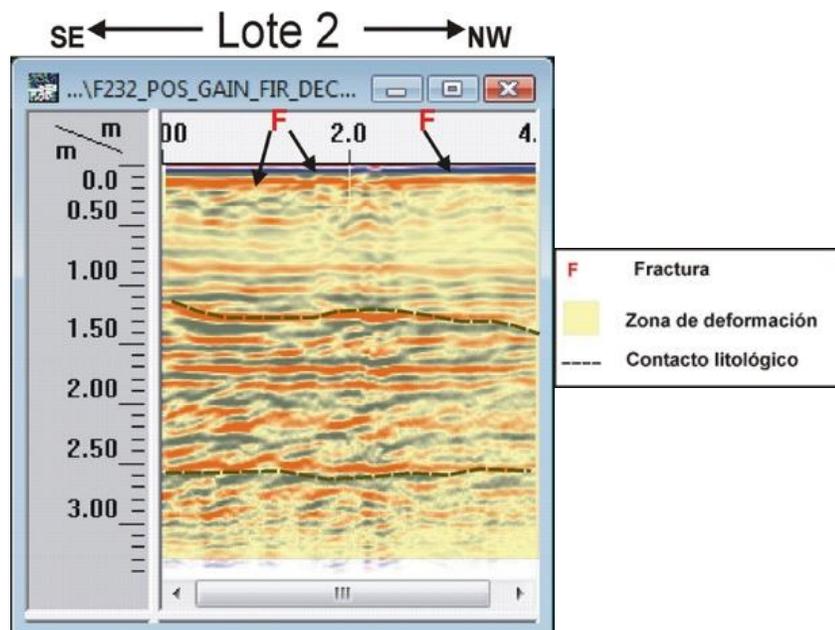
Esta zona presenta un gran contenido de agua entre los 30 y 40 metros de longitud, de la superficie a 2.2 metros de profundidad; esta acumulación de agua probablemente está acelerando el fisuramiento y hundimientos en las zonas cercanas.



**Figura 23.** Interpretación del perfil RPT de la Calle C

### PERFIL 6: CALLE C LOTE 2

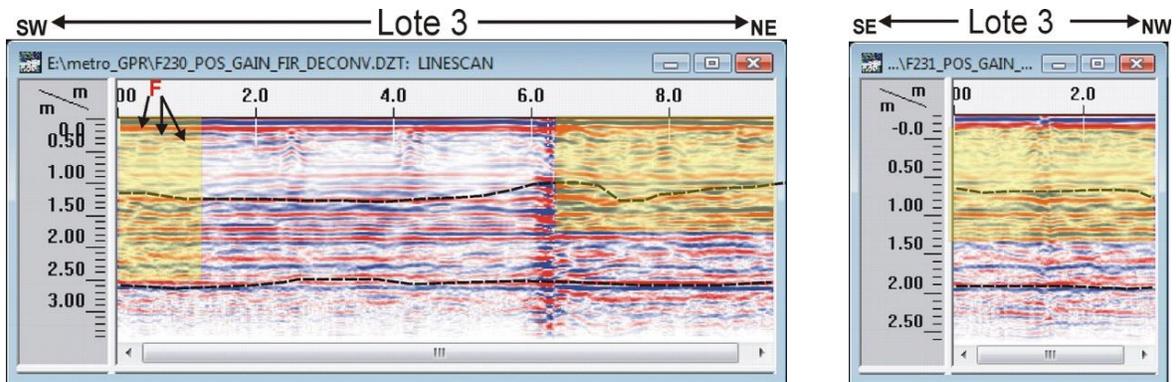
Se adquirió un perfil RPT en el Lote 2 de la Calle C con una longitud de 4 metros y orientación SE-NW. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.1 metros y 2.5 metros de profundidad. Se infirieron tres fracturas: la primera a 1 metro de longitud, entre 0.3 a 1 metros en el eje de la profundidad; la segunda se localiza a 1.6 metros de longitud, se manifiesta en la superficie y se propaga hasta 1.2 metros de profundidad; la tercera se encuentra a 3 metros de longitud y se propaga de 0.1 a 1.7 metros en el eje de la profundidad. En todo el perfil se caracteriza que existe deformación en el subsuelo, además gran contenido de agua entre 1.2 y 2.5 metros de profundidad.



**Figura 24.** Interpretación del perfil RPT del Lote 2 en la Calle C

### PERFILES 7 Y 8: CALLE C LOTE 3

Se adquirieron dos perfiles RPT en el Lote 3 de la Calle C con una longitud de 10 metros y orientación SW-NE, y otro con longitud de 3 metros con orientación SE-NW. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1 metro y 2.5 metros de profundidad. Se infirieron tres fracturas que se localizan entre 0.4 y 12 metros de longitud; estas fracturas profundizan hasta 1.5 metros. En el primer perfil se caracterizaron dos zonas de deformación entre 0 y 1.1 metros de longitud, y de la superficie hasta 2.5 metros de profundidad; otra zona de deformación de localiza entre 6.5 y 10 metros de longitud y se propaga desde la superficie hasta 2 metros de profundidad. En el segundo perfil se determinó una zona de deformación desde la superficie hasta 1.4 metros de profundidad.



**Figura 25.** Interpretación de los perfiles RPT del Lote 3 en la Calle C

### PERFILES 9 Y 10: CALLE C LOTE 4

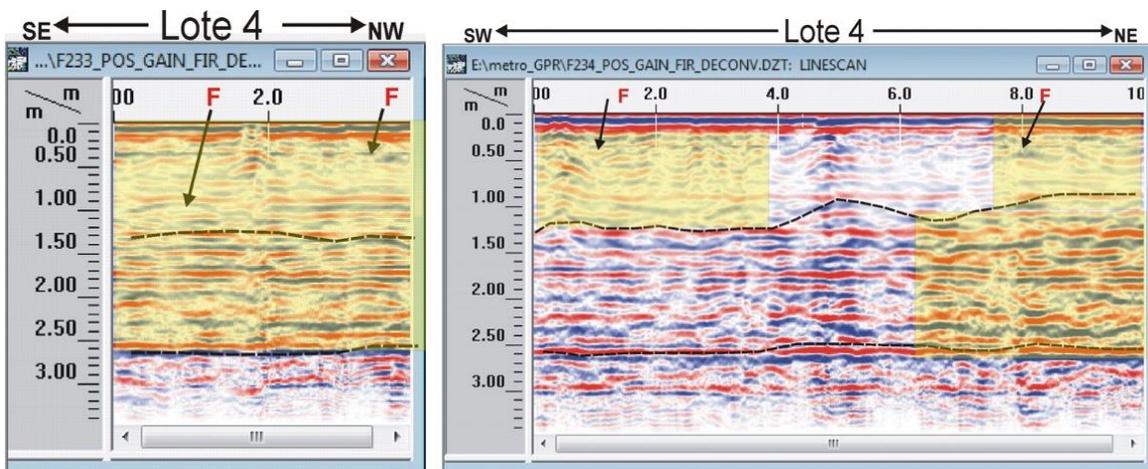
Se adquirieron dos perfiles RPT en el Lote 4 de la Calle C con una longitud de 4 metros y orientación SE-NW, y otro con longitud de 10 metros con orientación SW-NE. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.3 metros y 2.5 metros de profundidad.

Se infirieron dos fracturas para el primer perfil: la primera a 1 metro de longitud, propagándose de 1.5 a más de 3 metros de profundidad; la segunda se localiza a 3.6 metros de longitud y se propaga de la superficie a 2.5 metros de profundidad.

En el primer perfil se determinó que existe deformación en todo el eje de longitud y de la superficie, a 2.5 metros de profundidad.

En el segundo perfil se determinaron dos fracturas: la primera a 1 metro de longitud, propagándose de 0.3 a 2 metros de profundidad; la segunda a 7.9 metros de longitud y se propaga desde la superficie hasta más de 3 metros de profundidad. Se caracterizó la deformación en la zona entre 0 a 4 metros de longitud y de 0.3 a 1.4 metros de profundidad; otra zona de deformación se presenta entre 6.5 a 10 metros de longitud y se manifiesta desde la superficie hasta los 2.5 metros de profundidad.

Entre 1.4 y 2.5 metros de profundidad se localiza acumulación de agua, la cual está probablemente acelerando el proceso de deformación y fisuramiento.



**Figura 26.** Interpretación de los perfiles RPT del Lote 4 en la Calle C

### PERFIL 11: CALLE C LOTE 5

Se adquirió un perfil RPT en el Lote 5 de la Calle C con una longitud de 12 metros y orientación SW-NE. Se caracterizaron dos contactos litológicos a 1.3 metros y 2.6 metros de profundidad. Se infirieron una fractura a 5.5 metros de longitud y entre 0.3 a 2.6 metros en el eje de la profundidad. Se caracterizaron dos zonas de deformación: la primera entre 0 a 1.8 metros de longitud y de la superficie a 1.3 metros de profundidad; la segunda entre 4 a 5.7 metros de longitud, propagándose desde la superficie hasta 2.6 metros de profundidad.

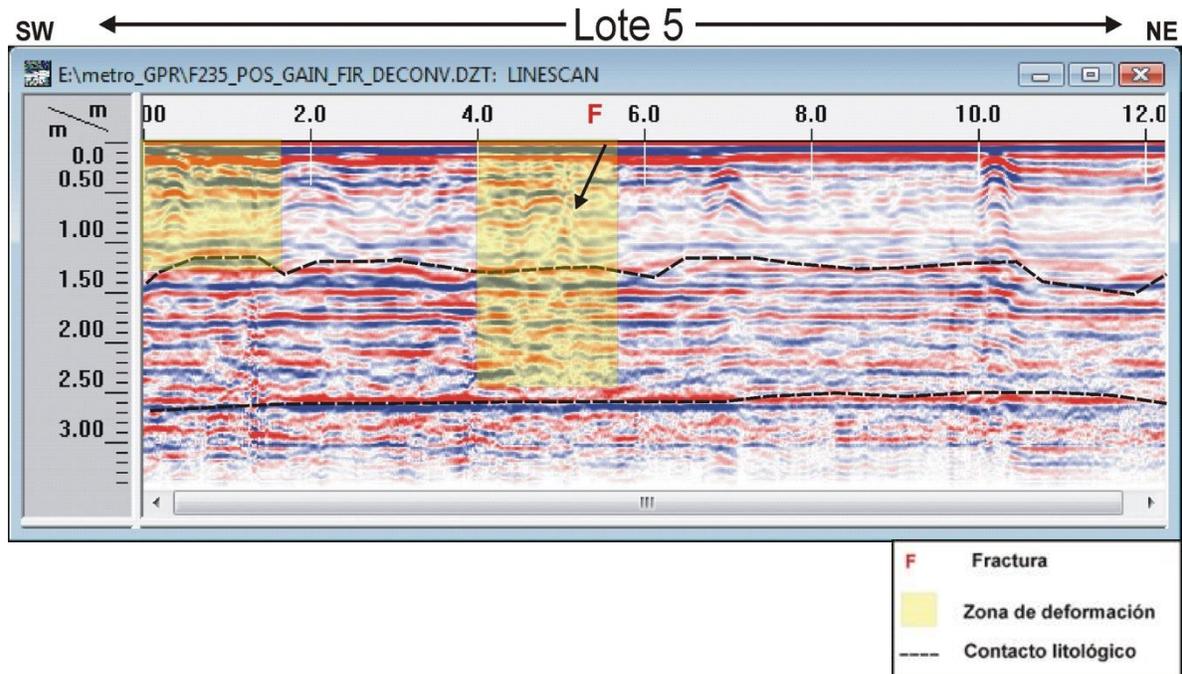


Figura 27. Interpretación de los perfiles RPT del Lote 5 en la Calle C

## INTERPRETACIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS

Al analizar las secciones transversales procesadas, después de hacer comparaciones con ambos métodos, se pudieron detectar coincidencias importantes entre los límites de las unidades eléctricas y los horizontes detectados con el RPT. La sensibilidad a variaciones de las propiedades que tiene el método eléctrico permite definir con mayor precisión la geometría de los materiales y de las unidades; las unidades encontradas principalmente se describen con el método eléctrico y se mencionan a continuación (ver tabla 4).



**Tabla 4.** Descripción de las unidades geoelectricas

<b>Unidad geoelectrica</b>	<b>Resistividad (Ohm-m)</b>	<b>Posible correlación</b>
R1	17 a 200 Ohm-m	Material superficial, relleno reciente, materiales para terraplenes de casas y avenidas.
U1	< 17 Ohm-m	Suelo natural de la zona, sedimentos no consolidados con contenidos variables de saturación (agua).
U2	>17 Ohm m Por debajo de los 8 m de profundidad	Basamento geoelectrico; en perfiles los suficientemente amplios se puede ver como el horizonte homogéneo que tiende a subir su resistividad con la profundidad.
A1	>200 Ohm-m Distribuidas dentro de la unidad U1 y R1	Se encuentran anomalías muy resistivas, y concentradas en diámetros de hasta 10 m.

## VISUALIZACIÓN 3D

Al cruzar la información de manera tridimensional (3D), con la ayuda del croquis de localización, se pudieron observar las ubicaciones de las anomalías con mayor precisión. Además, se logró observar que el primer contacto detectado con el RPT, también era detectado con la interpretación geoelectrica. Desafortunadamente, la profundidad de investigación del RPT solamente permitió correlacionar los primeros 3.5 m de profundidad. A continuación, las figs 28 a 32 muestran los detalles, con base en algunas secciones transversales de las calles 1, 2, 3, B y C.

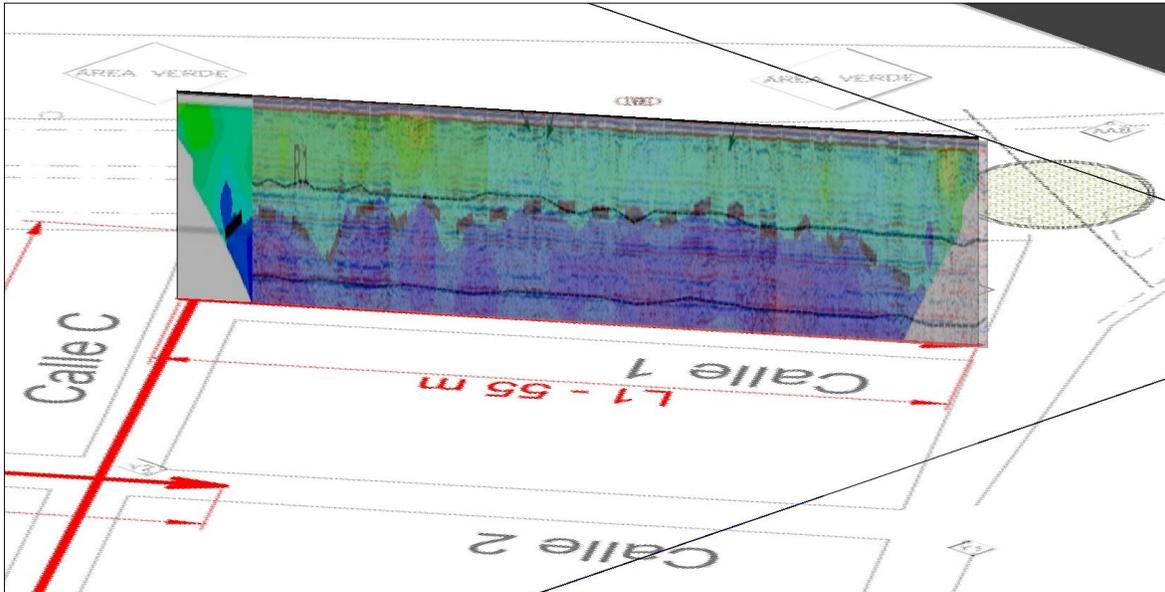


Figura 28. Visualización 3D generada con los dos perfiles sobrepuestos de TRE y RPT, Calle 1

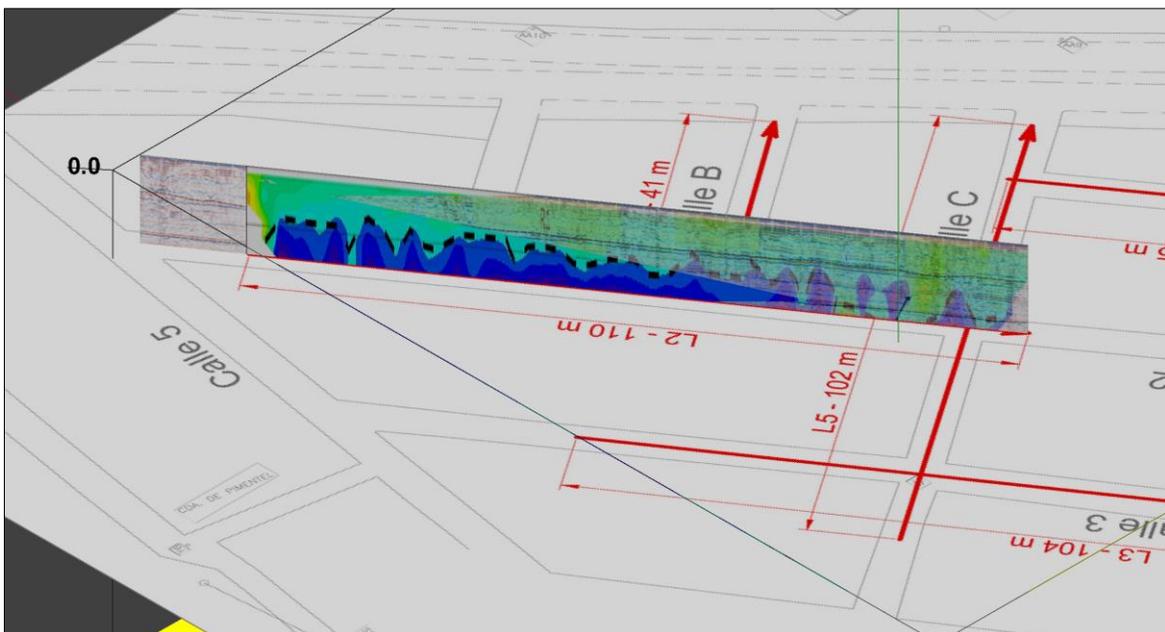


Figura 29. Visualización 3D generada con los dos perfiles sobrepuestos de TRE y RPT, Calle 2

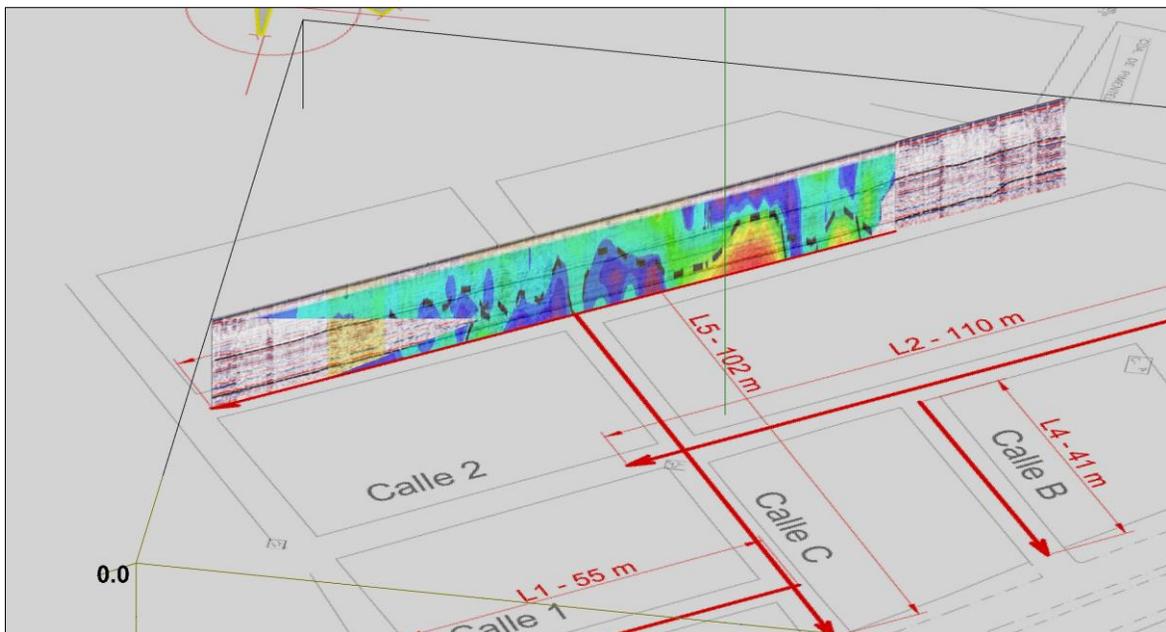


Figura 30. Visualización 3D generada con los dos perfiles de TRE y RPT, Calle 3

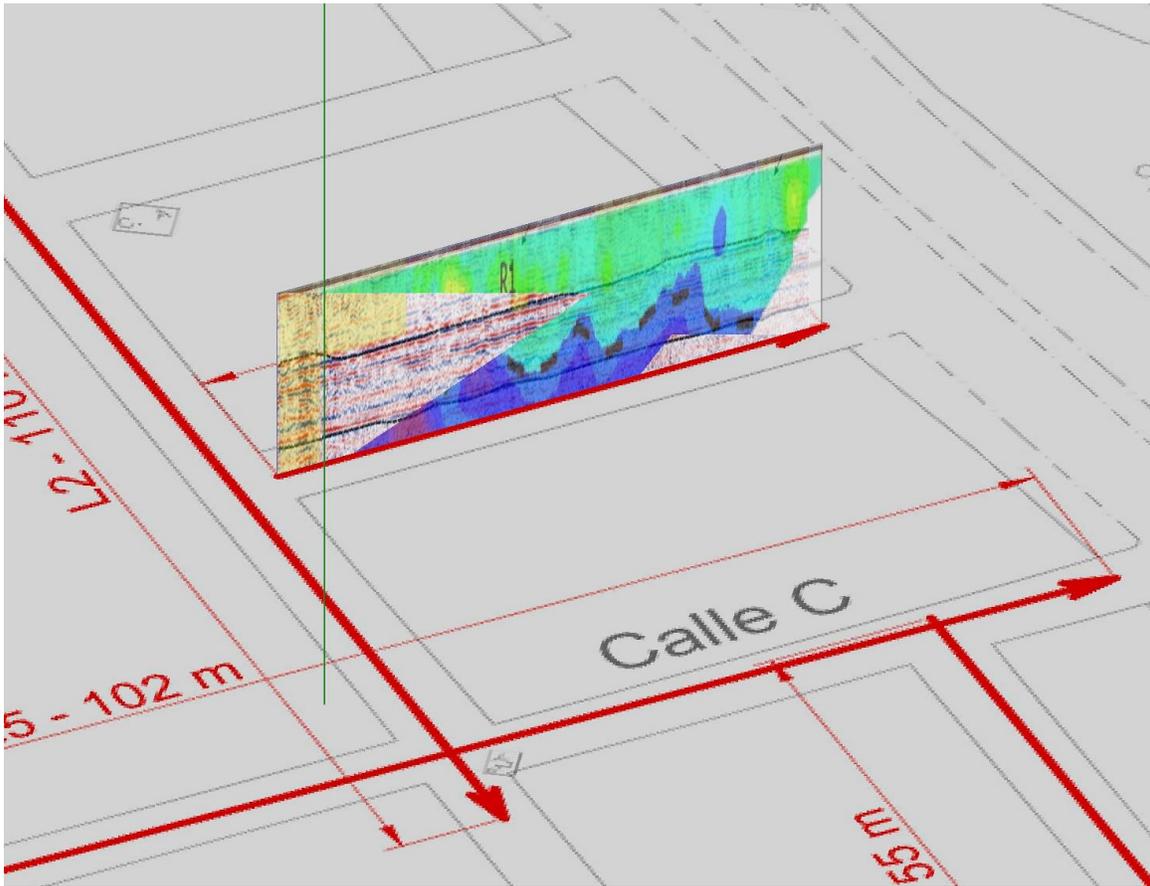


Figura 31. Visualización 3D generada con los dos perfiles de TRE y RPT, Calle B

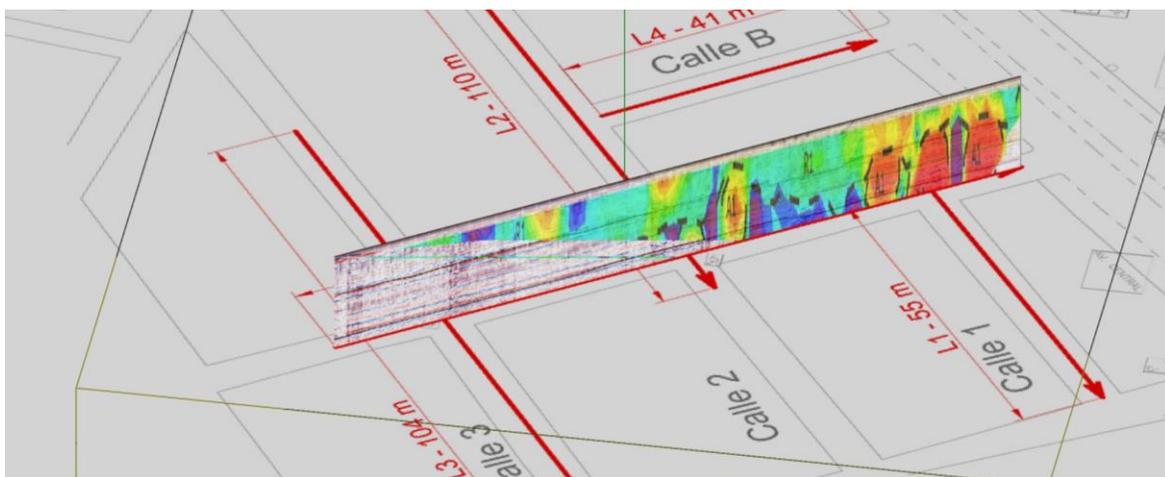


Figura 32. Visualización 3D generada con los dos perfiles de TRE y RPT, Calle C



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con base en los resultados presentados, se puede concluir que la **presencia de cavidades en el subsuelo en la zona de estudio no es evidente**; se encuentran cuerpos de alta resistividad relativa ( $>200$  Ohm-m) que coinciden con los cruces de calles y con coladeras observadas in situ. **Es muy probable que estas anomalías resistivas estén relacionadas justamente con esos sistemas de drenaje.**
- En todos los perfiles eléctricos se observa el horizonte conductor de la unidad U1, y aunque su resistividad es baja en comparación con las otras unidades, dentro de sí, existen variaciones de la resistividad debidas a la integridad del material y a saturaciones (agua) anisotrópicas.
- Al momento del levantamiento, **con el RPT se detectaron grandes contenidos de agua saturando el subsuelo**, tanto en los perfiles realizados al interior de las viviendas y en una sección del perfil de la Calle C, lo que probablemente está acelerando el proceso de deformación y fisuramiento de las viviendas y las zonas aledañas. Es muy posible que esta saturación de agua en las zonas más afectadas se deba a **tuberías rotas o cisternas dañadas.**
- Analizando la comparación de métodos (TRE y RPT) mediante las visualizaciones tridimensionales se pudieron asociar las deformaciones detectadas con el RPT con incrementos de la resistividad en la unidad geoelectrica R1, lo que puede deberse a los efectos de probables asentamientos diferenciales del material arcilloso del terreno más superficial.
- Con base en los antecedentes de la zona estudiada, como presencia de "minas" y "socavones", se recomienda mantener presentes en la toma de decisiones las zonas marcadas en los perfiles como A1, para evitar cualquier inconveniente. Así como también, considerar hacer un muestreo físico de los primeros 2 metros en alguna de las zonas marcadas como "zona de deformación" en los perfiles de RPT, y poder verificar las características de este material.



## REFERENCIAS

Fuentes Menes, Adrián Octavio (2011), Elaboración de un sistema de información geográfica para definir el peligro en las zonas minadas en la delegación Álvaro Obregón, México D.F., Tesis Facultad de Ingeniería de la UNAM

Loke, M H (2004), Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys: Geotomo Software, 12 pág, URL [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)

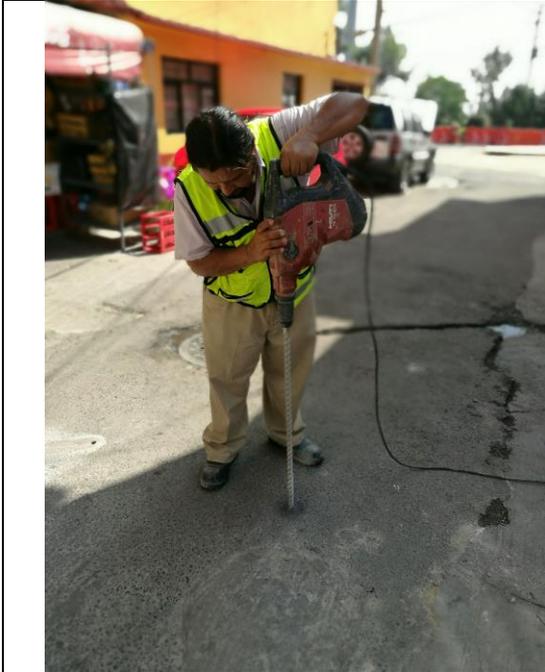
Nabighian N (1988), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Volumen 1, pág 131-141

Orellana Ernesto (1992), Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua (Primera Edición), Paraninfo, Madrid, 574 pág

Stoffa, P L, Fokkema, J T, de Luna Freire, R M & Kessinger, W P (1990), Split-step Fourier migration, Geophysics, 55(4), 410-421



## ANEXO FOTOGRÁFICO



Perforación para estudio TRE



Adquisición Calle 1



Varillas y cable multicanal TRE



Adquisición TRE L1 en Calle 1



Adquisición TRE, Calle B



Adquisición TRE, Calle B



Adquisición TRE, Calle B



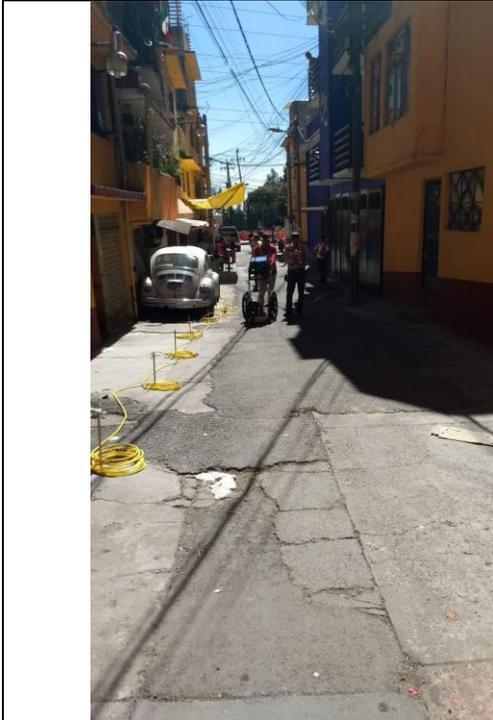
Adquisición TRE, Calle 2



Adquisición RPT, casas dañadas 1



Adquisición RPT, casas dañadas 2



Adquisición TRE y RPT en Calle C



Adquisición RPT, casas dañadas 3



Adquisición RPT, casas Dañadas 4



Adquisición RPT, Calle 1



Adquisición RPT, Calle 1



Adquisición RPT, Calle



Adquisición RPT, Calle B



Adquisición RPT, Calle 2