



Estudio geofísico en la modalidad de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) con la finalidad de identificar estructuras de riesgo geológico, tales como zonas de falla y fractura en el área donde se proyecta la construcción del Metrobús L3 sobre toda la Avenida Cuauhtémoc.

Alcaldía de Benito Juárez, Ciudad de México.

Octubre 2019

Responsable de Proyecto: Ing. Víctor Adrián Hernández

Revisó: Ing. Claudio Lezama Tapia

## Resumen

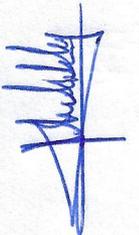
El Sistema de Metrobús tiene proyectado la ampliación y construcción de un nuevo tramo de su red de transporte correspondiente a la actual L3, el cual se localizará sobre toda la Avenida Cuauhtémoc, perteneciente a la Alcaldía de Benito Juárez. En diversos tramos del proyecto se tiene el registro de fracturas y fallas geológicas inferidas sobre las vialidades que cruza el mismo, por lo que se realizó un estudio geofísico para verificar o descartar la presencia de tales fenómenos.

Localmente en el área donde se realizaron los trabajos encontramos la presencia de depósitos de origen aluvial-lacustre constituidos principalmente por arenas finas, gravas, limos, cenizas y arcillas los cuales son susceptibles a presentar zonas de fracturamientos, debido a que están constituidos por estratos arenosos y limo-arenosos que están intercalados con capas arcillosas de origen lacustre, siendo estos primeros el punto de interés, ya que, aunado a la extracción del agua, estos estratos tienden a compactarse y consolidarse, dejando en evidencia las debilidades e irregularidades del subsuelo, generándose fracturamientos notables en superficie.

Se llevaron a cabo estudios de exploración geofísica en la modalidad de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) los cuales fueron desplegados sobre las avenidas y calles circundantes de gran importancia para los propósitos planeados; considerando cumplir con los requerimientos y alcances propuestos, logrando cubrir una extensión aproximada de 978 metros lineales y aunado a la abertura establecida (3 m) para cada uno de los arreglos, se alcanzaron profundidades de exploración indirecta promedio de 31.9 metros, una vez realizado el proceso de inversión de datos.

Los resultados muestran tres unidades estratigráficas: la primera se ubica en la parte superficial y se asocia a un depósito de arenas finas con intercalaciones de gravillas, limos y arcillas, la segunda está asociada a un depósito lacustre de matriz arcillosa con diferente porcentaje de contenido de agua; mientras que la tercera corresponde a un depósito areno-limoso.

Se identificaron doce (12) zonas de contacto susceptibles a fracturamientos, además de una anomalía resistiva, por lo cual, se recomienda realizar un Sondeo Mecánico para verificar y corroborar las condiciones del material a profundidad y con el fin de descartar la presencia de alguna estructura geológica de riesgo que pudiera afectar la seguridad e integridad de la obra civil a construirse. Así mismo, se hace hincapié a seguir las recomendaciones expuestas en el presente trabajo y en el estudio de mecánica de suelos, para evaluar las condiciones y propiedades específicas de los materiales encontrados a profundidad y descartar riesgos mayores para el proyecto constructivo.



## Índice

No.	Capítulo	Página
	RESUMEN	II
1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1.	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	5
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.	METODOLOGÍA	9
2.1.	INSTRUMENTACIÓN	10
2.2.	CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	11
3.	RESULTADOS	16
3.1	RESULTADOS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	16
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	23
5.	ANEXOS	32
A-	MARCO TEÓRICO	32
B-	PLANO NO. 1	32
C-	ANEXO FOTOGRAFICO	32
	C-ÁLBUM FOTOGRAFICO	40

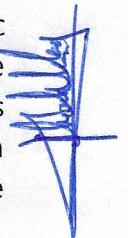
## 1. Introducción

Las obras civiles construidas en la Ciudad de México se encuentran asentadas sobre una zona de transición entre materiales volcánicos y sedimentarios (depósitos aluviales y lacustres), siendo estos segundos de interés para la zona de estudio, puesto que dichos depósitos tienden a intercalarse entre sí, formando zonas de contacto entre materiales de distinta granulometría, susceptibles a generar zonas de hundimiento y fracturamiento que pueden poner en peligro las construcciones previstas.

Aunado al crecimiento exponencial de la sociedad, hoy en día los requerimientos de esta necesitan solventarse; por lo cual, se precisa dar cierta certidumbre a las obras civiles, y con ello, proteger el capital invertido.

En base a lo anterior, la Geofísica ha desarrollado múltiples metodologías de comprobación indirecta, siendo el método de tomografía eléctrica en la modalidad de Dipolo-Dipolo el más eficaz, preciso y rápido para evaluar las condiciones del subsuelo y verificar la presencia o ausencia de estructuras de riesgo geológico tales como: fallas, fracturas, asentamientos, cavidades, etc.; que pudieran poner en riesgo la seguridad e integridad el proyecto constructivo.

Con la finalidad de cumplir con los requerimientos y alcances propuestos, a lo largo de las avenidas y calles principales, circundantes a la Avenida Cuauhtémoc se realizó un estudio geofísico del subsuelo con el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) estudio que incluyó la investigación de 978 m lineales en seis (6) líneas con arreglo Dipolo - Dipolo. Utilizando aberturas de 3 m para todas las líneas para alcanzar profundidades de exploración indirecta promedio de 31.9 m.



## 1.1. Justificación del proyecto

La finalidad del presente estudio es el determinar las condiciones litológicas y la presencia de fracturas y fallas geológicas inferidas sobre las vialidades que conforman el proyecto de ampliación y construcción del nuevo tramo correspondiente a la actual L3 del Sistema de Metrobús, por tal motivo, se realizó un estudio geofísico en la modalidad de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) para descartar la presencia de estructuras geológicas de riesgo que pudieran afectar la seguridad e integridad del proyecto constructivo. Lo anterior debido a que la zona de estudio se encuentra cercana a dos fallas geológicas y zonas de fracturamiento, las cuales están señaladas en el Atlas de Riesgos de la Ciudad de México y Atlas Nacional de Riesgo.

## 1.2. Planteamiento del problema

Las avenidas y calles donde se pretende construir el nuevo tramo correspondiente a la actual L3 del sistema de Metrobús pertenecen a la Alcaldía de Benito Juárez, Ciudad de México, tal como lo muestra la Figura No. 2.1. Específicamente, los trabajos realizados se llevaron a cabo en las Avenidas: Cuauhtémoc, Popocatepetl, División del Nte., Universidad y Calle San Borja, cubriendo un área que se delimita por las coordenadas UTM con el DATUM WSG-1984 14Q 482,795 a 483,560 m Este y 2'141,132 a 2'143,280 m Norte.

De manera regional y en base a la Carta Geológica Ciudad de México (E14-2) Escala 1:250000, Edición 2002, el área de estudio se encuentra ubicada sobre una zona de transición entre materiales volcánicos y depósitos aluviales y/o lacustres, así mismo, se tiene el registro de fracturas y fallas geológicas inferidas que atraviesan la ciudad de norte a sur.

Localmente en el área donde se realizaron los trabajos encontramos la presencia de depósitos de origen aluvial-lacustre constituidos principalmente por arenas finas, gravas, limos, cenizas y arcillas (Figura No. 1.2.).

Estos depósitos son susceptibles a presentar zonas de fracturamientos, debido a que están constituidos por estratos arenosos y limo-arenosos que están intercalados con capas arcillosas de origen lacustre, siendo estos primeros el punto de interés, ya que, aunado a la extracción del agua, estos estratos tienden a

compactarse y consolidarse, dejando en evidencia las debilidades e irregularidades del subsuelo, que con el tiempo, dicho efecto comienza a propagarse e incluso puede ser notable en superficie.

A su vez, como estos depósitos tiene una composición distinta (granulométricamente), existen ocasiones en las que estas zonas de debilidad son provocadas por contactos litológicos entre estas unidades, convirtiéndose en planos de debilidad, con un grado distinto de afectación en las zonas de transición o pie de monte, montañas o planicies, por ende, es importante caracterizar a estas unidades.

En base a lo anteriormente descrito y a los requerimientos del solicitante, se optó por escoger la técnica mas competente que pudiera cubrir los objetivos planteados inicialmente; dicha técnica consiste en las imágenes de resistividad con arreglo dipolo-dipolo, método de alta resolución y susceptible a identificar cambios bruscos laterales y/o verticales los cuales se relacionan a cambios específicos en la granulometría y se asocian a zonas de contacto, fracturamientos, oquedades, fallas y asentamientos diferenciales.

**NOTA:** Los fundamentos teóricos de la técnica Geofísica utilizada para llevar a cabo la adquisición de los datos, se describe en el Anexo A.



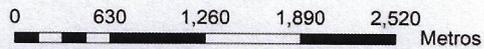
**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



**SIMBOLOGIA**

 **ÁREA DE ESTUDIO**

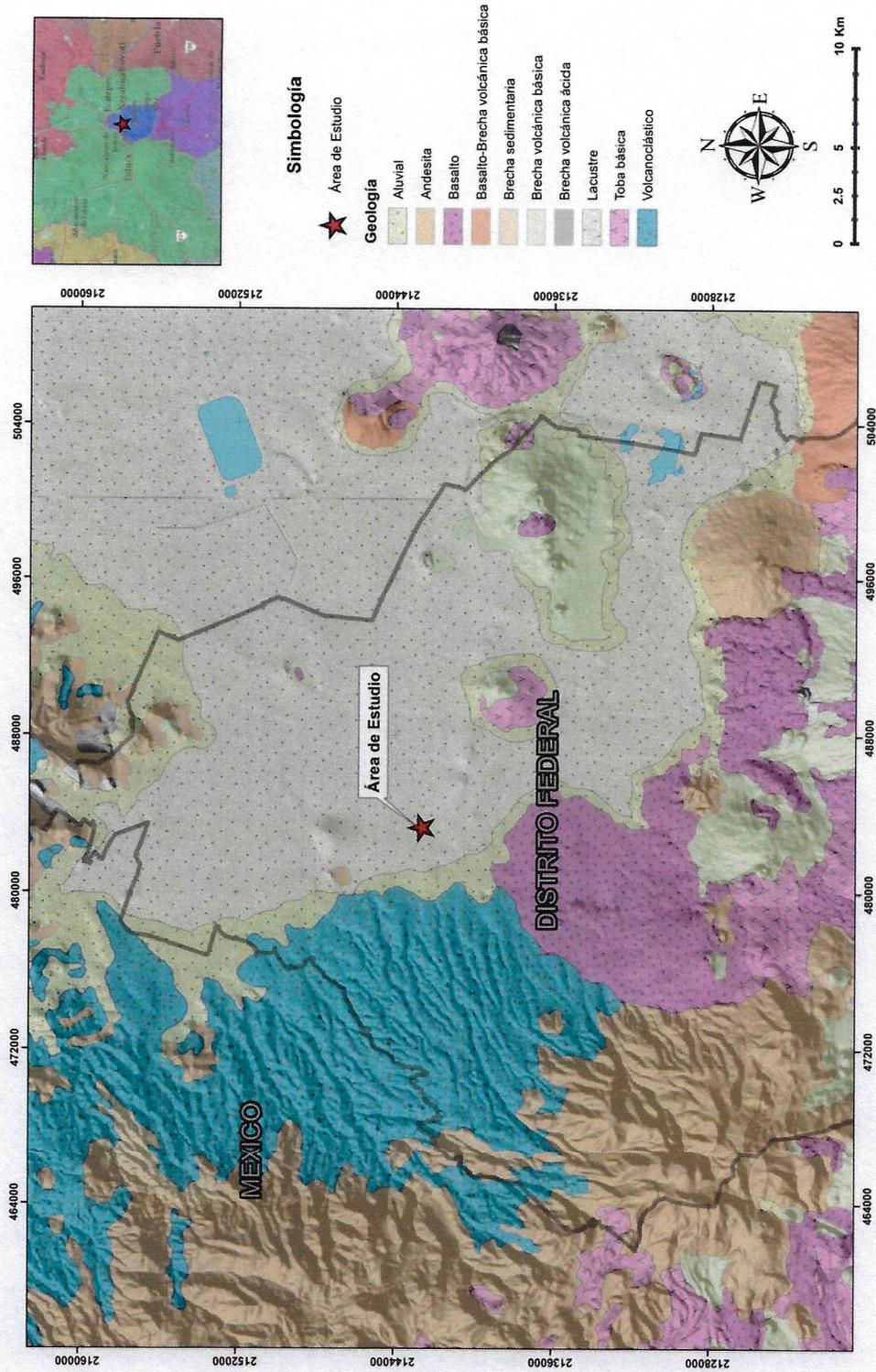


**Figura No. 1.1 Área de estudio.**

Oficina: Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México

Teléfonos: Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957

[www.georadarypolimeros.com](http://www.georadarypolimeros.com)



**Figura No. 1.2** Área de estudio en el contexto geológico.

*[Handwritten signature]*

## 2. Metodología

Para poder desarrollar el proyecto se llevaron a cabo las siguientes etapas:

1. *Recopilación de información:* con base en la ubicación del sitio de estudio, se verificó la existencia de estudios previos y cercanos que permitan conocer la distribución de las unidades geológicas del sitio. Esta etapa también con lleva a realizar un análisis de la geología local para determinar la respuesta del método geofísico aplicado. Esto permite diseñar o realizar modificaciones en la adquisición de datos.
2. *Adquisición de datos:* para realizar la evaluación del problema planteado, se aplicó un método de prospección geoelectrica basado en la distribución de propiedades eléctricas del suelo (resistividad principalmente). La adquisición se realizó mediante imágenes de resistividad utilizando un arreglo dipolo-dipolo para obtener perfiles en dos dimensiones.
3. *Evaluación y procesado de datos.* se realiza una primera evaluación de datos, generando un modelado directo (datos completos, sin filtrar) para determinar el procedimiento más adecuado para realizar la selección de datos. En esta etapa se determina la calidad de la información adquirida en campo.
4. *Modelado de datos.* utilizando programas especiales se realiza un procedimiento matemático que permita obtener un modelo descriptivo del área de estudio. Este procedimiento no es único, es necesario realizar varias interacciones hasta obtener un modelo estadístico, ajustable y representativo de las características geológicas del sitio.
5. *Integración e interpretación.* considerando la información recopilada y los modelos obtenidos con la técnica empleada, se correlacionan los resultados, identificando las unidades litológicas en base a los diferentes cambios de tonalidades, los cuales representa determinados rangos de valores de resistividad.
8. *Conclusiones y recomendaciones.* analizando los resultados, se hace una evaluación geoelectrica que permita caracterizar de manera satisfactoria las unidades del subsuelo y de esta forma generar las conclusiones y recomendaciones más adecuadas del predio estudiado, que finalmente soluciones o mitiguen la problemática planteada.

## 2.1. Instrumentación

El instrumento utilizado para realizar la adquisición de datos eléctricos consta de lo siguiente:

La adquisición de datos de Tomografía Eléctrica se realizó por medio de un equipo de Resistividad Super Sting R8 Automático, Marca AGI. Este equipo cuenta con un transmisor interno de 200 W, con una capacidad de 1 a 2000 mA como fuente de campo eléctrico. El equipo se alimenta con un generador Honda 2000. El Super Sting R8 cuenta con un multiplexor que permite la adquisición de manera simultánea de hasta 8 electrodos, optimizando los tiempos de levantamiento de campo, como puede apreciarse en la Figura No. 2.1.



**Figura No. 2.1** Equipo de Exploración geoelectrica.

## 2.2. Campaña de exploración geofísica

Para la campaña geofísica se realizaron seis (6) líneas de tomografía eléctrica en las avenidas y calles circundantes, considerando cumplir con los requerimientos y alcances propuestos, las cuales fueron distribuidas como se puede apreciar en las Figuras No. 2.1, 2.2 y 2.3.

Las líneas de tomografía eléctrica se realizaron con el arreglo dipolo-dipolo, utilizando aberturas entre electrodos de 3 m; dichas líneas fueron realizadas en pares, de acuerdo con las peticiones solicitadas y en determinadas áreas de interés, como se explica a continuación: para el primer conjunto, la Línea 1 tiene su inicio sobre Av. Cuauhtémoc esquina con Av. Popocatepetl y se extiende a lo largo de la Av. Cuauhtémoc, con una orientación S-N, mientras que la Línea 2 tiene una orientación W-E, inicia sobre Av. Popocatepetl casi esq. con Calle San Felipe y finaliza sobre la misma Av. Popocatepetl esq. con Calle Cda. Tenayuca como se puede observar en la Figura No. 2.1; en el segundo grupo, las dos líneas se distribuyeron de manera paralela, con una orientación S-N, siendo ubicada la línea 1 sobre Av. División del Nte y se extiende hasta terminar sobre Av. Universidad, en cambio, la línea 2, se despliega sobre Av. Universidad y se prolonga hasta acabar sobre Av. Universidad esq. con Av. División del Nte; como se aprecia en la Figura No. 2.2. Finalmente, para el último par, la línea 1 se efectuó desde la Av. Cuauhtémoc casi esq. con Av. Eje 6 Sur (Angel Urraza) y tuvo su final en Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja, es decir, con una orientación S-N, por el contrario, la línea 2 tiene orientación W-E, siendo su inicio ubicado sobre la Calle San Borja casi esq. con Calle Anaxágoras y se prolonga hasta culminar en Calle San Borja esq. con Yacatas, dicha distribución se visualiza en la Figura No. 2.3.

Con lo anteriormente descrito, se logró cubrir una extensión aproximada de 978 metros lineales y aunado a la abertura establecida (3 m) para cada uno de los arreglos, se alcanzaron profundidades de exploración indirecta promedio de 31.9 metros, una vez realizado el proceso de inversión de datos.

Las coordenadas UTM de inicio y final de cada una de las líneas (separadas en los grupos antes mencionados) se puede apreciar en la tabla No. 2.1, así como la extensión cubierta de manera individual por cada una de las líneas.



Sistema Mercator WGS-1984 UTM (14Q)					
No. de línea	Inicio de la línea		Final de la línea		Longitud (m)
	X	Y	X	Y	
<b>Av. Cuauhtémoc - Av. Popocatepetl.</b>					
1	482908	2141201	482943	2141359	162
2	482846	2141227	482999	2141166	165
<b>Av. División del Nte - Universidad.</b>					
1	483320	2142686	483355	2142843	165
2	483184	2142697	483248	2142846	162
<b>Av. Cuauhtémoc - Calle San Borja.</b>					
1	483347	2143040	483392	2143193	159
2	483335	2143223	483496	2143185	165



**Tabla No. 2.1** *Coordenadas UTM de los perfiles de resistividad.*



**Figura No. 2.2 Localización de las líneas de tomografía eléctrica sobre Av. Cuauhtémoc – Av. Popocatepetl.**



**Figura No. 2.3** Localización de las líneas de tomografía eléctrica sobre Av. División del Nte - Av. Universidad.



**Figura No. 2.4 Localización de las líneas de tomografía eléctrica sobre Av. Cuauhtémoc – Calle San Borja.**

Oficina: Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México  
 Teléfonos: Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957  
[www.georadarpolimeros.com](http://www.georadarpolimeros.com)

### 3. Resultados

Primeramente, se evaluó la calidad de los datos de campo en crudo obtenidos mediante la técnica de tomografía eléctrica, posteriormente, se realizó la interpretación y se generaron modelos representativos, los cuales muestran la distribución de la resistividad del subsuelo en base a una escala de colores, dichos cambios se asocian a una litología, de acuerdo con la geología de la zona.

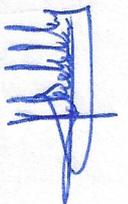
La inversión de los datos de tomografía eléctrica permite identificar las estructuras en su posición y dimensión más cercana a la realidad, reconociendo cambios bruscos ya sea laterales o verticales, asociados a zonas de contacto y fracturamiento. Este procedimiento no es único, es decir, existen muchos modelos de inversión matemáticamente ajustables, no obstante, se deben realizar varios modelos para encontrar uno, el más adecuado con la geología del sitio y a las observaciones de campo.

#### 3.1 Resultados de tomografía eléctrica

Con el procesamiento y análisis de los datos de tomografía eléctrica se obtuvieron seis modelos de resistividad, los cuales tienen un rango de resistividad de 0.2 a 200 Ohm-m. Se registran tres unidades litológicas, fácilmente identificables con el cambio de tonalidades de acuerdo con la escala de colores utilizada, las cuales se describen a continuación:

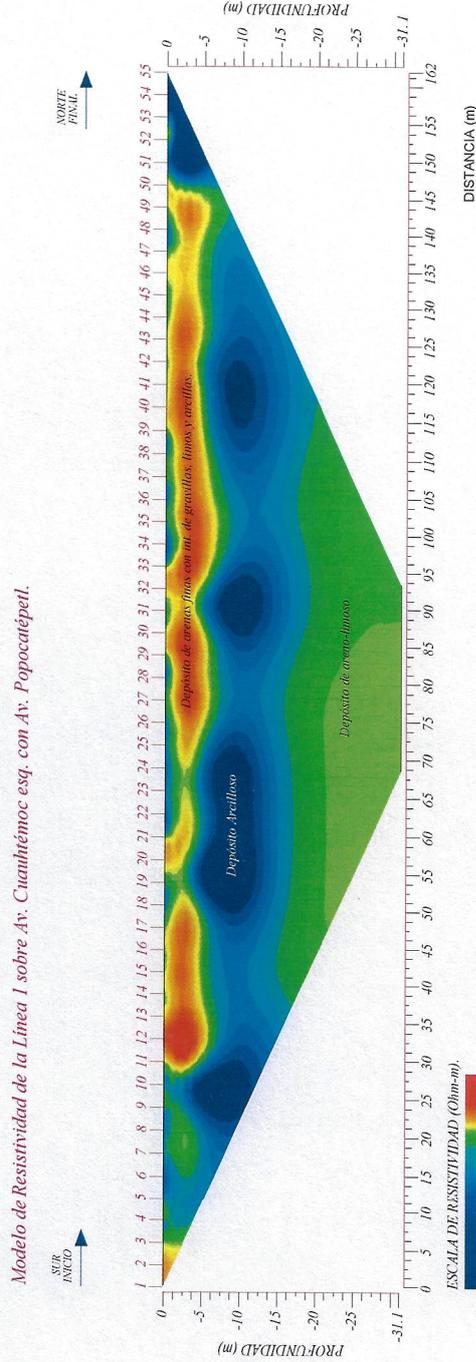
- Las tonalidades azules-cian abarcan un rango de resistividades de 0.2 a 20 Ohm-m, y estratigráficamente se correlacionan a un depósito lacustre de matriz arcillosa con diferente porcentaje de contenido de agua.
- Las tonalidades verdes y amarillas suaves abarcan un rango de 21 a 75 Ohm-m, y se relacionan en profundidad con un depósito de matriz areno-limosa.
- Las tonalidades amarillo-anaranjadas y rojas tienen resistividades de 76 a 200 Ohm-m las cuales se pueden notar en la parte superficial y se asocian a un depósito de arenas finas con intercalaciones gravillas, limos y arcillas.

A continuación, se describen la distribución de las unidades anteriormente descritas para las seis líneas de tomografía eléctrica, así como las características principales que se registraron en ellas



La línea 1 correspondiente al primer grupo, tiene una longitud de 162 m, y una orientación S-N. Tiene su inicio en Av. Cuauhtémoc esq. con Av. Popocatepetl y se extiende a lo largo de la Av. Cuauhtémoc, alcanzando una profundidad de 31.1 mts. En este perfil se aprecia una distribución relativamente homogénea de las unidades geológicas que conforman el subsuelo, mostrándose tres cambios estratigráficos, diferenciados de acuerdo a las variaciones de tonalidades, los cuales son descritos de arriba hacia abajo, como se describe a continuación: en la parte superior se tiene un depósito de arenas finas con intercalaciones de gravillas, limos y arcillas, (tonalidades verdes, amarillo, anaranjadas y rojas); posterior a esta, se presenta un depósito arcilloso de origen lacustre, con diferente porcentaje de contenido de agua (tonos azules-cyan); por último, se observa un cambio aproximadamente a los 19 metros de profundidad, el cual esta representado mediante tonos verdes y verdes claro y esta correlacionado a un depósito de matriz areno-limosa.

En este perfil se descarta la presencia de posibles zonas de contacto, las cuales son susceptibles a provocar fracturamientos y ponen en riesgo el proyecto constructivo.

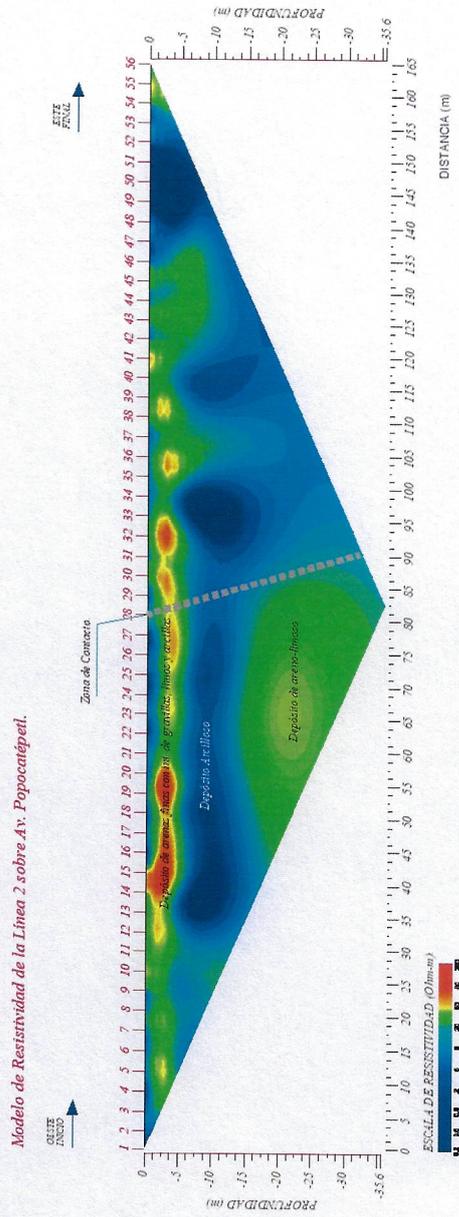


**Figura No. 3.1 Modelo de Resistividad de la Línea 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Av. Popocatepetl.**

*[Handwritten signature]*

La línea 2 del concerniente grupo tuvo su inicio sobre Av. Popocatepetl casi esq. con Calle San Felipe y finalizo sobre la misma Av. Popocatepetl esq. con Calle Cda. Tenayuca, es decir, con orientación W-E, con longitud de 165 m, logrando profundizar 35.6 m. En este perfil se exhiben nuevamente los tres cambios litológicos anteriormente descritos, en la parte superior, tenemos un estrato con coloraciones azules, verdes, amarillos anaranjados y rojos, asociándose al depósito conformado por arenas finas con intercalaciones de gravillas, limos y arcillas. Enseguida, se aprecian tonos azules-cyan relacionados al depósito lacustre de matriz arcillosa, el cual muestra un aumento de espesor después del electrodo 28, comportándose de manera constante hasta el final de la línea; finalmente, en coloraciones verdes y verdes claro, tenemos el estrato conformado por un depósito de matriz areno-limosa.

En esta imagen de resistividad, podemos observar una zona de contacto en el cadenamiento: 81 m, presentándose un aumento de espesor del estrato conformado por el depósito lacustre, dicha zona es propensa a provocar ligeros hundimientos y fracturamientos en superficie.

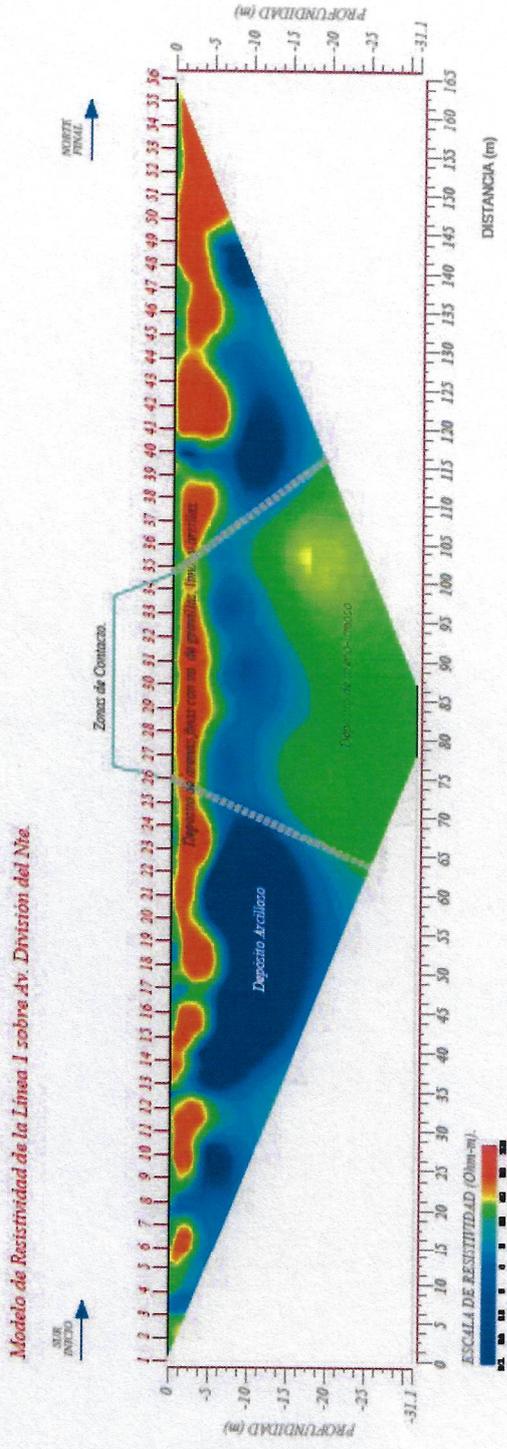


**Figura No. 3.2 Modelo de Resistividad de la Línea 2 sobre Av. Popocatepetl.**

*[Firma manuscrita]*

La línea 1 del segundo conjunto inicia sobre Av. División del Nte. y se extiende con orientación S-N para finalizar sobre Av. Universidad, con una longitud de 165 m, llegando a profundizar hasta los 31.1 m. En este perfil, una vez más, se presentan los tres cambios descritos en las líneas del primer grupo; en la parte superior se tienen colores azules, verdes, amarillos, anaranjados y rojos, vinculados al estrato constituido por un depósito de arenas finas con intercalaciones de gravillas, limos y arcillas, luego, se tiene el depósito lacustre de matriz arcillosa en tonos azules-cyan, mostrando un incremento de espesor del electrodo 1 al electrodo 26 y del 35 al 56. En la parte media del perfil, en colores verde, verde claro y amarillo, tenemos un depósito de matriz arenolimoso.

Se identifican dos zonas de contacto marcadas en el electrodo 26 y 35, teniendo en la parte central una disminución del espesor del depósito de arcillas, comportándose como zonas susceptibles a hundimientos y/o fracturamientos, debido al contacto entre dos materiales de distinta composición y granulometría.



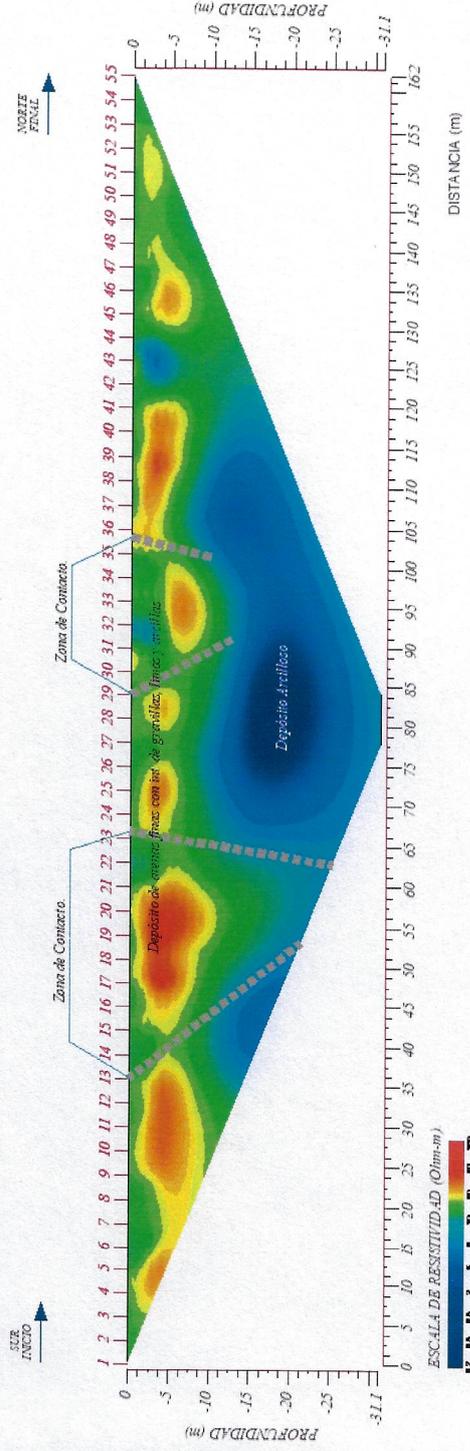
**Figura No. 3.3 Modelo de Resistividad de la Línea 1 sobre Av. División del Nte.**

*[Handwritten signature]*

La línea 2 perteneciente al segundo conjunto, tiene una longitud 162 m, y una orientación S-N, es decir, inicia sobre Av. Universidad y se extiende hasta finalizar sobre Av. Universidad esq. con Av. División del Nte; alcanzando una profundidad de 31.1 mts. En esta imagen de resistividad se aprecian solo dos cambios estratigráficos, el primero correspondiente a la capa superficial y se asocia a un depósito de arenas finas con intercalaciones de gravillas, limos y arcillas, en colores azules, verdes, amarillos, anaranjados y rojos; seguido de este, se aprecian tonalidades azules-cian, las cuales se relacionan a la capa de depósitos lacustres de matriz arcillosa con diferente porcentaje de contenido de agua, mostrando discontinuidades en diferentes sectores, los cuales se relacionan a zonas de contacto con posibilidades de generar fracturamientos

Se identifican 4 zonas de contacto, las cuales indican un ligero aumento de espesor del estrato superficial y se ubican en los cadenamientos: 36, 66.87, 84 y 104, respectivamente.

*Modelo de Resistividad de la Línea 2 sobre Av. Universidad.*

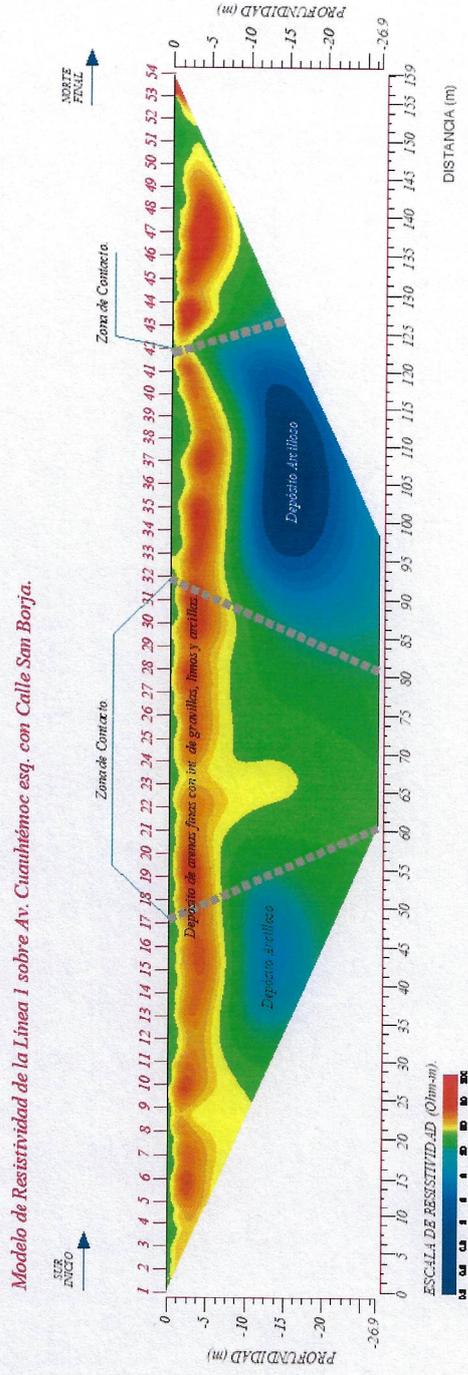


**Figura No. 3.4 Modelo de Resistividad de la Línea 2 sobre Av. Universidad.**

*[Handwritten signature]*

La línea 1 de la última zona tiene una longitud de 159 m, con orientación S-N, logrando profundizar aproximadamente 26.9 m. Se efectuó desde la Av. Cuauhtémoc casi esq. con Av. Eje 6 Sur (Angel Urza) y tuvo su final en Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja. Esta línea muestra solo dos cambios litológicos, teniendo una capa superficial (tonos amarillos, anaranjados y rojos) relacionado a un depósito de arenas finas con intercalaciones de gravillas, y menor presencia de limos y arcillas; después se presenta el estrato ligado al depósito lacustre de arcillas (colores azules-cyan), con diferente porcentaje de contenido de agua, dicho estrato muestra discontinuidades en su composición, para lo cual, se identifican dos zonas de contacto ligadas a este cambio y las cuales son propensas a generar fracturamientos, debido a que se pronuncia un mayor aumento de espesor del estrato, lo cual genera planos de debilidad y provoca que esta zona se vuelva mas propensa a sufrir fracturamientos.

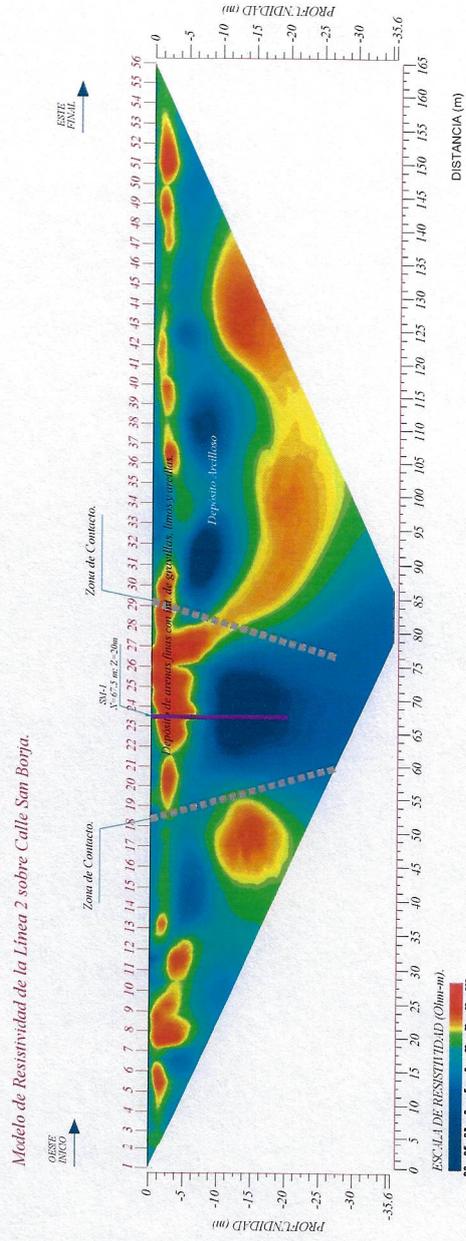
Las zonas de contacto entre materiales de distinta granulometría se presentan en los siguientes cadenamientos: 48.5, 92.6 y 122.43 m, correspondientemente.



**Figura No. 3.5 Modelo de Resistividad de la Línea 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja.**

Finalmente, se tiene la línea 2 de este grupo, con una orientación W-E, longitud de 165 m y profundidad de 35.6 m. Su inicio está ubicado en Calle San Borja casi esq. con Calle Anaxágoras y se prolonga hasta culminar en Calle San Borja esq. con Yacatas. Dicho perfil, evidencia dos cambios litológicos, correspondientes al depósito de arenas finas con intercalaciones de gravillas, limos y arcillas (tonos azules, verdes, amarillos, anaranjados y rojos) y posteriormente a una profundidad aproximada de 5 metros, se presenta la capa correspondiente al depósito lacustre de matriz arcillosa, con diferente porcentaje de contenido de agua.

De acuerdo con los resultados, se identifica una anomalía resistiva en el cadenamiento 67.5 m y a una profundidad de 20 mts, para lo cual, se recomienda realizar un sondeo mecánico en el sitio antes mencionado, a su vez, se identifican dos zonas de contacto en los cadenamientos: 52 y 84.64 m; dichas zonas son susceptibles a presentar el fenómeno de fallas y/o fracturamientos.



**Figura No. 3.6 Modelo de Resistividad de la Línea 2 sobre Calle San Borja.**

*[Handwritten signature]*

#### 4. Conclusiones y Recomendaciones.

El presente informe corresponde al estudio geofísico realizado en las avenidas y calles circundantes donde se pretende construir el nuevo tramo correspondiente a la actual L3 del sistema de Metrobús perteneciente a la Alcaldía de Benito Juárez, Ciudad de México; con la finalidad de determinar las condiciones litológicas y la presencia de fracturas y fallas geológicas inferidas sobre las vialidades que conforman el proyecto de ampliación y construcción, y de esta forma prevenir y/o mitigar estructuras geológicas que pudieran poner en riesgo la seguridad e integridad del proyecto constructivo.

La técnica anteriormente descrita y empleada para llevar a cabo la verificación y evaluación de las condiciones del subsuelo en el proyecto constructivo analizaron una profundidad de exploración indirecta promedio de 31.9 metros.

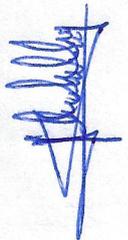
Los resultados obtenidos con la técnica de tomografía eléctrica se resumen en la Tabla 4.1.

No. Línea	Longitud (m)	Orientación (m)	Resistividades (Ohm-m)		
			0.2-20	21-75	76-200
					
<b>Av. Cuauhtémoc – Av. Popocatepetl</b>			DEPÓSITO LACUSTRE DE MATRIZ ARCILLOSA CON DIFERENTE PORCENTAJE DE CONTENIDO DE AGUA.	DEPÓSITO DE MATRIZ ARENO-LIMOSA.	DEPÓSITO EN SUPERFICIE, CONSTITUIDO PRINCIPALMENTE POR ARENAS FINAS CON INTERCALACIONES DE GRAVILLAS, LIMOS Y ARCILLAS.
1	162	W-E			
2	165	S-N			
<b>Av. División del Nte - Universidad.</b>					
1	165	S-N			
2	162	S-N			
<b>Av. Cuauhtémoc - Calle San Borja.</b>					
1	159	S-N			
2	165	W-E			

**Tabla 4.1 Resumen de la interpretación de las Imágenes de Resistividad.**

En base a los resultados obtenidos con la técnica de tomografía de resistividad eléctrica (TRE), se concluye lo siguiente:

- Se observan tres cambios estratigráficos, los cuales son fácilmente identificables de acuerdo con los cambios de tonalidades de la escala de colores utilizada, de los cuales, el estrato constituido por un depósito lacustre de matriz arcillosa con diferente porcentaje de contenido de agua es susceptible a generar zonas de hundimiento, aunado a que presenta mayor incremento de espesor en ciertas líneas, por lo cual, es importante considerar esta zonas al momento de realizar el proyecto constructivo y tomar en cuenta los resultados del estudio de mecánica de suelos para evaluar las propiedades específicas del material y descartar que dichos cambios sean susceptibles a generar problemáticas a futuro.
- Se identifican un total de doce (12) zonas de contacto entre materiales de distinta granulometría, las cuales son propensas a generar fracturamientos, ya que se generan planos de debilidad, los cuales pueden ocasionar zonas de ruptura que con el tiempo y dependiendo de las propiedades específicas de los materiales encontrados a profundidad, llegan a provocar fracturamientos de ligeros a significativos en superficie, llegando a perjudicar la obra en cuestión y ponen en riesgo la integridad del proyecto.
- Se identifica una anomalía resistiva en la L-2 del último grupo, en el cadenamiento 67.5 m y a una profundidad de 20 mts, por lo cual, se recomienda realizar un Sondeo Mecánico en el sitio antes mencionado y a la profundidad establecida, para verificar y corroborar las condiciones del material a profundidad y con el fin de descartar la presencia de alguna estructura geológica de riesgo que pudiera afectar la seguridad de la obra civil a construirse.
- De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se procedió a elaborar tres planos de resultados, los cuales muestran de manera visual, el sitio donde se ubican las zonas de contacto y donde debe de realizarse el SM-1; los cuales pueden visualizarse en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, a su vez, se resume en la Tabla 4.2, los cadenamientos y líneas en donde se encuentra dichas zonas de contacto y en la Tabla 4.3 la ubicación del SM-1.





UBICACIÓN DE LAS ZONAS DE CONTACTO		
ZONA DE CONTACTO	LÍNEA	DISTANCIA A PARTIR DE INICIO (m)
<b>Av. Cuauhtémoc - Av. Popocatepetl.</b>		
-	-	-
1	2	81
<b>Av. División del Nte - Universidad.</b>		
2	1	75
3	1	101.09
4	2	36
5	2	66.87
6	2	84
7	2	104
<b>Av. Cuauhtémoc - Calle San Borja.</b>		
8	1	48.5
9	1	92.6
10	1	122.43
11	2	52
12	2	84.64

*Tabla 4.2 Resumen de la ubicación de las zonas de contacto.*

COORDENADAS DE LOS PUNTOS A VERIFICAR					
<b>Av. Cuauhtémoc - Calle San Borja.</b>					
SM	X UTM	Y UTM	LÍNEA	PROFUNDIDAD	DISTANCIA A PARTIR DE INICIO (m)
1	483401	2143207	2	20	67.5

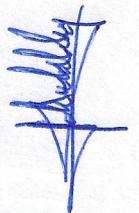
*Tabla 4.3 Información de los puntos a verificar.*

Se concluye que en las avenidas y calles circundantes en donde se realizaron los trabajos geofísicos de exploración indirecta, en los que se pretende llevar a cabo el proyecto constructivo, presentan zonas susceptibles a generar fracturamientos en cadenamientos específicos para cada una de las líneas, a excepción de la Línea 1 del primer grupo (todas anteriormente descritas), además de que se identificó una anomalía de baja resistividad en la Línea 2 del último grupo, ubicada sobre la Calle San Borja, por lo cual se recomienda realizar un Sondeo Mecánico en el cadenamiento 67.5 m y a una profundidad de 20 mts en dicha línea, esto con el objetivo de descartar la presencia de una estructura geológica de riesgo que pudiera afectar la seguridad e integridad del proyecto.

Es importante mencionar que de manera superficial no existe evidencia ni presencia de fracturamientos y/o fallas en los sitios donde se identificaron los contactos litológicos laterales, sin embargo, estos fenómenos podrían desarrollarse a causa de circunstancias de tipo regional, tales como el abatimiento del acuífero de la zona, o un sismo de magnitud importante, como el de septiembre de 2017.

A pesar de haberse identificado en el presente estudio contactos litológicos laterales entre materiales de diferente granulometría, los cuales son susceptibles a desarrollar posibles fracturamientos y/o fallas, se recomienda seguir las recomendaciones del estudio de mecánica de suelos correspondiente del proyecto, principalmente respecto al tipo de cimentación a utilizar para el mismo; esto con el objetivo de mitigar o descartar la posible aparición de los mencionados fracturamientos y/o fallas.

Es importante considerar que las coordenadas proporcionadas para el SM-1 tiene un margen de error de  $\pm 3$  metros, por lo cual, se recomienda, ubicar las marcas en campo de inicio y final para cada una de las líneas e identificar a partir de qué punto comenzar a medir los 67.5 metros a partir del inicio de la línea.



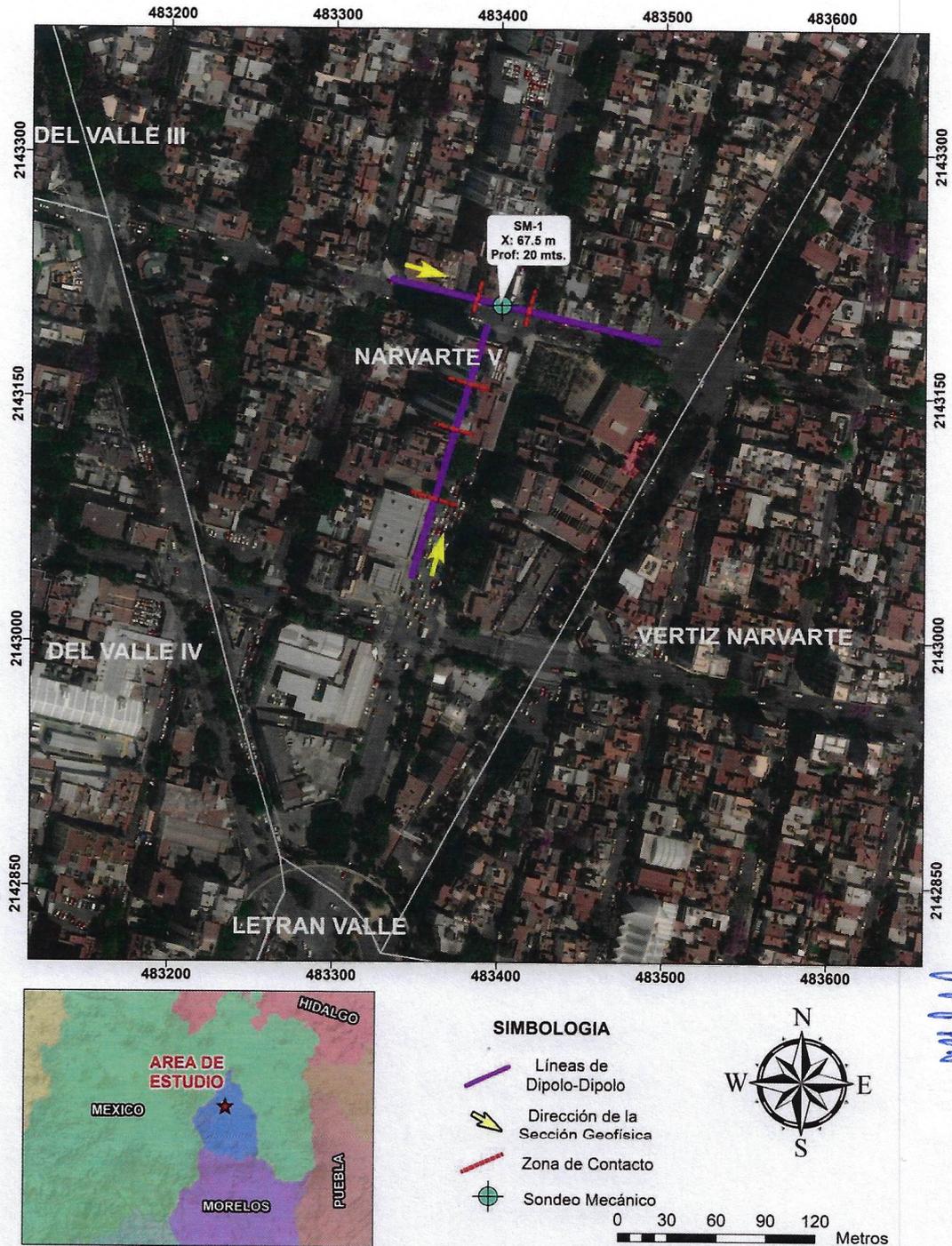


**Figura No. 4.1** Localización de las zonas de contacto sobre las líneas de tomografía eléctrica sobre Av. Cuauhtémoc – Av. Popocatepetl.



**Figura No. 2.3** Localización de las zonas de contacto sobre las líneas de tomografía eléctrica sobre Av. División del Nte - Av. Universidad.

Oficina: Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México  
Teléfonos: Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957  
[www.georadarypolimeros.com](http://www.georadarypolimeros.com)



**Figura No. 2.4** Localización de las zonas de contacto y Sondeo Mecánico sobre las líneas de tomografía eléctrica sobre Av. Cuauhtémoc – Calle San Borja.



**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



**ING. CLAUDIO LEZAMA TAPIA**

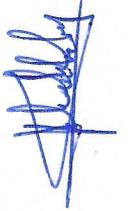
**CED. PROF.: 6519336**

## BIBLIOGRAFÍA

Lugo, H. J., 1990., *El Relieve de la República Mexicana.*, UNAM., Instituto de Geología., Revista. vol. 9., No. 1.

Morán, D. 1984., *Geología de la República Mexicana*, INEGI-Facultad de Ingeniería UNAM.

Orellana E., 1982., *Prospección Geoeléctrica por Corriente Continua.*, Paraninfo. Madrid., España.



## 5. ANEXOS

### A- Marco Teórico

#### 1 Métodos Eléctricos.

### B- Plano No. 1

#### 2 Modelos de Resistividades.

### C- Anexo Fotográfico

#### 3 Levantamiento de imágenes de resistividad.



## Anexo A:

### Métodos Eléctricos

La prospección geofísica son un conjunto de técnicas teóricas y prácticas que tienen como finalidad determinar la distribución de alguna particularidad de interés del subsuelo. Para ello se evalúan las propiedades de subsuelo contrastadas con las del objeto de interés. Esta búsqueda se realiza sin realizar una afectación directa como puede ser una excavación o una perforación.

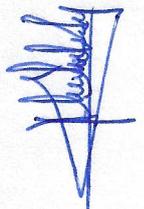
Existen múltiples métodos geofísicos, cada uno basado en un parámetro físico diferente como puede ser la densidad, resistividad, susceptibilidad magnética, capacitancia, radioactividad, etc. Dependiendo de las características del objetivo de búsqueda se realiza la prospección geofísica, no todos los objetivos son susceptibles a cierto método, es necesario conocer las características físicas de la roca o material de interés para poder realizar una prospección adecuadamente.

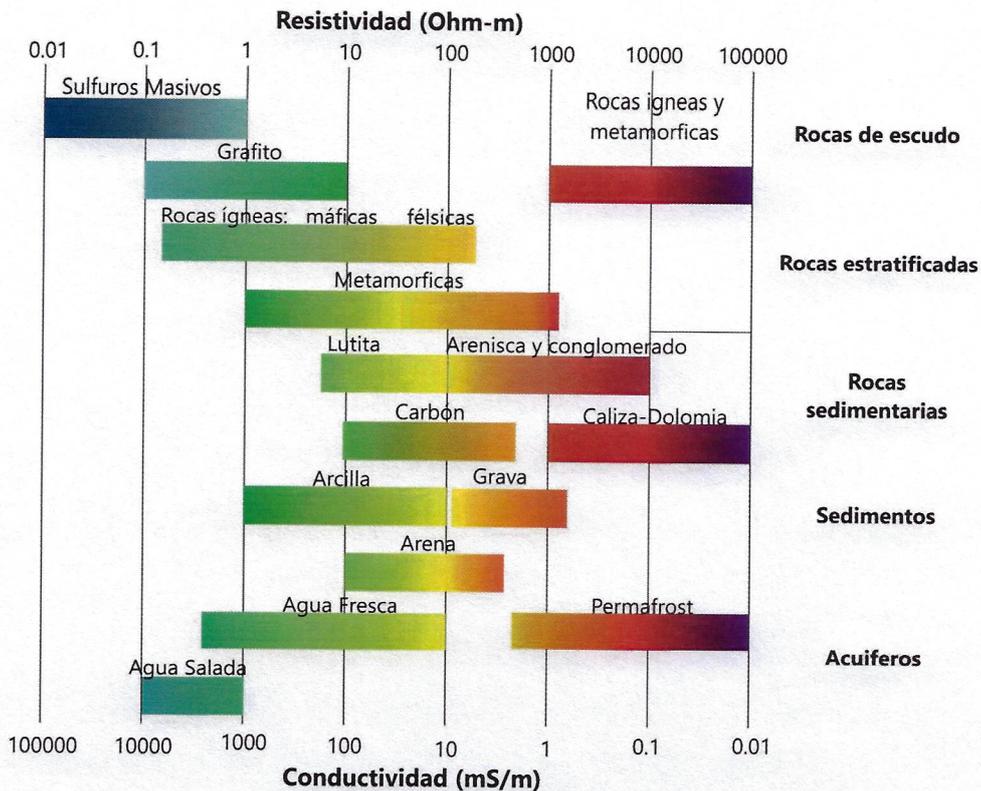
De manera particular, los métodos eléctricos se fundamentan en las variaciones de resistividad eléctrica del subsuelo, la cual es una propiedad intrínseca de los materiales. Se define como resistividad a la dificultad que tiene la corriente eléctrica para pasar a través de un cuerpo, esta propiedad se diferencia de la resistencia eléctrica en que la resistividad está en función de la geometría y/o volumen del cuerpo, está ligada con la composición del material. Su recíproco es la conductividad eléctrica, la cual solo representa el inverso de la resistividad.

Los valores de resistividad presentan un rango muy amplio de valores (tan amplio que debe graficarse en una escala logarítmica) que va de 0.01 a 100,000 Ohm-m. Esta propiedad se ve modificada por diferentes propiedades litológicas como son:

- Porosidad
- Permeabilidad hidráulica (tortuosidad)
- Porcentaje de humedad (saturación)
- Concentración de electrolitos disueltos
- Temperatura
- Contenido de arcilla
- Composición de la matriz

La figura No. 1 ilustra el comportamiento de la resistividad de los diferentes materiales encontrados en la naturaleza.



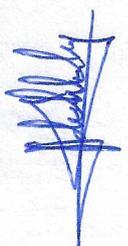


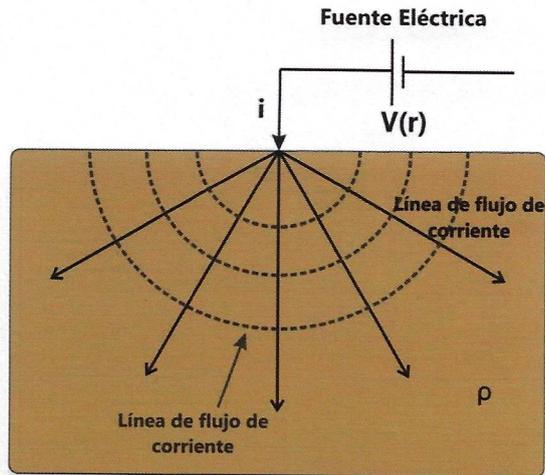
**Figura No. 1 Comportamiento general de las resistividades.**

Los métodos de prospección eléctrica son muy útiles cuando existe un contraste de propiedades eléctricas considerable.

Para poder conocer el valor de resistividad del medio se ocupan técnicas de prospección, las cuales hacen una evaluación de las propiedades eléctricas y con base en algunas ecuaciones es posible calcular un valor de resistividad aparente.

Independientemente del dispositivo (arreglo) utilizado para la evaluación de la resistividad aparente, todos utilizan un campo eléctrico como fuente. La corriente eléctrica generada por la fuente se regula por la potencia de la fuente y la resistencia de contacto del electrodo con el suelo. La corriente que circula dentro del suelo se propaga de manera esférica (en todas direcciones) como muestra la figura 2 (líneas negras). Las líneas punteadas (gris) marcan las zonas donde la corriente que circula por el medio es igual en las líneas equipotenciales, considerando que el medio presenta una resistividad constante (isotrópico y homogéneo).

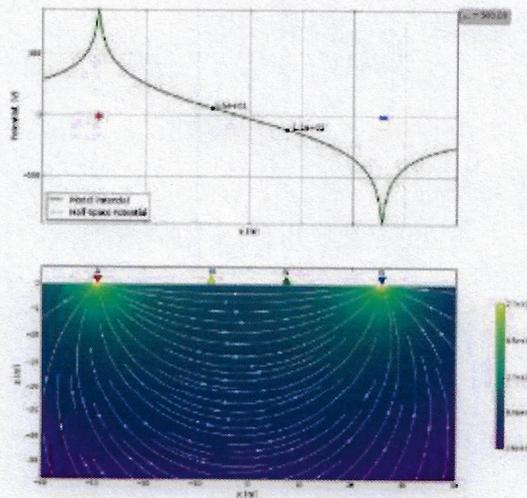




**Figura No. 2 Fuente eléctrica de un solo electrodo.**

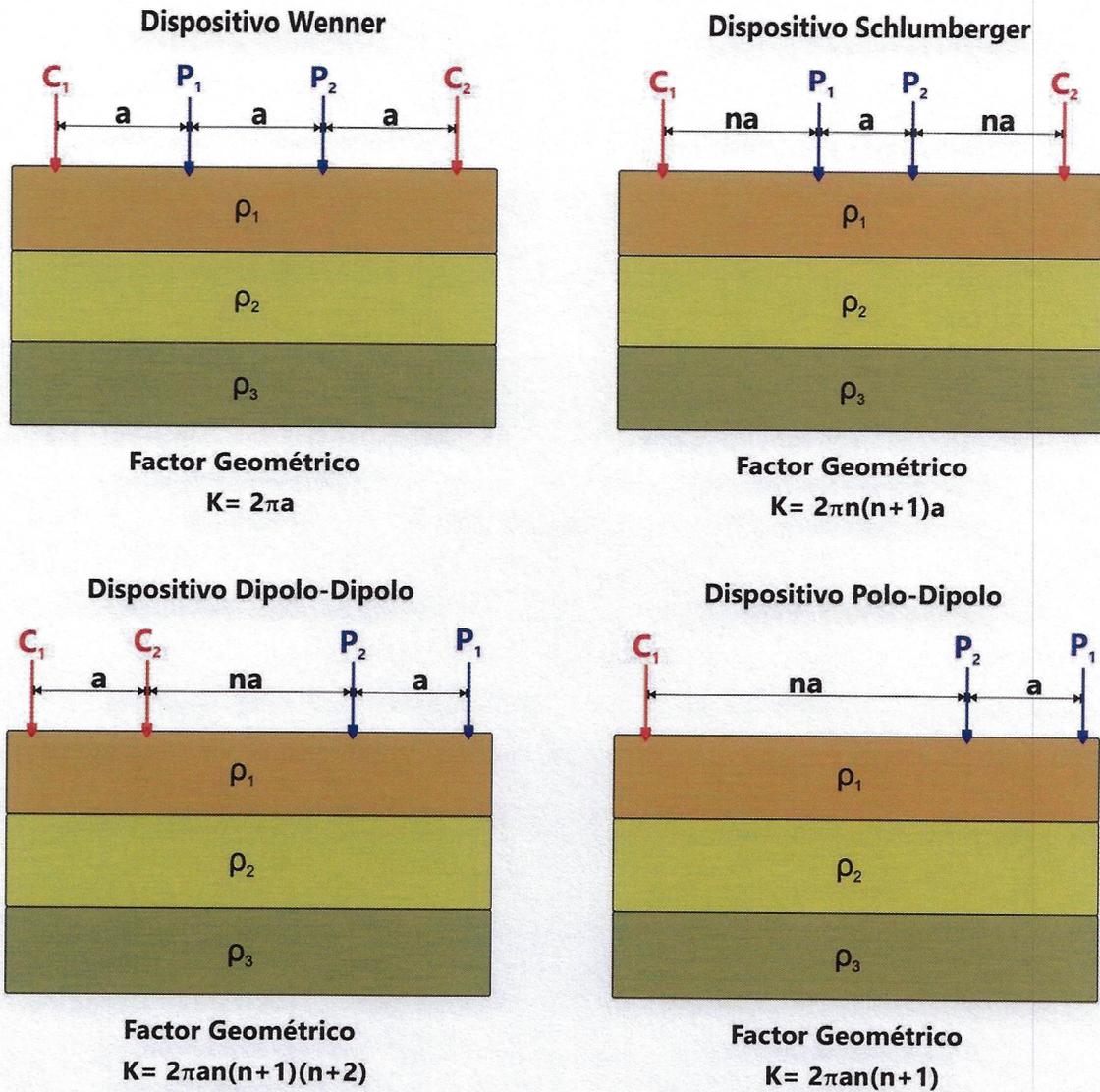
Ahora, considerando dos puntos (electrodos) utilizados como fuente eléctrica tendremos una distribución de líneas de corriente como muestra la figura No. 3. Siendo el punto A el lado positivo de la fuente eléctrica y el punto B el lado negativo. Las líneas de corriente se desplazan del punto A hacia B. El valor del potencial eléctrico será mayor a medida que la distancia con respecto del punto donde se induce la corriente sea menor. El potencial eléctrico medido puede ser positivo o negativo, dependiendo de la polaridad del campo eléctrico (ver parte superior de la figura 3).

*[Handwritten signature]*



**Figura No. 3 Distribución de líneas de campo eléctrico generadas por dos electrodos**

En la figura 4 se ilustran diferentes dispositivos con su constante geométrica, donde  $a$  representa la separación entre electrodos y  $n$  un múltiplo.



**Figura No. 4 Distribución y constante geométrica de los diferentes dispositivos.**

### **Imágenes de Resistividad**

Este método geofísico representa uno de los métodos de prospección de mayor resolución, y con las características del equipo utilizado, se obtiene una profundidad de investigación considerable.

En las imágenes de resistividad se pretende identificar cambios laterales en las propiedades eléctricas del medio que puedan ser asociadas a posibles oquedades, así como la distribución del relleno. Para ello se buscan cambios en los valores de resistividad de los perfiles en dos dimensiones obtenidos en cada una de las líneas.

### **Parámetros de adquisición**

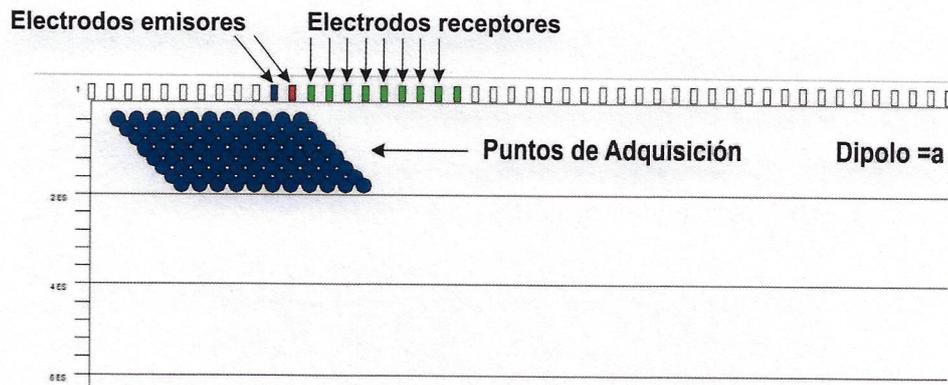
En los métodos geofísicos, la configuración de los parámetros en el levantamiento de campo es fundamental para una correcta adquisición de datos. Dicha configuración estará en función del objetivo del estudio y la geología del sitio (tamaño, geometría, material).

A menudo, la técnica de tomografía eléctrica requiere una profundidad de investigación mayor a los 20 o 30 m, un valor considerable dada las características del método, ya que se considera un método de buena resolución, esto se refiere a la densidad de puntos (cantidad de información por unidad de área), entre mayor resolución (densidad de puntos) menor es la incertidumbre, lo que hace más factible realizar un modelado más óptimo.

De manera general, existe una relación entre profundidad de investigación y resolución. Entre mayor sea la profundidad de investigación menor será la resolución. Dicho de manera práctica; mientras exista mayor profundidad de investigación será más complicado realizar un estudio a detalle.

La figura No. 5 ilustra la distribución de los puntos adquiridos mediante imágenes de resistividad considerando una separación entre electrodos constante. Este tipo de adquisición es realizada por la mayoría de los equipos manuales.





**Figura No. 5 Adquisición de imágenes de resistividad con  $n=1$ .**

Con equipos de adquisición modernos es posible mitigar el efecto de la relación profundidad/resolución, ya que utilizan un dipolo (separación base entre electrodos) múltiple, que permite hacer evaluaciones a profundidad, sin perder resolución en los primeros metros.

Entender la relación entre estas características del levantamiento, considerando las del objetivo de investigación, permitirá proponer 3 factores:

**$a$  = separación base entre electrodos**

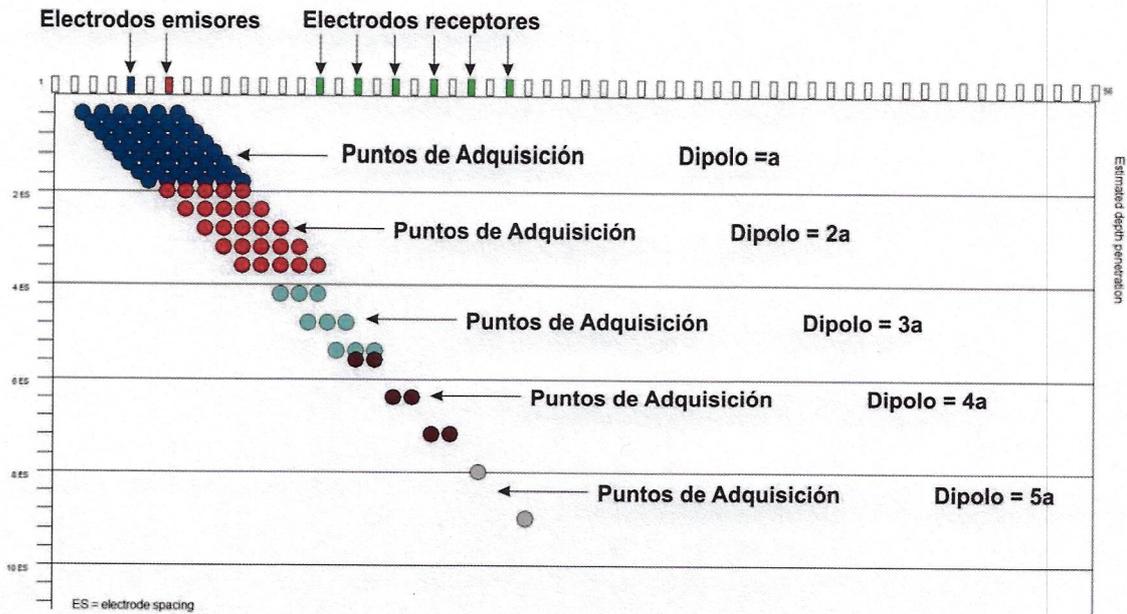
**$n_{min}$  = Múltiplo mínimo del dipolo**

**$n_{max}$  = Múltiplo máximo del dipolo**

El valor de  **$a$**  determinará la profundidad de investigación, es decir que la separación entre electrodos es proporcional a la profundidad de investigación, siendo que sí la separación entre electrodos es mayor, mayor será la exploración de investigación. La determinación de este valor está muy relacionada con las dimensiones del objetivo de estudio.  $N_{min}$  y  $N_{max}$  registrarán sobre el número de veces que se multiplicará el dipolo.

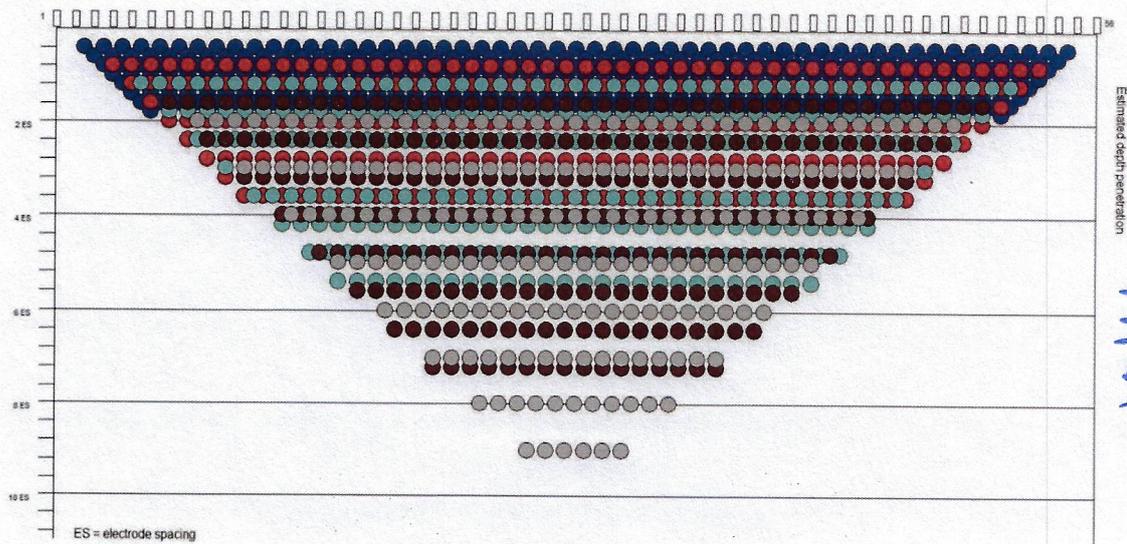
La figura No. 6 ilustra la distribución de los puntos de atribución por medio de la multiplicación de la distancia del dipolo base. En el ejemplo de abajo se multiplica hasta 5 veces obteniendo una evaluación de resistividad a profundidad, sin perder resolución en la parte somera.





**Figura No. 6 Adquisición de imágenes de resistividad con  $n=5$ .**

Otro detalle significativo en la adquisición de datos, es la utilización de los puntos intermedios de los dipolos, la utilización de estas distancias permite tener una nube de puntos de mayor densidad, mejorando así la resolución. El modelado de estos datos permite identificar características litológicas comúnmente menos susceptibles, por lo que se logran resultados más precisos.



**Figura No. 7 Adquisición de imágenes de resistividad con alta resolución.**

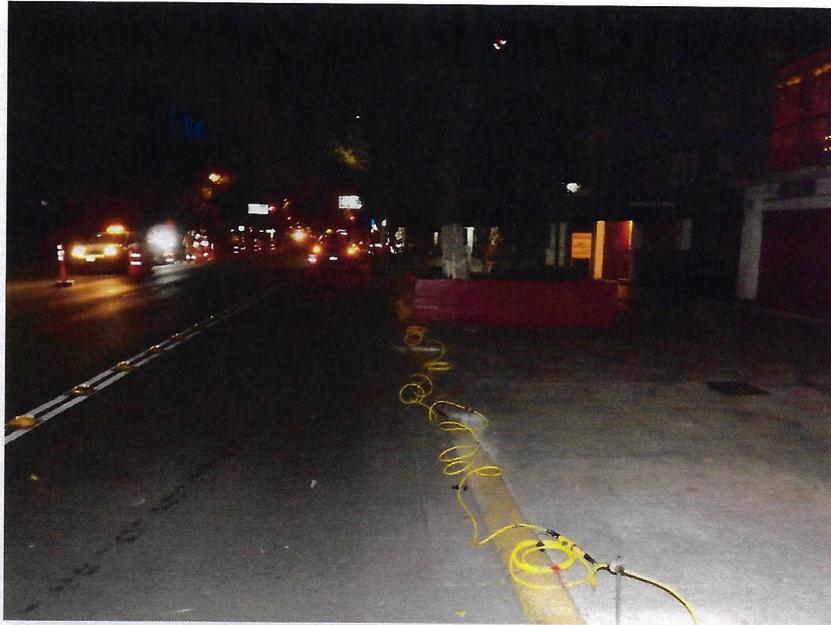
### C-Álbum fotográfico



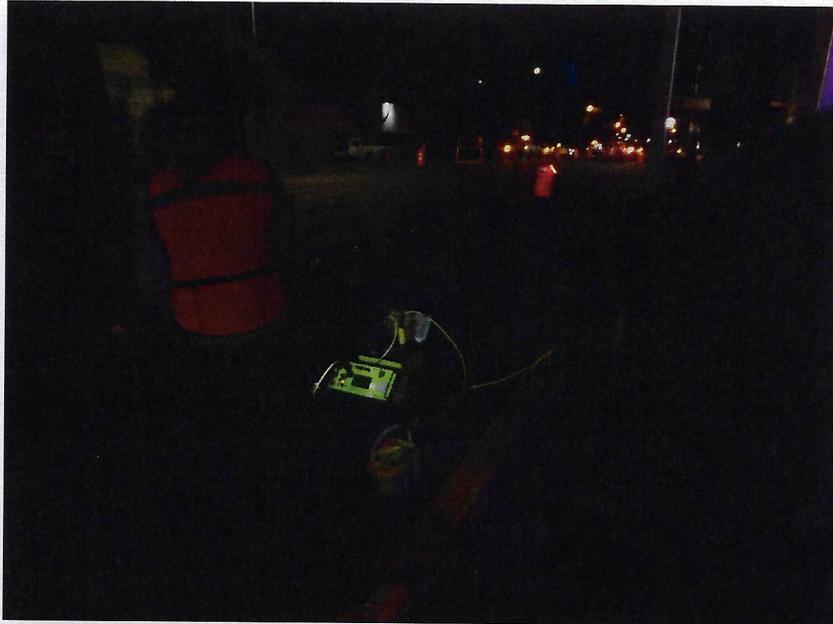
***C.1 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Av. Popocatepetl.***



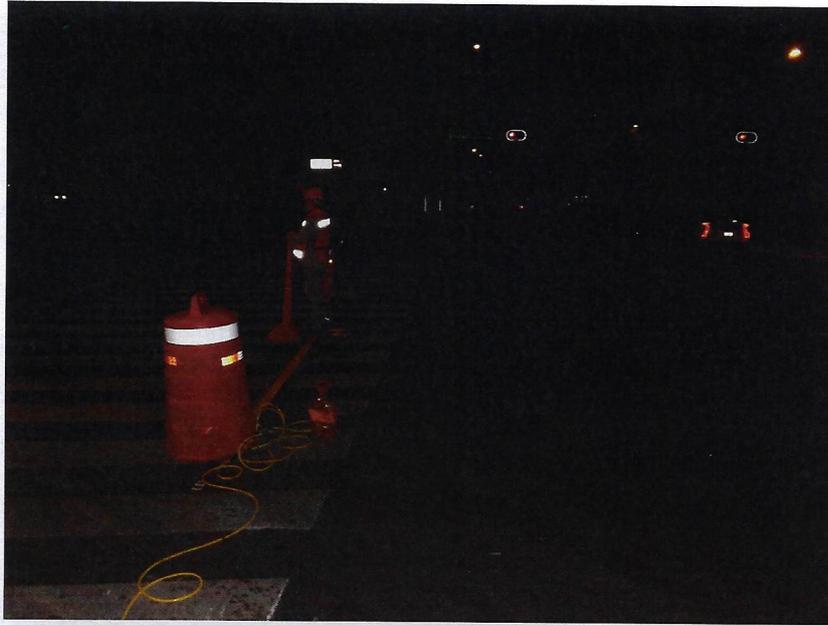
***C.2 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Av. Popocatepetl.***



***C.3 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Av. Popocatepetl.***



***C.4 Levantamiento de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Av. Popocatepetl.***



***C.5 Levantamiento de la Línea de D-D 2 sobre Av. Popocatépetl.***



***C.6 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Av. Popocatépetl.***



***C.7 Desarrollo en campo de la Línea de D-D 2 sobre Av. Popocatépetl.***



***C.8 Levantamiento de la Línea de D-D 2 sobre Av. Popocatépetl.***

*Handwritten signature in blue ink.*



***C.9 Levantamiento de la Línea de D-D 1 sobre Av. División del Nte.***



***C.10 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. División del Nte.***

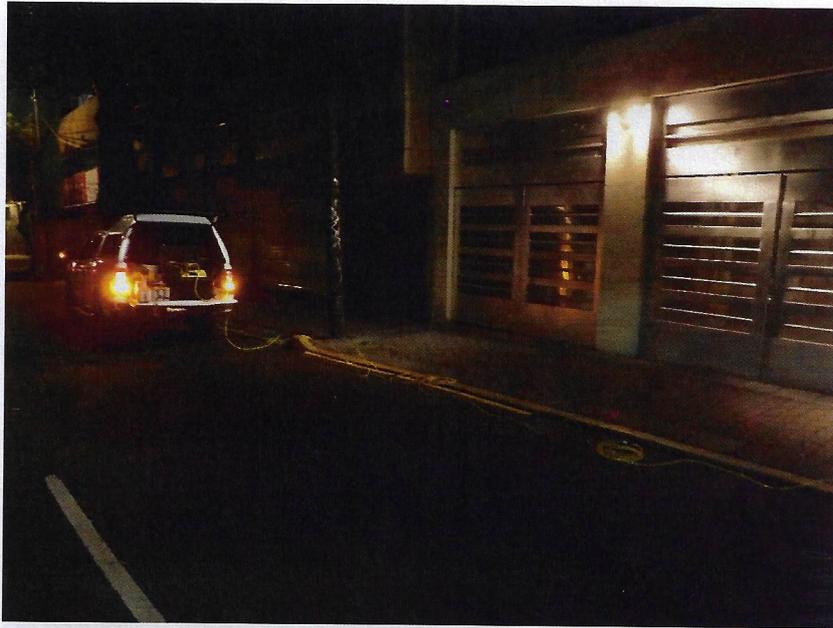


**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



***C.11 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. División del Nte.***



***C.12 Levantamiento de la Línea de D-D 1 sobre Av. División del Nte.***

*[Handwritten signature]*



**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



***C.13 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Av. Universidad.***



***C.14 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Av. Universidad.***

---

**Oficina:** Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México

**Teléfonos:** Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957

[www.georadarypolimeros.com](http://www.georadarypolimeros.com)



**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



***C.15 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Av. Universidad.***



***C.16 Levantamiento de la Línea de D-D 2 sobre Av. Universidad.***

*[Handwritten signature]*



**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



***C.17 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja.***



***C.18 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja.***

---

**Oficina:** Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México

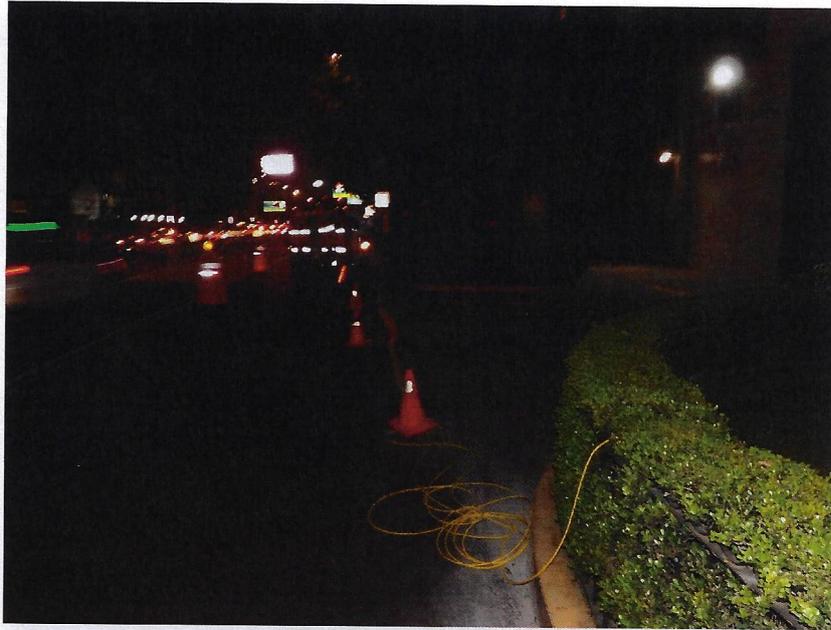
**Teléfonos:** Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957

**[www.georadarypolimeros.com](http://www.georadarypolimeros.com)**

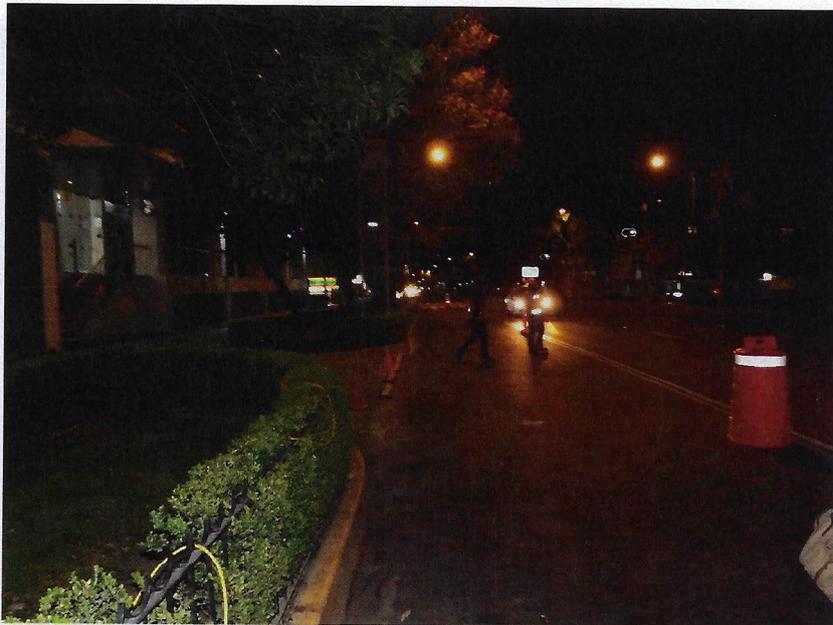


**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



***C.19 Desarrollo de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja.***



*Alcalá*

***C.20 Dirección hacia el Final de la Línea de D-D 1 sobre Av. Cuauhtémoc esq. con Calle San Borja.***

---

**Oficina:** Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México

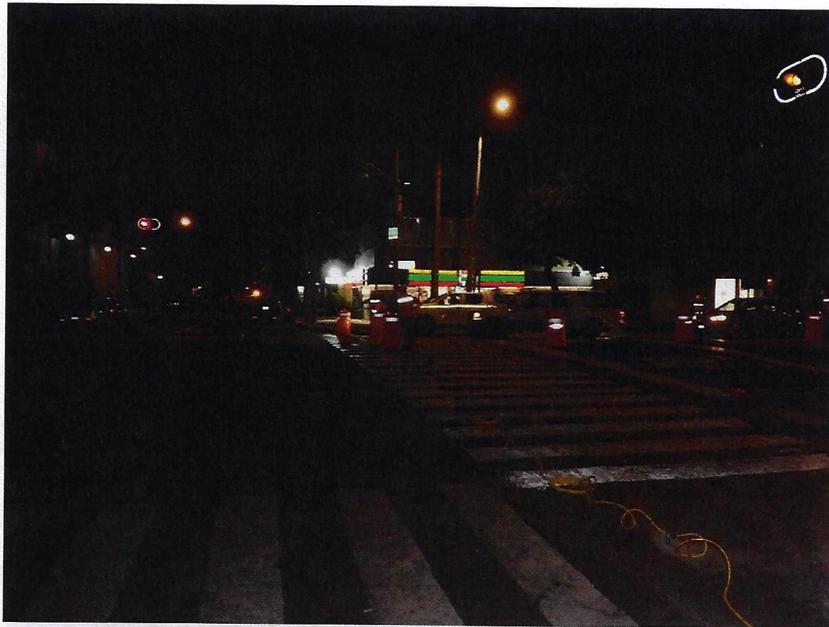
**Teléfonos:** Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957

**[www.georadarypolimeros.com](http://www.georadarypolimeros.com)**

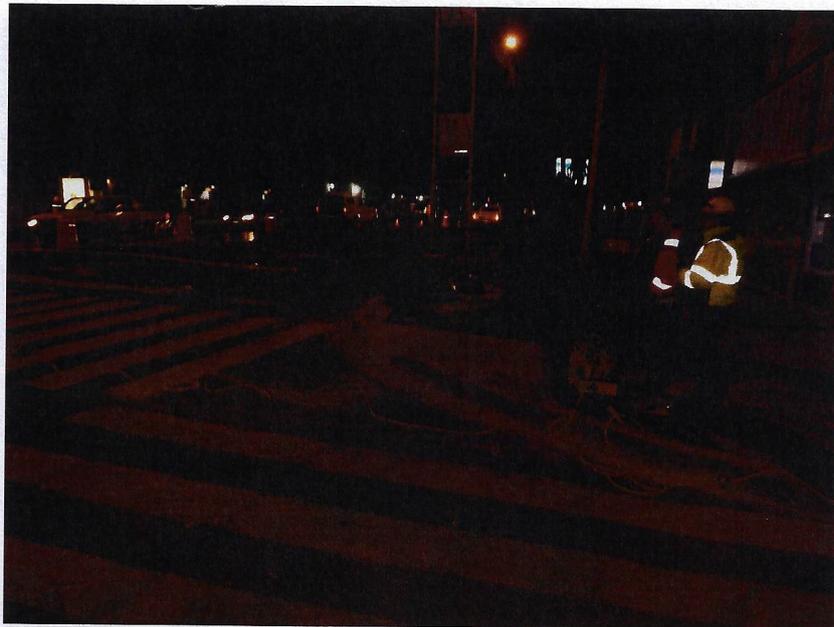


**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



*C.21 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Calle San Borja.*



*C.22 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Calle San Borja.*

*[Handwritten signature]*

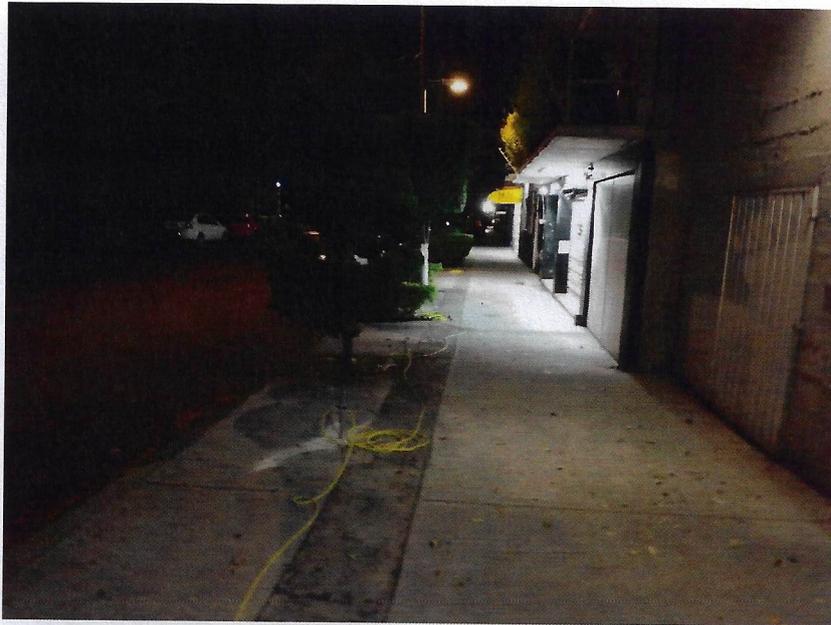


**TECNO TERRA**

ESTUDIOS DE GEORADAR •  
INYECCIÓN DE POLÍMEROS •



*C.23 Desarrollo de la Línea de D-D 2 sobre Calle San Borja.*



*C.24 Dirección hacia el Final de la Línea de D-D 2 sobre Calle San Borja.*

---

**Oficina:** Paseo San Arturo Pte. # 910-27 • Fracc. Valle Real • Zapopan, Jal., C.P. 45019 México

**Teléfonos:** Oficina: (33) 31221400 • Celular: (33) 11454957

[www.georadarypolimeros.com](http://www.georadarypolimeros.com)