



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**GEOFÍSICA SOMERA PARA TRES  
CASOS DE APLICACIÓN EN LA  
GEOTECNIA**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A**

LUIS RAMÍREZ CASTAÑEDA

**ASESOR DE INFORME**

M.C. DAVID ESCOBEDO ZENIL



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**

# ÍNDICE

GEOFÍSICA SOMERA PARA TRES CASOS DE APLICACIÓN EN GEOTECNIA.....	5
Introducción.....	5
Objetivo .....	6
Caso 1 .....	7
Introducción. ....	7
Antecedentes. ....	7
Definición del problema.....	8
Metodología utilizada.....	9
Resultados. ....	13
Caso 2 .....	17
Introducción. ....	17
Antecedentes. ....	17
Definición del problema.....	18
Metodología utilizada.....	19
Resultados. ....	21
Caso 3 .....	39
Introducción. ....	39
Antecedentes. ....	40
Definición del problema.....	41
Metodología utilizada.....	42
Resultados. ....	44
Conclusiones.....	53
Caso 1.....	53
Caso 2.....	54
Caso 3.....	55
Conclusiones Generales .....	56
Bibliografía.....	57
Caso 1.....	57
Caso 2.....	57
Caso 3.....	57

## Índice de Figuras

Figura 1 Diferentes escenarios de las ondas para la prueba de integridad de Pilas de cimentación.....	8
Figura 2 Plano de localización de las Pilas de cimentación ensayadas (19C y 19D) con la técnica “MRS”..	8
Figura 3 Preparando la Pila 19D para fijar los geófonos y realizar las pruebas microsísmicas en la Etapa 1 del proyecto Inmobiliario.....	11
Figura 4 Sismograma de la Pila 19C.....	13
Figura 5 Sismograma de la Pila 19D.....	14
Figura 6 Ubicación aproximada del proyecto.....	18
Figura 7 Distorsión del campo eléctrico cuando existe una cavidad, aplicando el método del Polo-Dipolo (Modificada de Dobrin,1952).....	20
Figura 8 Ubicación de las Líneas de Polo-Dipolo en el terreno donde se realiza el proyecto habitacional..	22
Figura 9 Resultados obtenidos con la Línea 1 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.....	23
Figura 10 Resultados obtenidos con la Línea 2 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área....	25
Figura 11 Resultados obtenidos con la Línea 3 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste.....	27
Figura 12 Resultados obtenidos con la Línea 4 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área....	28
Figura 13 Resultados obtenidos con la Línea 6 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	30
Figura 14 Resultados obtenidos con la Línea 6 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	31
Figura 15 Resultados obtenidos con la Línea 7 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	33
Figura 16 Resultados obtenidos con la Línea 8 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	34
Figura 17 Resultados obtenidos con la Línea 9 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	36
Figura 18 Plano de Isopacas a una profundidad de 2.0 m. Los ejes mostrados en la figura (de color rojo y verde respectivamente) son las coordenadas geográficas UTM en el plano “X-Y”, y el eje vertical (color azul) “Z” indica la profundidad.....	37
Figura 19 Plano de Isopacas a una profundidad de 3.0 m. Los ejes mostrados en la figura (de color rojo y verde respectivamente) son las coordenadas geográficas UTM en el plano “X-Y”, y el eje vertical (color azul) “Z” indica la profundidad.....	38
Figura 20 Plano de Isopacas a una profundidad de 6.0 m. Los ejes mostrados en la figura (de color rojo y verde respectivamente) son las coordenadas geográficas UTM en el plano “X-Y”, y el eje vertical (color azul) “Z” indica la profundidad.....	39
Figura 21 Esquema de operación del Georadar.....	41
Figura 22 Esquema de las Líneas de GPR implantadas en la posición del Aeropuerto de la Ciudad de México.....	44
Figura 23 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 0 en el Sitio 52 con la antena de 250 MHz.....	45
Figura 24 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 3 en el Sitio 52 con la antena de 250 MHz.....	46
Figura 25 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 6 en el Sitio 52 con la antena de 250 MHz.....	47
Figura 26 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 13 en el Sitio 52 con la antena de 250 MHz.....	48

Figura 27 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 0 en el Sitio 52 con la antena de 500 MHz.	49
Figura 28 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 3 en el Sitio 52 con la antena de 500 MHz.	50
Figura 29 Radargrama o registro de GPR obtenido con la Línea 13 en el Sitio 52 con la antena de 500 MHz.	51
Figura 30 Ubicación de los 3 Piezómetros que se instalarán en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.	52
Figura 31 Vista en planta de los puntos recomendados para la verificación de cavidades en el área del proyecto habitacional.	55

## Índice de Tablas.

Tabla 1 Resumen del cálculo de la Pila 19C	15
Tabla 2 Resumen del calculo de la Pila 19D	16
Tabla 3 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 1 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste.	24
Tabla 4 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 2 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.	26
Tabla 5 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 3 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.	27
Tabla 6 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 4 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.	28
Tabla 7 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 5 de Polo-Dipolo realizada en la porción central del área.	30
Tabla 8 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 6 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	31
Tabla 9 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 7 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	33
Tabla 10 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 8 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	35
Tabla 11 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 9 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.	36

# GEOFÍSICA SOMERA PARA TRES CASOS DE APLICACIÓN EN LA GEOTECNIA

## INTRODUCCIÓN

El objetivo del ingeniero geofísico en la geotecnia es el coleccionar e interpretar mediciones de las propiedades físicas de la tierra por medio de métodos físicos cuantitativos, como la reflexión y la refracción sísmica, prospección eléctrica y prospección electromagnética. La tierra está compuesta de materiales que tienen diferentes propiedades físicas, y a su vez poseen diferentes densidades, velocidades de onda, módulos elásticos, conductividades eléctricas, susceptibilidades magnéticas y constantes dieléctrica. El papel del ingeniero geofísico en la geotecnia es entonces, diseñar el registro, procesar e interpretar estas propiedades, para así complementar un estudio de caracterización de sitio, ingeniería sísmica o estabilidad de taludes transformando los datos de campo a un modelo de propiedades físicas aparentes.

La aplicación de las técnicas geofísicas a la Geotecnia ha mostrado resultados satisfactorios durante las últimas décadas, el avance tecnológico y el desarrollo de procesos más sofisticados permite que los ingenieros geofísicos realicen modelos cada vez más robustos y detallados dando solución a los problemas que enfrenta la ingeniería en la actualidad.

Los estudios geofísicos pueden ser realizados en la superficie del terreno, dentro de pozos, sobre el agua y dentro de ella, y también en el aire. Para fines geotécnicos los estudios geofísicos no superan los cien metros en la mayoría de los casos, aunque existen sus excepciones. En la geotecnia los estudios geofísicos son realizados de manera cotidiana para diferentes tipos de investigaciones como:

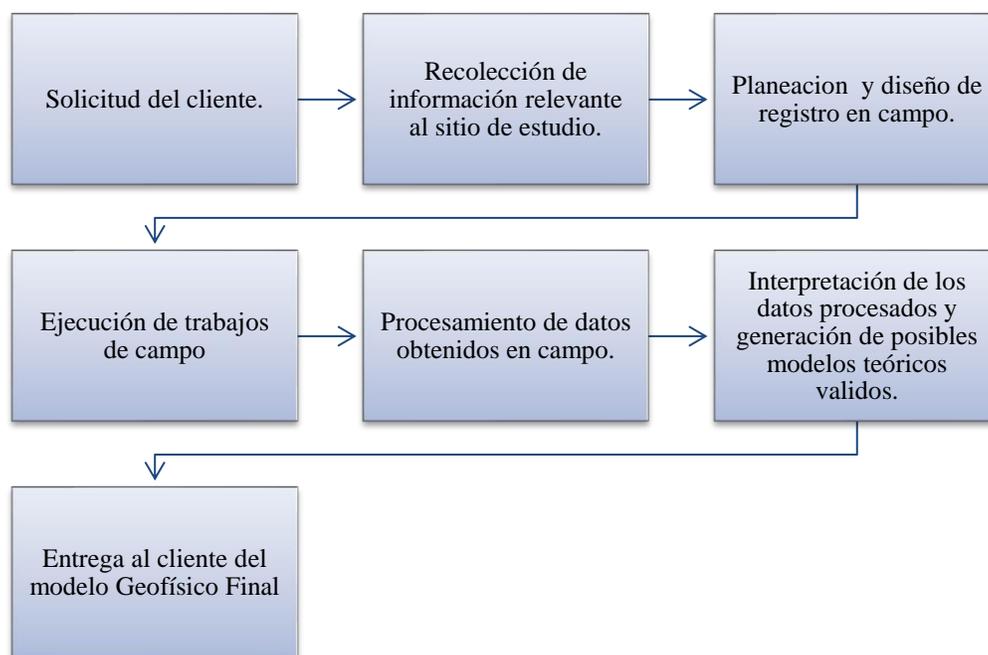
1. **Caracterización de la superficie:** profundidad a la capa más competente(firme), tipo de roca, identificación de las capas, nivel freático, flujo subterráneo de agua, localización de fracturas etc.
2. **Propiedades de los materiales terrestres:** dureza, densidad, resistividad eléctrica, porosidad, etc.
3. **Subsistencia:** Detección de cavidades, minas abandonadas, etc

Algunas de las ventajas de los métodos geofísicos comparados con métodos invasivos son, la portabilidad del equipo, lo no invasivo de los métodos y a la seguridad para el o los operadores del equipo. El equipo geofísico puede ser instalado debajo de puentes, líneas de electricidad, áreas con mucha vegetación, sitios

contaminados, áreas urbanas, pavimento, roca o casos en los que no sea posible el acceso de maquinaria, por ejemplo, para hacer pruebas de penetración de cono (CPT). La principal ventaja de la geofísica aplicada a la geotecnia radica en que representa una mejor relación costo-beneficio y rapidez de los estudios sobre grandes áreas de estudio (Sirles,2006).

Debe considerarse que la geofísica aplicada a la geotecnia no reemplaza campañas de perforación ni muestreo directo selectivo, la geofísica complementa y enriquece el modelo final, aportando información relevante que de otra manera no hubiera sido posible de registrar.

Finalmente como todo proceso o técnica en la ingeniería, la geofísica tiene ciertas limitaciones que el ingeniero debe tener presente, la limitación más importante a considerar es la **no unicidad en la geofísica**, es decir, que al no tener la certeza de la variación espacial en profundidad para un sitio de estudio, existen una infinidad modelos geofísicos teóricos correctos que se ajustan a las evidencias geológicas, es en este proceso donde la pericia y la experiencia del ingeniero pueden ayudar a seleccionar el modelo más idóneo para el proyecto.



**DIAGRAMA.** Flujo de trabajo de estudios geofísicos aplicados a la geotecnia

## **OBJETIVO GENERAL.**

Aplicar metodologías de geofísica somera para tres diferentes problemáticas de geotecnia.

# CASO 1

## PRUEBAS MICROSÍSMICAS PARA DETERMINAR LA INTEGRIDAD FÍSICA EN DOS PILAS DE CIMENTACIÓN DE UN PROYECTO INMOBILIARIO EN LA CIUDAD DE MÉXICO.

### **INTRODUCCIÓN.**

Actualmente se construye el sistema de cimentación, a base de Pilas, trabes de liga y dados de concreto reforzado, para las estructuras metálicas que formarán parte de un nuevo proyecto, que se localiza en la Ciudad de México.

El principal objetivo de este tipo de prueba fue revisar la integridad física y la continuidad de las Pilas de cimentación elegidas, así como la calidad del concreto utilizado en su construcción. Para ello se aplicó el método de reflexión sísmica, a fin de examinar la forma en que se transmiten las ondas sísmicas a lo largo de cada Pila de cimentación.

### **ANTECEDENTES.**

La revisión de las Pilas de cimentación se llevó a cabo con la técnica geofísica denominada Método de Reflexión Sísmica “MRS”, ya que utiliza los principios de la reflexión sísmica y sus métodos de interpretación, junto con las técnicas y equipos de la exploración geosísmica, como son los sensores de movimiento, el sismógrafo y los demás accesorios que se requieren para ensayar las Pilas de cimentación.

Este tipo de estudios permite registrar probables anomalías o discontinuidades sismo-elásticas en el cuerpo de estas Pilas, como fracturas y oquedades, así como la calidad del concreto utilizado en su construcción.

En esencia este método consiste en generar ondas de esfuerzo de muy pequeña amplitud mediante impactos de marro que se aplican sobre la porción superior del elemento estructural en estudio (en este caso, de cada Pila), y en registrar la propagación de estas ondas a lo largo de su fuste o cuerpo, tal como se indica en forma esquemática en la Figura 1.

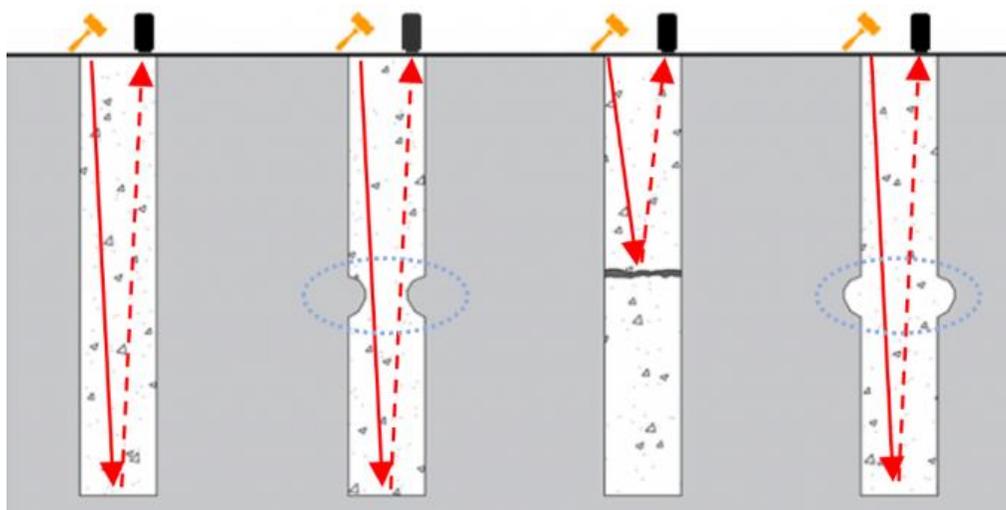


FIGURA 1 DIFERENTES ESCENARIOS DE LAS ONDAS PARA LA PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PILAS DE CIMENTACIÓN.

### DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Dentro de los trabajos de supervisión y control de calidad de los elementos estructurales que forman la cimentación de este proyecto inmobiliario, se ha incluido la revisión de la integridad física y continuidad de 2 Pilas (19C y 19D) de la Etapa 1 (**Error! Reference source not found.**), aplicando técnicas de exploración indirecta (geofísica) basadas en la propagación de ondas elásticas de muy pequeña amplitud y muy corta duración, a través del cuerpo o fuste de la Pila.

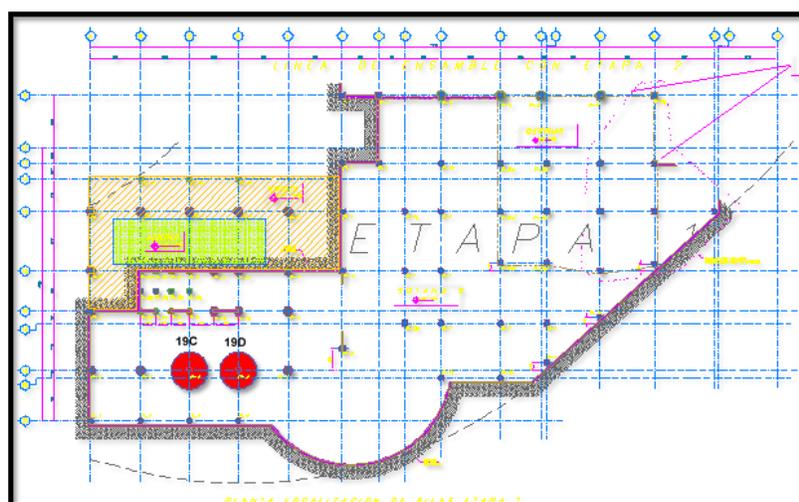


FIGURA 2 PLANO DE LOCALIZACIÓN DE LAS PILAS DE CIMENTACIÓN ENSAYADAS (19C Y 19D) CON LA TÉCNICA "MRS".

Por brevedad, en el presente documento esta técnica se denominará Método de Reflexión Sísmica (MRS), cuyos fundamentos, procedimiento de ejecución e interpretación de resultados, cumplen la norma ASTM D5882-7.

## **METODOLOGÍA UTILIZADA.**

### **Fundamento y aplicación del método sísmico.**

Cuando un objeto se impacta sobre la superficie del terreno, y en general, cuando se libera energía mecánica sobre la superficie de la Tierra o en su interior, se generan ondas elásticas de esfuerzo o de deformación, denominadas ondas sísmicas, que se clasifican en dos grupos: “ondas de cuerpo” y “ondas superficiales”.

Al primer grupo pertenecen las ondas de compresión o longitudinales, también llamadas ondas “P”, y las ondas de cortante o transversales, que también se conocen como ondas “S”. En las ondas “P” el movimiento de las partículas de terreno se produce en la misma dirección en que se propagan estas ondas, con dilataciones y compresiones sucesivas.

En las ondas “S”, en cambio, el movimiento de las partículas del terreno se efectúa en un plano perpendicular a la dirección en que se transmite este tipo de ondas. En las ondas S hay un tipo de ondas que se polarizan horizontalmente (ondas SH), y otras que se polarizan verticalmente (ondas SV).

Otra característica de las ondas de cuerpo es que la velocidad de propagación de las ondas P siempre es mayor que la velocidad de transmisión de las ondas S. Por ello a las ondas P también se les conoce como ondas Primarias, y a las ondas S como ondas Secundarias.

El principio en que se basan las pruebas MRS proviene de la teoría de propagación de ondas en medios elásticos, que considera a cada Pila de cimentación como un elemento estructural formado por un sólido ideal con las siguientes características: isótropo, lineal, elástico y homogéneo.

Por esta razón, para la aplicación e interpretación de los resultados de estas pruebas se considera que las ondas de esfuerzo de compresión que interesan, al transmitirse a través del fuste o cuerpo de la Pila, lo hacen en un medio linealmente deformable, en el que las ondas primarias (ondas P) llegan a los sensores o captadores de movimiento cuyo diseño corresponde a un sistema simple amortiguado.

La vibración así registrada va disminuyendo de amplitud conforme transcurre el tiempo, debido a la disipación de energía (amortiguamiento) propia del concreto que forma la Pila. La resolución del sismógrafo con el que se mide el tiempo de arribo de las ondas P es de 31.25  $\mu$ s (microsegundo).

En general, la velocidad de propagación de las ondas P ( $V_p$ ) depende de las características del material o de los materiales que forman la Pila de cimentación, como su rigidez, resistencia, densidad y condiciones de frontera, así como de sus características de continuidad y de sanidad (integridad física).

En una Pila de concreto cuya resistencia nominal a la compresión ( $f'_c$ ) o resistencia de proyecto sea 250 a 300 Kg/cm<sup>2</sup> se pueden esperar valores de  $V_p$  del orden de 3,500 m/s. Sin embargo, tal como se acaba de señalar en el párrafo anterior, la velocidad  $V_p$  puede ser diferente, dependiendo de las características de los materiales que forman la Pila (Por ejemplo, la resistencia  $f'_c$  y el peso volumétrico del concreto), de sus condiciones de apoyo y de su estado físico, todo lo cual se asocia a su rigidez y dureza.

Este intervalo de valores de  $V_p$  esperado, se refiere a una prueba obtenida sin retrasos en los tiempos de llegada de las ondas P, es decir, en un concreto sano, sin discontinuidades como grietas o zonas de debilidad, incluyendo cavidades y fracturas, y en general, heterogeneidades en el interior de la Pila.

Es importante tener en cuenta que en la ejecución de estas pruebas se recorre verticalmente el fuste o cuerpo de la Pila, lo que permite identificar la presencia de cualquier anomalía o heterogeneidad como las señaladas en el párrafo anterior. Esto se debe a que la trayectoria del tren de ondas sísmicas interseca las anomalías que pudiese encontrar en su camino, como el fracturamiento o las cavidades recién citadas.

### **Equipo Utilizado en las Pruebas MRS.**

Para la realización de las Pruebas de Reflexión Sísmica se utilizaron los siguientes elementos de trabajo:

- Un sismógrafo portátil de 12 canales, para el registro de las señales simultáneas que reciben los sensores de movimiento o geófonos instalados en la zona perimetral de la parte expuesta o cara superior de la Pila en estudio.
- Un juego de geófonos verticales, como elementos receptores de movimiento, que reciben las señales sísmicas que provienen del foco de emisión o perturbación y que se propagan hasta el fondo de la Pila, reflejándose hasta alcanzar la superficie de esta última. De ahí se vuelven a reflejar en forma sucesiva hasta que la señal resulta imperceptible o la cubren las vibraciones producidas por el tráfico vehicular o algún agente natural.
- Un martillo para producir impactos sobre la parte superior de la Pila. Al liberarse la energía mecánica en cada impacto aplicado sobre el extremo superior de la Pila, se generan ondas de cuerpo en el interior de esta, de las que únicamente interesan las ondas “P”, ya que se asocian a los esfuerzos de compresión en las Pilas. Este martillo trasmisor, al momento de hacer contacto con la Pila, mediante

un cable envía una señal eléctrica al sistema de arranque del sismógrafo ya mencionado, permitiendo el registro de las señales sísmicas en el dominio del tiempo.

- Una computadora portátil para registro de señales y registro de cada una de las pruebas.
- Paquetería para el análisis, interpretación y lectura de los sismogramas o registros sismográficos.

### **Actividades Previas.**

Identificación en campo de las Pilas programadas para los ensayos MRS. Traslado, instalación y conexión de los elementos y accesorios que forman el equipo de registro sísmico como se muestra en la Figura 3.

Minimización de la presencia de vibraciones producidas por fuentes móviles o fijas que pudiesen enviar, a los geófonos o receptores de movimiento, ondas de esfuerzo o movimientos que se propagan a través del terreno (ruido mecánico), producidas principalmente por maquinaria, equipos y tráfico vehicular, y que pudiesen mezclarse con las señales que interesan en las Pruebas de Reflexión Sísmica.



**FIGURA 3 PREPARANDO LA PILA 19D PARA FIJAR LOS GEÓFONOS Y REALIZAR LAS PRUEBAS MICROSÍSMICAS EN LA ETAPA 1 DEL PROYECTO INMOBILIARIO.**

Sí con el equipo sísmico se observa que las primeras mediciones o pruebas en las Pilas están afectadas por las interferencias del ruido mecánico y vibraciones debidas al tráfico vehicular, las pruebas programadas en cada Pila se deberán realizar en condiciones de bajo ruido ambiental.

Esta condición se consigue en lapsos libres del paso de vehículos o de operación de maquinaria, y sin movimientos de vehículos y personas en la cercanía de las Pilas en estudio. Por esta razón muchas veces las pruebas MRS se realizan por las noches, cuando se tienen bajos niveles de ruido ambiental y, por lo tanto, registros sísmicos con buena relación señal sísmica /ruido, es decir, sismogramas legibles y confiables.

### **Ejecución de las Pruebas.**

Instalación de geófonos en la superficie descubierta de la Pila, en puntos diametralmente opuestos, conexión de estos al cable sísmico y este a su vez al sismógrafo portátil. Conexión del sistema arrancador del sismógrafo y de la interfase de este último a la computadora portátil. Verificación del correcto funcionamiento de todo el equipo de registro sísmico, minimizando cualquier interferencia.

Permaneciendo fijos los geófonos sobre la Pila en estudio, se aplicaba un impacto vertical sobre dicha Pila utilizando un marro de 1.8 Kg. (El punto donde se aplicaba el impacto, se denomina “punto de tiro” o “fuente de ondas”).

Este “punto de tiro” se ubicó sobre la superficie descubierta de la Pila, aplicando de 4 a 5 golpes de marro. Después de cada golpe se procedía a registrar una prueba, que consistió en captar con los geófonos, en forma simultánea, los trenes de ondas que se reflejan dentro de la Pila, y en el envío por cable de estas señales al sismógrafo portátil.

Una vez realizadas estas pruebas, se procedió a identificar y registrar los archivos en una computadora portátil. El archivo de cada prueba se forma con los gráficos o historias de movimiento denominados sismogramas, cuya duración es de 70 milisegundos (ms).

El archivo correspondiente a cada prueba efectuada contiene un número y la identificación de la Pila en estudio.

### **Trabajos de Gabinete.**

- En gabinete y con la ayuda de software se recuperaron los archivos y se analizó el contenido de los sismogramas, para identificar los reflejos de las ondas P que son las de interés en el presente estudio.

- Con base en el análisis detallado, interpretación y lectura de los sismogramas, se realizaron los cálculos necesarios, se interpretaron los resultados obtenidos y se elaboraron las figuras, el texto del Informe Técnico sobre los resultados de las pruebas realizadas.

## RESULTADOS.

### Sismogramas.

Todos los sismogramas son las “historias de movimiento” o “trazas” de las ondas sísmicas. Las escalas horizontales que aparecen en cada sismograma muestran las marcas de tiempo, en milisegundos (ms).

De los registros así obtenidos (Figura 4 y Figura 5), se eligieron para su análisis, interpretación y lectura los sismogramas correspondientes a los geófonos instalados en la sección transversal de la Pila.

Analizando el sismograma obtenido con uno de estos geófonos, primero se determinaron los tiempos de inicio de los reflejos que interesan y posteriormente se promediaron estas lecturas para obtener el tiempo de reflejo de las ondas “P” en el primer punto de registro. De igual manera se procedió con el sismograma obtenido en el segundo punto de registro. Finalmente, se determinaron los tiempos de reflejo de la Pila, promediando los resultados obtenidos en estos puntos.

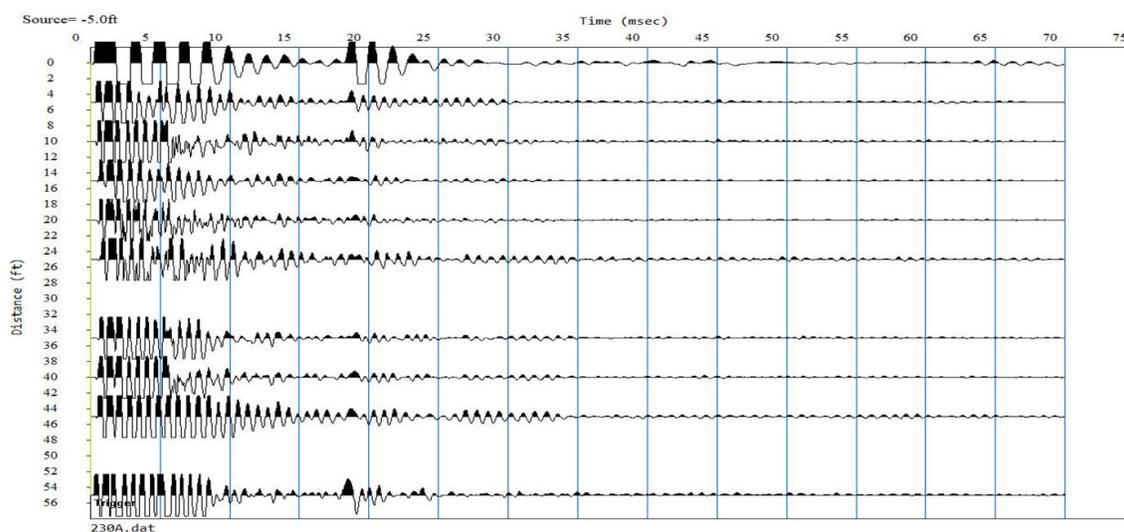
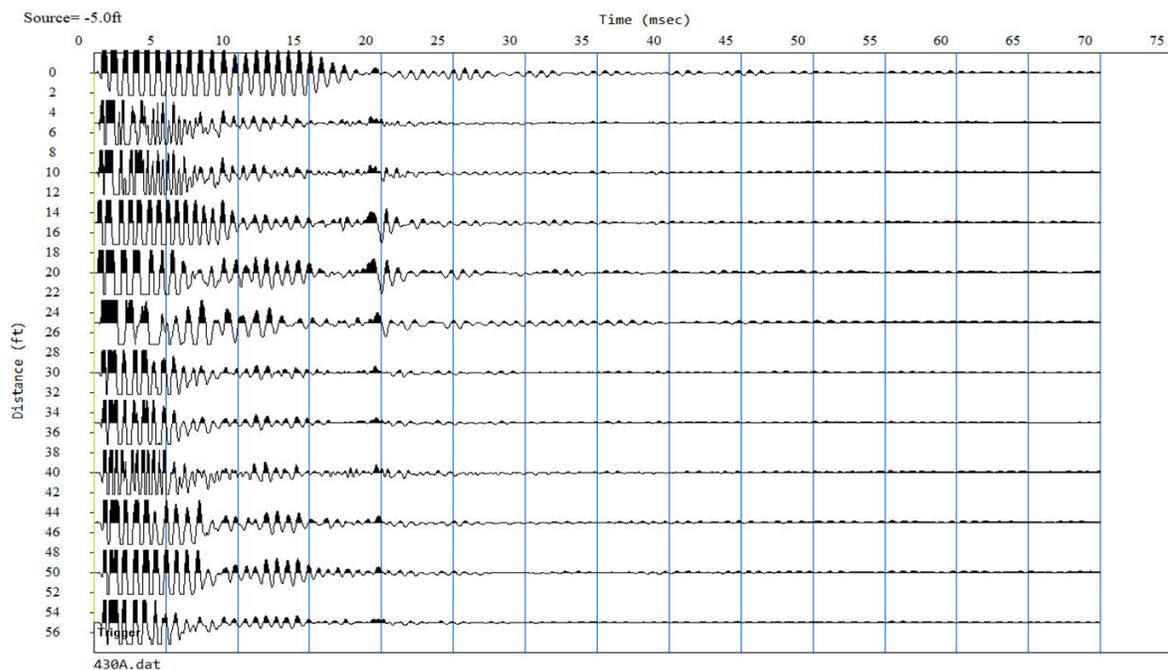


FIGURA 4 SISMOGRAMA DE LA PILA 19C.

Como ya se estableció, el principio del MRS se basa en la emisión y recepción de ondas P, generadas desde la cara superior de una Pila mediante un impacto de marro.

El experimento consiste en registrar la llegada de las ondas sísmicas que se propagan por el fuste de la Pila hasta llegar a la interfase entre la Pila y el terreno donde se apoya. Si la Pila es continua entonces al llegar la onda P a la cara inferior, esta se refleja hacia la superficie y se registra con sensores (geófonos) instalados en la cara superior.

En general, la velocidad de onda P del concreto se calcula dividiendo la longitud de la Pila entre el tiempo correspondiente al reflejo principal. Conociendo la velocidad del concreto se establece su calidad (mala, mediana o buena).



**FIGURA 5 SISMOGRAMA DE LA PILA 19D.**

En la velocidad de propagación de la onda  $V_p$  intervienen, además de la resistencia nominal  $f'_c$ , el peso volumétrico y el tipo de agregados con que se fabrica el concreto. Un valor de referencia de un concreto de buena calidad es de una velocidad del orden de 3500 m/s.

En las dos Pilas ensayadas (19C y 19D) se ha determinado una velocidad del concreto en un rango que va de 3538 a 3831 m/s, considerando una longitud de Pila igual a 34.00 y 34.09 m respectivamente, indicando que ambas Pilas son continuas en toda su longitud, y que el concreto con el que fueron hechas es de buena calidad.

### Descripción de Resultados.

A continuación, se describen los resultados de las pruebas microsísmicas realizadas en las Pilas 19C y 19D de la Etapa 1 del Proyecto Inmobiliario, ubicado en la Ciudad de México.

#### *Pila "19C".*

En esta Pila se registró un reflejo primario con un tiempo promedio de 17.83 ms (milisegundos) y una velocidad de onda P en el concreto de 3831.22 m/s, considerando una longitud de Pila  $L = 34$  m.

Puesto que los resultados de las pruebas microsísmicas (Tabla 1) indican que la Pila 19C es continua en toda su longitud, y que el concreto es de buena calidad, se acepta esta Pila desde el punto de vista de su integridad física.

Tabla 1. Resumen del cálculo de la Pila 19C.

PILA.	No.	DIÁMETRO (m)	LONG. DE COLADO (m)	LONG. DESCABEZADA (m)	LONG. ENSAYE (m)	FECHA DE COLADO	FECHA DE ENSAYE	REFLEJO PRIMARIO (ms)	VELOCIDAD DEL CONCRETO (m/s)	OBSERVACIONES.
19C	61	1.40	35.00	34.00	34.00	11-jun	21-jul	18.00	3777.78	<b>PILA ACEPTABLE *</b>
								17.90	3798.88	
								17.90	3798.88	
								17.60	3863.64	
								18.10	3809.79	
								17.80	3820.22	
								<b>17.83</b>	<b>3831.22</b>	
<i>* LAS PRUEBAS INDICAN QUE LA PILA ES CONTINUA EN TODA SU LONGITUD Y EL CONCRETO ES DE BUENA CALIDAD.</i>										

**Pila "19D".**

En esta Pila se registró un reflejo primario con un tiempo promedio de 19.33 ms (milisegundos) y una velocidad de onda P en el concreto de 3538.79 m/s, considerando una longitud de Pila  $L = 34.09$  m.

Tabla 2. Resumen del cálculo de la Pila 19D.

PILA.	No.	DIÁMETRO (m)	LONG. DE COLADO (m)	LONG. DESCABEZA (m)	LONG. ENSAYE (m)	FECHA DE COLADO	FECHA DE ENSAYE	REFLEJO PRIMARIO (ms)	VELOCIDAD DEL CONCRETO (m/s)	OBSERVACIONES.
19D	62	1.40	35.00	34.09	34.09	13-jun	21-jul	19.20	3551.04	<b>PILA ACCEPTABLE *</b>
								19.20	3551.04	
								19.10	3569.63	
								19.30	3532.64	
								19.40	3551.09	
								19.30	3532.64	
								<b>19.33</b>	<b>3538.79</b>	
<i>* LAS PRUEBAS INDICAN QUE LA PILA ES CONTINUA EN TODA SU LONGITUD Y EL CONCRETO ES DE BUENA CALIDAD.</i>										

Puesto que los resultados de las pruebas microsísmicas (Tabla 2) indican que la Pila 19D es continua en toda su longitud, y que el concreto es de buena calidad, se acepta esta Pila desde el punto de vista de su integridad física.

# CASO 2

## ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD PARA INVESTIGAR CAVIDADES EN UN PROYECTO HABITACIONAL UBICADO EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO.

### **INTRODUCCIÓN.**

Actualmente se desarrolla un proyecto habitacional en un terreno ubicado, en el Estado de Q. Roo (ver la ubicación de este proyecto en la Figura 6.

Dentro del predio ya mencionado, en un terreno rectangular, ya se han iniciado los estudios técnicos correspondientes a dicho proyecto. (En el presente trabajo, el terreno con las características recién descritas se denominará indistintamente como “el área de estudio”, “el sitio de proyecto” o simplemente “el terreno”).

Para el proyecto ejecutivo de este desarrollo y en particular, para el proyecto estructural de las obras que se construirán en el terreno, es importante caracterizar, desde el punto de vista físico, las posibles estructuras geológicas del terreno que impedirían un buen comportamiento de la cimentación donde se desplantarán las nuevas casas habitación del proyecto habitacional.

### **ANTECEDENTES.**

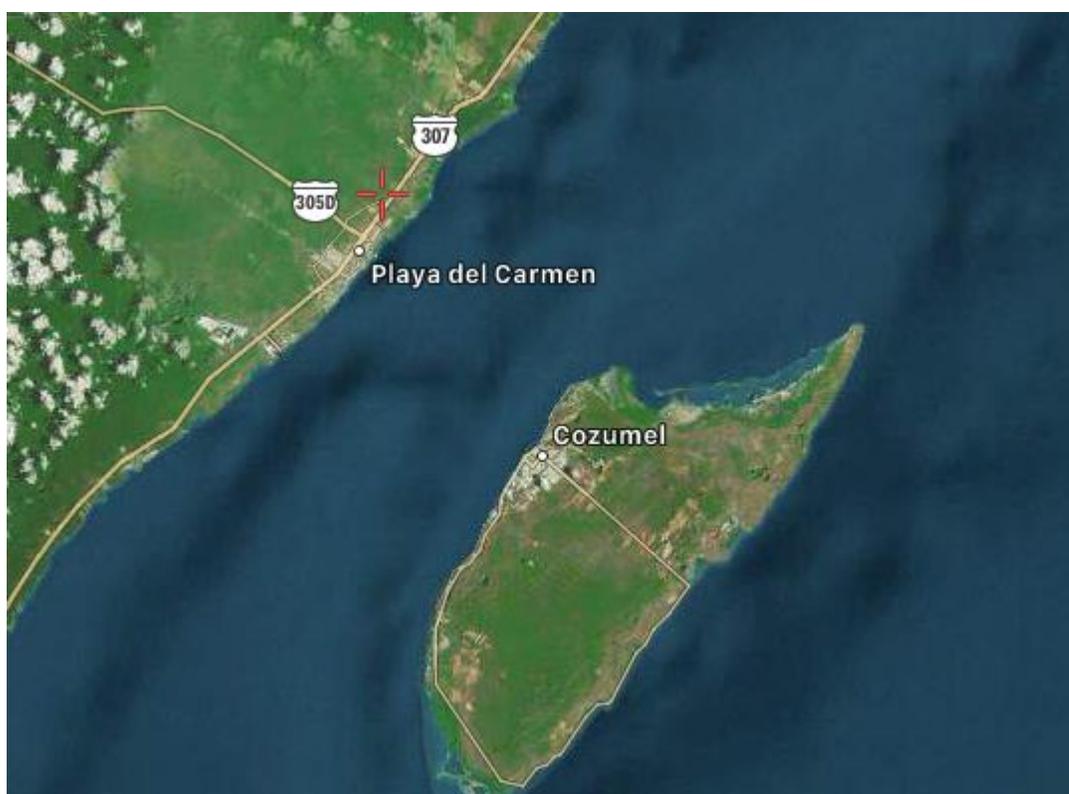
En la región de la Península de Yucatán, las rocas calizas que forman el subsuelo alojan cavidades de diferentes formas y tamaños cerca de la superficie del terreno natural, cuya profundidad y dimensiones se desconocen, por lo cual se requiere investigarlas con métodos indirectos como la Geofísica. (Localmente el término “cenote” designa una cavidad superficial colapsada y de grandes dimensiones).

La formación de estos accidentes geológicos en el subsuelo se debe a la disolución de los carbonatos de calcio por los flujos de agua subterránea que circulan a través de las rocas calizas, lo que desarrolla las citadas oquedades o cavidades, fenómeno que técnicamente se conoce como “carsticidad”. (Una caliza que aloja cavidades es una roca “cárstica”).

El problema con estas cavidades se debe a la resistencia mecánica de la caliza, la cual puede variar dependiendo de su grado de alteración, y, además, su estado físico depende de la naturaleza de los procesos geológicos que han actuado sobre estas calizas. A esto hay que agregar la presencia de grietas y fracturas en este tipo de rocas, así como los cambios de material que se originan cuando los suelos residuales se depositan en las mismas oquedades y en las grietas ya citadas, o bien en las irregularidades topográficas que presenta la superficie del relieve natural.

Por otra parte, la composición de los suelos superficiales y su espesor también son variables. Generalmente provienen de la descomposición de las calizas, que se transforman en arenas de diferentes granulometrías y grados de compactación, que en esta región se conocen como “sahcab” o “sascab”.

Algunas veces estas arenas están cubiertas por suelos residuales que provienen del arrastre de materiales intemperizados o erosionados a través del tiempo debido a factores climáticos, principalmente el agua pluvial, la temperatura y el viento. Estos materiales se depositan formando suelos de distinta consistencia y espesor donde crece la vegetación, que impide observar las discontinuidades existentes en la caliza superficial.



**FIGURA 6 UBICACIÓN APROXIMADA DEL PROYECTO.**

#### **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.**

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, resulta de una importancia fundamental para la estabilidad y seguridad de las nuevas construcciones y la viabilidad de este proyecto desde el punto de vista constructivo, el conocimiento del estado físico y las propiedades mecánicas de los suelos donde se desplantarán las nuevas construcciones e instalaciones incluidas en este proyecto.

Con objeto de investigar la presencia de cavidades y otras discontinuidades en el subsuelo somero del predio donde se construirá el fraccionamiento recién citado, se realizó un Estudio Geofísico basado en técnicas de exploración indirecta del subsuelo aplicando el Método Geofísico de Resistividad en una de sus formas del arreglo Schlumberger: el Polo-Dipolo.

Las propiedades geotécnicas y mecánicas de los suelos y/o rocas se determinan con un Estudio de Mecánica de Suelos y/o de Mecánica de Rocas. Ambos se complementan con el Estudio Geofísico de Resistividad que aquí se presenta, y el conjunto de todos ellos conduce a una caracterización integral del subsuelo, y, por lo tanto, a la calidad y sustentabilidad técnica de este proyecto.

### **METODOLOGÍA UTILIZADA.**

Para establecer la probable presencia de cavidades o alguna otra discontinuidad en el área de estudio, y reducir los efectos negativos de estas discontinuidades geológicas en la estabilidad y operación para las nuevas viviendas, se programó y ejecutó la exploración del área de estudio mediante el perfilaje continuo basado en la técnica del “Polo-Dipolo”.

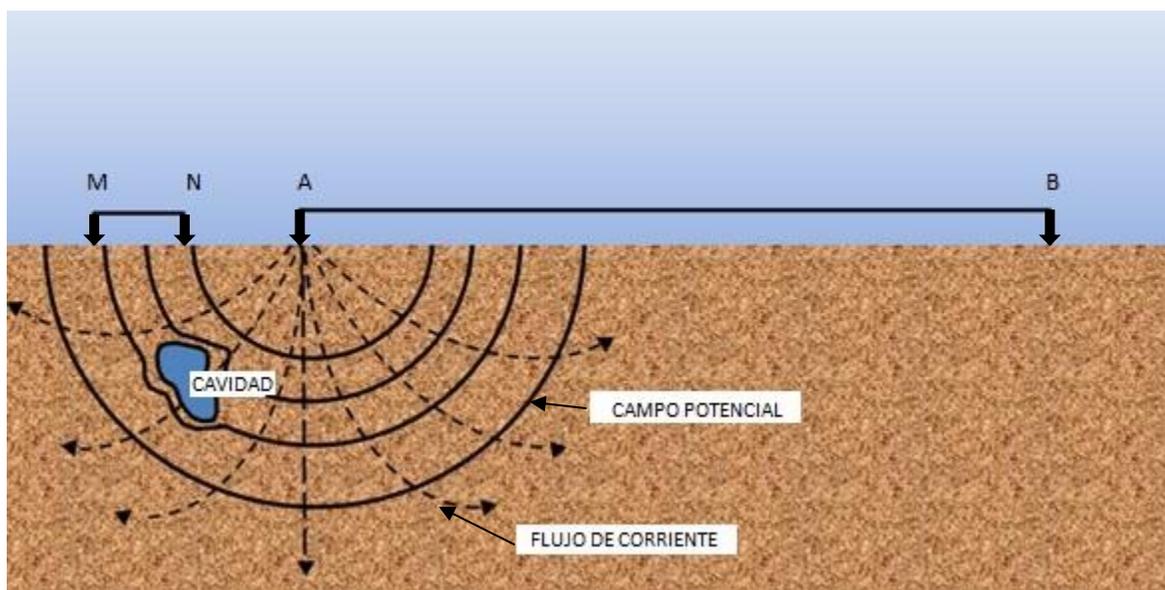
El método consiste en implantar o colocar en el terreno, a lo largo de un segmento rectilíneo, un grupo o arreglo de 11 electrodos separados 3 metros entre ellos, así como dos electrodos de corriente, uno a una distancia que puede considerarse como infinita y el otro que se va entre cada uno de los 11 electrodos (se coloca entre las posiciones 1 y 2, después entre la 2 y 3, y así sucesivamente).

De esta manera se alcanza una profundidad de investigación mayor, conforme se va avanzando y obteniendo una malla de datos. De esta forma se va obteniendo la representación de las estructuras en el subsuelo, así como de las cavidades.

### **Fundamentos del Método Geofísico (Líneas de Polo-Dipolo).**

La modalidad del Polo-Dipolo se utiliza para detectar discontinuidades en el subsuelo tales como: cavidades, grietas, cambios laterales de material, fracturamientos y fallas. También se detecta el mayor o menor contenido de suelos finos en los estratos someros.

Cada línea de Polo-Dipolo consiste en inyectar una corriente ( $I$ ) al terreno mediante un par de electrodos de corriente, A y B (infinito), también llamados “de transmisión”, en los que se genera un campo eléctrico y otro de potencial, como se puede observar en el esquema de la figura 7.



**FIGURA 7 DISTORSIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CUANDO EXISTE UNA CAVIDAD, APLICANDO EL MÉTODO DEL POLO-DIPOLO (MODIFICADA DE DOBRIN,1952).**

Una vez inyectada la corriente, el campo potencial ( $V$ ) generado en el interior del subsuelo, se registra en la superficie del terreno mediante dos electrodos llamados de potencial o “de recepción” M y N, que previamente se conectan a un voltímetro digital, donde se leen los valores de  $V$ .

Con los valores de los parámetros  $I$ ,  $V$  y  $K$  (constante geométrica que depende de la distancia entre los electrodos de corriente y de potencial), se determina la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) a distintas profundidades del subsuelo.

$$\rho_a = K V I^{-1} \quad (1)$$

donde:

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right)^{-1} \quad (2)$$

En la ecuación 2,  $AM$  es la distancia entre el electrodo de corriente A y el electrodo de potencial M. La otra distancia  $AN$  se define de manera semejante.

Cabe mencionar que, para aumentar la profundidad de investigación, basta incrementar la apertura del electrodo de corriente “A” mostrado en la Figura 7.

Los datos de campo (I, V, K) proporcionados por el arreglo del Polo -Dipolo se procesan en una tabla de cálculo.

Con los valores de resistividad y de profundidad correspondientes a las diferentes posiciones de los electrodos de potencial, se alimenta un programa de interpolación para obtener un perfil de isorresistividad (curvas de igual resistividad aparente).

Con los valores de resistividad aparente y de las profundidades correspondientes se procesan mediante software especializado para determinar en dos dimensiones el modelo de resistividad del subsuelo obtenido una imagen de la sección de resistividad aparente (sección de isorresistividad) y una sección resistiva con resistividades y espesores, que se correlaciona con las características geológicas del terreno bajo estudio.

## **RESULTADOS.**

En total se realizaron 9 Líneas de Polo-Dipolo cuya ubicación se indica en el plano de la Figura 8.

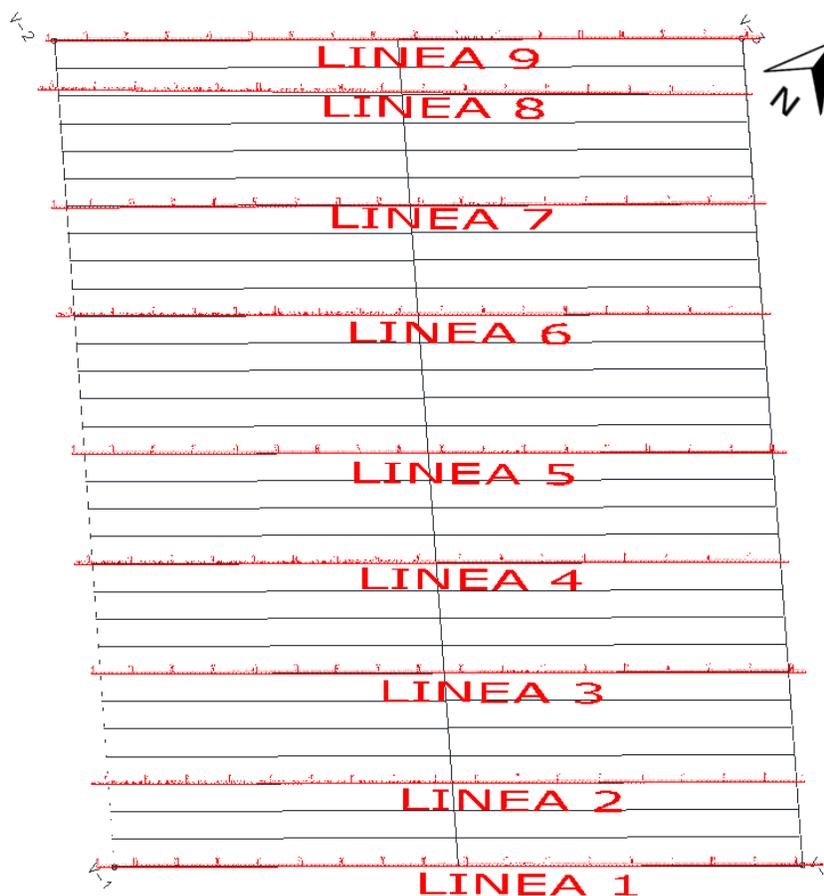


FIGURA 8 UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE POLO-DIPOLO EN EL TERRENO DONDE SE REALIZA EL PROYECTO HABITACIONAL.

### **Interpretación de las Líneas de Polo-Dipolo.**

A continuación, se mencionan los aspectos más sobresalientes de los resultados obtenidos con las Líneas de Polo-Dipolo (LPD) realizadas en el terreno donde se realiza el proyecto habitacional.

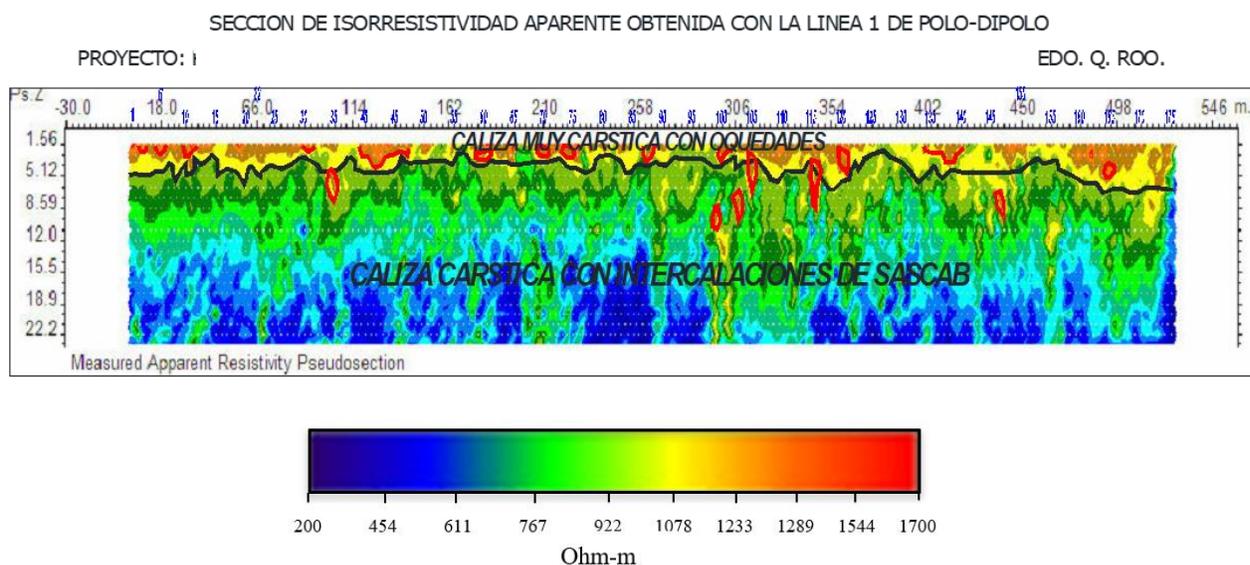
#### ***Línea 1 de Polo-Dipolo.***

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 1 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción sureste del área estudiada. Esta línea se formó con 176 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Suroeste al Noreste.

### ***Sección de Isorresistividad Aparente 1.***

En la Figura 9 se muestran en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad aparente. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las siguientes características resistivas más importantes del subsuelo en esta parte del predio.

En esta sección de isorresistividad aparente en las posiciones 35, 101, 103, 105, 116, 147, se marcan anomalías resistivas con valores de resistividad aparente en el rango de 1200 Ohm-m que se asocian a cavidades con profundidades variables que van de 4 a 10 m. Cabe mencionar que las anomalías resistivas registradas en la parte más somera (profundidad no mayor a 3 m) se refieren a la caliza muy cárstica con oquedades (cavidades registradas en campo).



**FIGURA 9 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 1 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN SURESTE DEL ÁREA.**

En la Tabla 3 se resume lo más sobresaliente de los resultados obtenidos con la Línea 1 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha línea.

En las Tablas que aquí se presentan, conviene tomar en cuenta lo siguiente:

- “POSICIÓN ELÉCTRICA” indica la posición de los electrodos de potencial utilizados en cada Línea de Polo-Dipolo. Los números indican la ubicación de cuerpos resistivos bajo las posiciones marcadas en la Tabla respectiva.
- Las siglas “PROF.” indican la profundidad a la que se estimó el centro de una anomalía resistiva con respecto al nivel actual del terreno. Esta profundidad se obtuvo de la figura asociada a cada Línea de Polo-Dipolo.
- Con respecto a las Coordenadas UTM, el punto de registro de lectura se realizó en la posición que se indica de cada Línea de Polo-Dipolo.

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 1 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste.

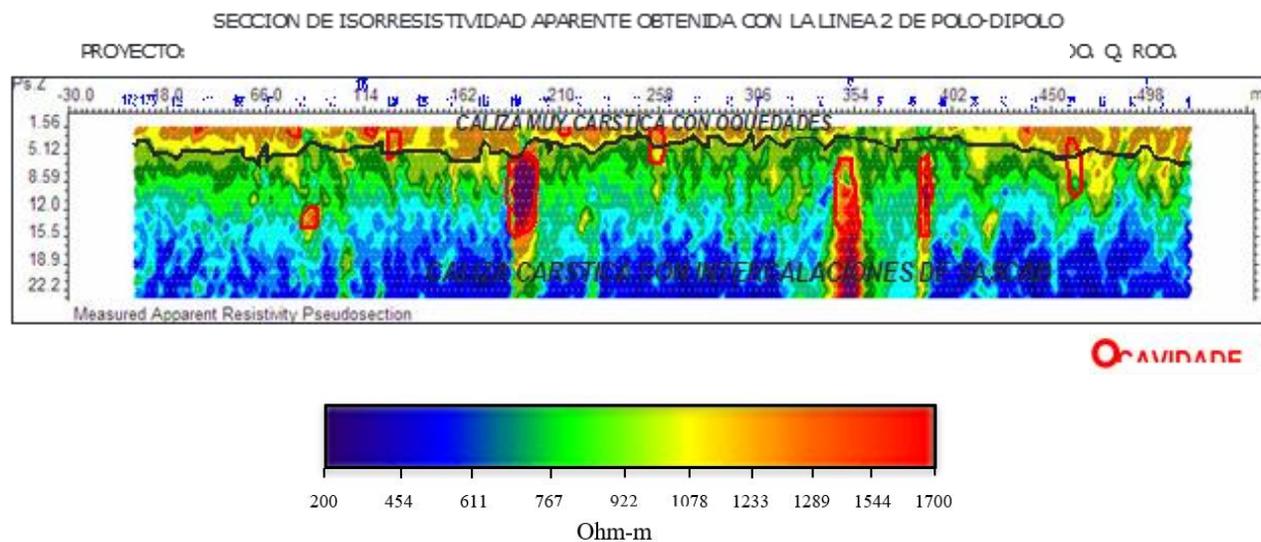
LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF	FIGS	OBSERVACIONES
		(m)		
L1	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 3, 6, 11, 31, de la 40 a 47, 60, 70, 75, 88, 101, 121, de la 135 a 141 y 166</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 35, 101, 103, 105, 116.</p>	1 a 10	9	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1125 Ohm-m y un espesor de 1 a 6 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 6 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

### *Línea 2 de Polo-Dipolo.*

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 2 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción Sureste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Noreste al Suroeste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 10. se muestran en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos con la Línea 2 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha línea.



**FIGURA 10 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 2 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN SURESTE DEL ÁREA.**

Tabla 4. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 2 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.

LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF	FIGS	OBSERVACIONES
		(m)		
L2	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 20, 86, 101, 130, 134 y 146.</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 22, 44, 53, 88, 108, 131, y 141.</p>	1 a 12	10	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1525 Ohm-m y un espesor de 1 a 6 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 6 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

### **Línea 3 de Polo-Dipolo.**

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 3 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción Sureste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Suroeste al Noreste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 11 se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 5 se resumen los resultados obtenidos con la Línea 3 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.

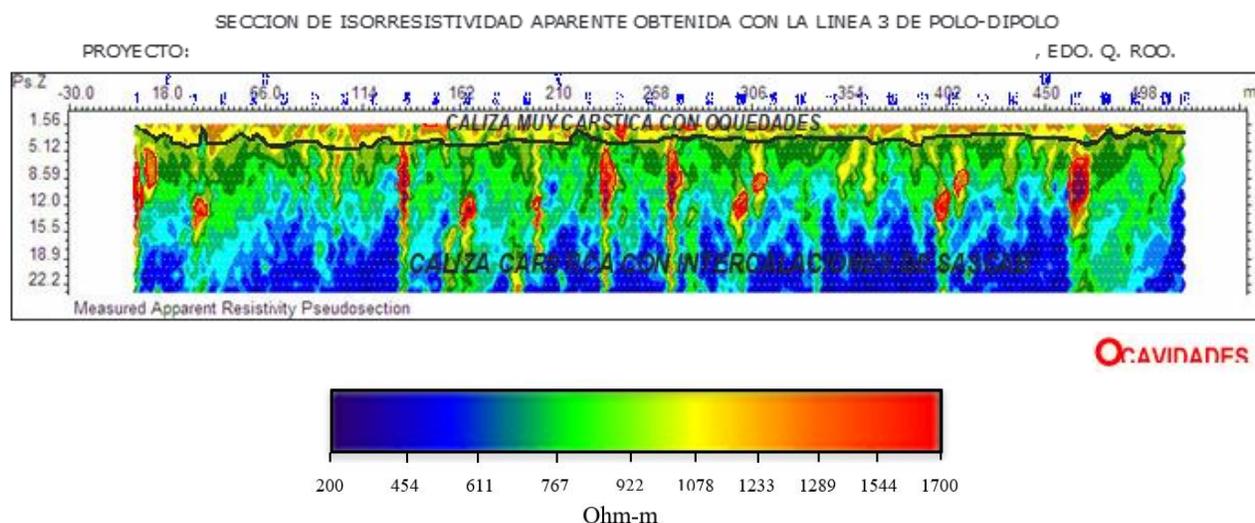


FIGURA 11 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 3 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN SURESTE.

Tabla 5. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 3 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.

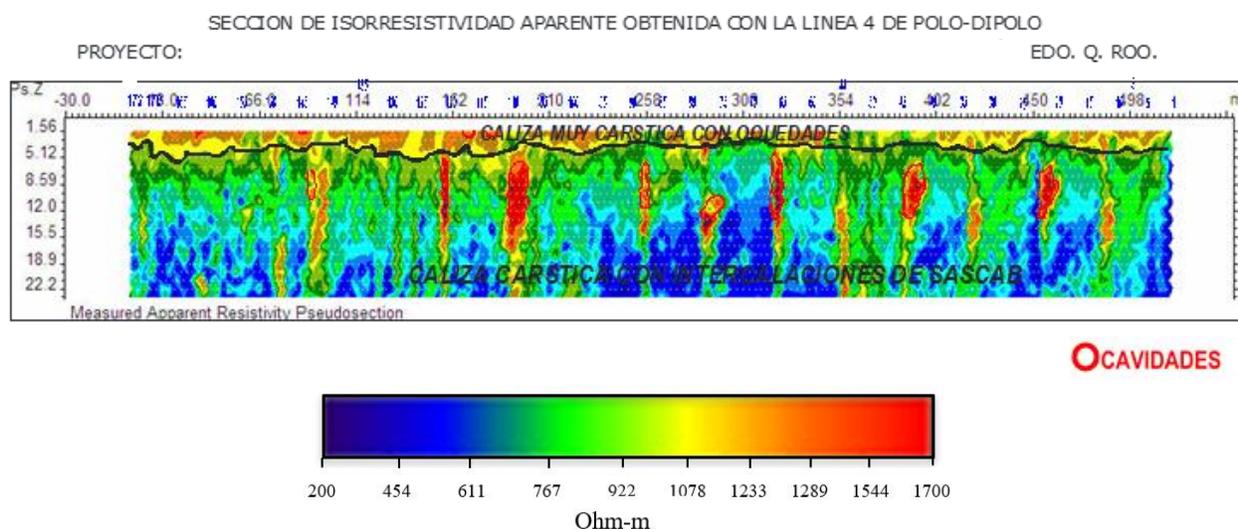
LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF (m)	FIGS	OBSERVACIONES
L3	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 50, 81 y 93</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 1, 4, 11, 45, 55, 67, 78, 89, 101, 104, 134, 136 y</p>	1 a 12	11	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1525 Ohm-m y un espesor de 1 a 5 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 5 m, con resistividades entre 5 a 440 Ohm-m.</p>

*Línea 4 de Polo-Dipolo.*

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 4 de Polo-Dipolo, se implantó en la porción Sureste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electródicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Noreste al Suroeste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 12. se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 6. se resumen los resultados obtenidos con la Línea 4 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.



**FIGURA 12 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 4 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN SURESTE DEL ÁREA.**

Tabla 6. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 4 de Polo-Dipolo realizada en la porción Sureste del área.

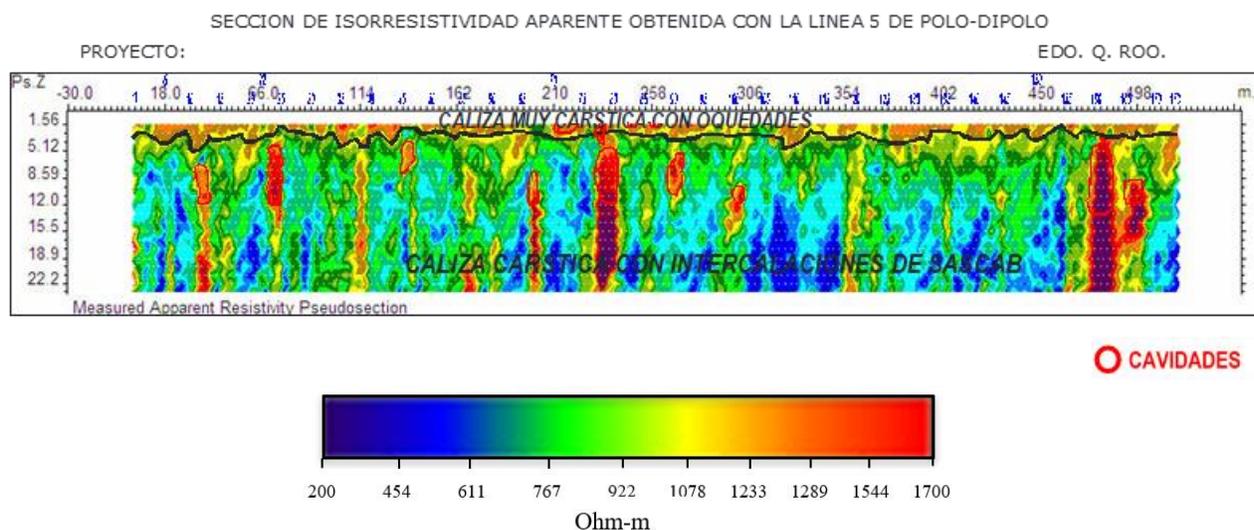
LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF	FIGS	OBSERVACIONES
		(m)		
L4	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 114 y 117</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 22, 44, 66, 77, 89, 110, 121, y 145</p>	2 a 12	12	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1625 Ohm-m y un espesor de 1 a 6 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 6 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

#### ***Línea 5 de Polo-Dipolo.***

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 5 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción central del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Suroeste al Noreste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 13 se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 7. se resumen los resultados obtenidos con la Línea 5 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.



**FIGURA 13 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 6 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN NOROESTE DEL ÁREA.**

Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 5 de Polo-Dipolo realizada en la porción central del área.

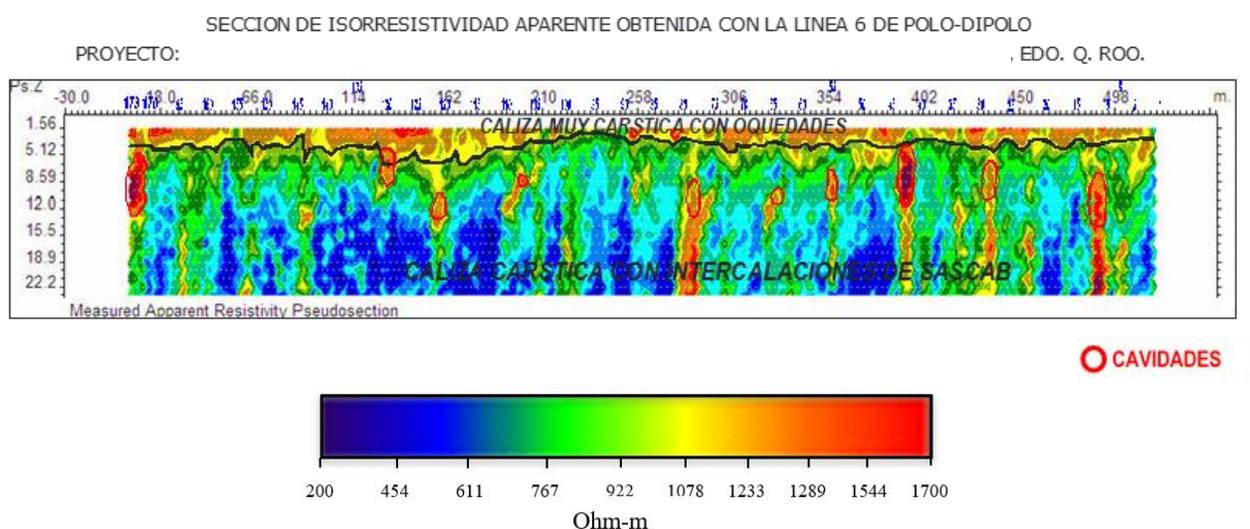
LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF	FIGS	OBSERVACIONES
		(m)		
L5	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 73, 79, 84, y 87</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 13, 25, 47, 67, 80, 90, 101, 161 y</p>	2 a 11	13	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1625 Ohm-m y un espesor de 1 a 5 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 5 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

*Línea 6 de Polo-Dipolo.*

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 6 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción Noroeste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Noreste al Suroeste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 14. se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 8. se resumen los resultados obtenidos con la Línea 6 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.



**FIGURA 14 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 6 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN NOROESTE DEL ÁREA.**

Tabla 8 Resumen de resultados obtenidos con la Línea 6 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.

LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF	FIGS	OBSERVACIONES
		(m)		
L6	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 80, 87, 169 y 172</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 9, 27, 42, 54, 64, 77, 107, 120, 129 y</p>	2 a 12	14	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1625 Ohm-m y un espesor de 1 a 6 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 6 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

### ***Línea 7 de Polo-Dipolo.***

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 7 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción Noroeste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Suroeste al Noreste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 15. se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 9. se resumen los resultados obtenidos con la Línea 7 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.

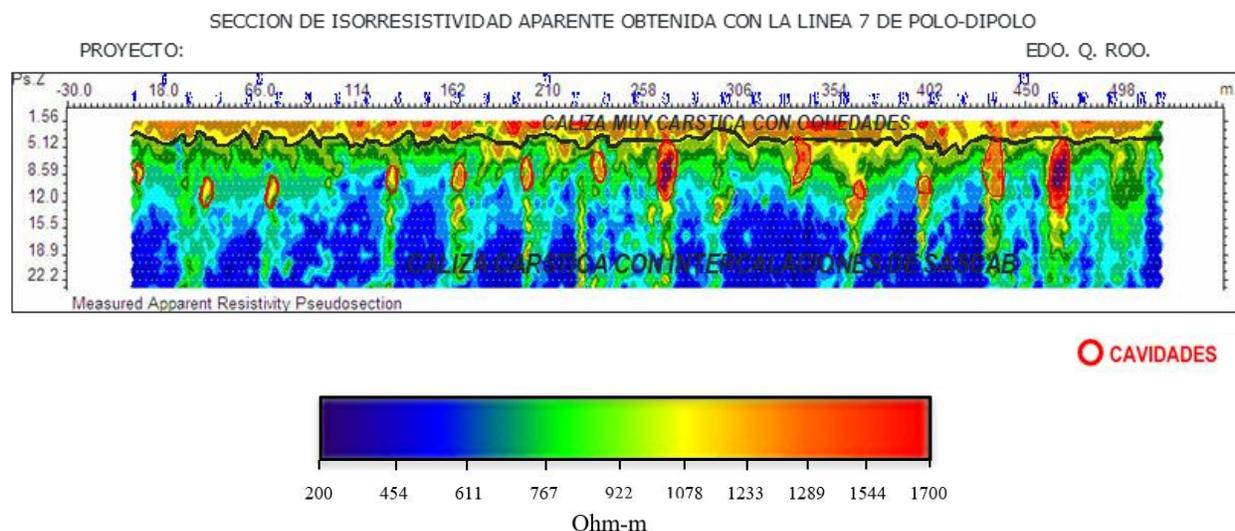


FIGURA 15 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 7 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN NOROESTE DEL ÁREA.

Tabla 9. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 7 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.

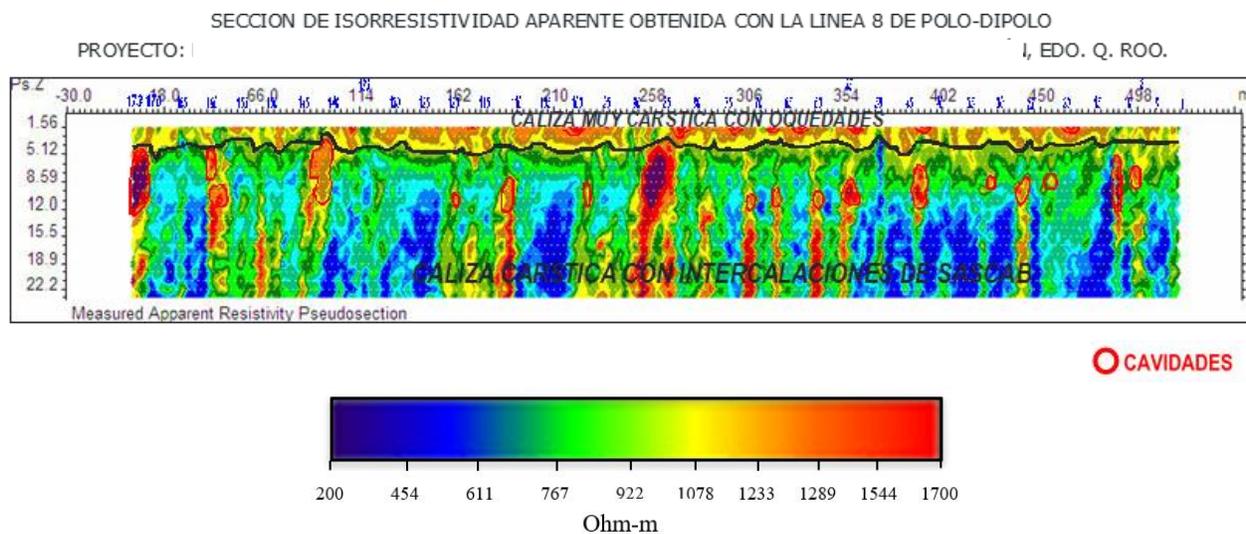
LÍNEA	POSICIÓN ELÉCTRICA	PROF (m)	FIGS	OBSERVACIONES
L7	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 40, 45, 50, 55, 65, 68, 76, 117, 134 y 137.</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 2, 14, 25, 44, 55, 67, 79, 90, 113, 123, 134, 145, y 156.</p>	2 a 11	15	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1425 Ohm-m y un espesor de 1 a 6 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 6 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

### ***Línea 8 de Polo-Dipolo.***

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 8 de Polo-Dipolo, que se implantó en la porción Noroeste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Suroeste al Noreste, tal como se observa en la Figura 8.

En la Figura 16. se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 10. se resumen los resultados obtenidos con la Línea 8 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.



**FIGURA 16 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 8 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN NOROESTE DEL ÁREA.**

Tabla 10. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 8 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.

LÍNEA	POSICION ELECTRICA	PROF	FIGS	OBSERVACIONES
		(m)		
L8	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 100, 82, 73, 67, 53, 42 y 19.</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 8, 10, 21, 25, 30, 42, 54, 59, 66, 70, 86, 97, 110, 119, 141, 158, 159 y 171.</p>	2 a 11	16	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1425 Ohm-m y un espesor de 1 a 5 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 5 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

### **Línea 9 de Polo-Dipolo.**

Esta sección geofísica se obtuvo con los resultados de la Línea 9 de Polo-Dipolo, se implantó en la porción Noroeste del área estudiada. Esta línea se formó con 173 estaciones electrónicas separadas entre sí 3 m. La orientación de esta Línea fue del Suroeste al Noreste, tal como se observa en la Figura 8.

En la *Figura 17* se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos con esta línea, mediante curvas isorresistivas o de igual resistividad. De la observación y análisis de la forma, dimensiones y valores de resistividad que presentan estas curvas, se desprenden las características resistivas más relevantes del subsuelo en el área estudiada.

En la Tabla 11 se resumen los resultados obtenidos con la Línea 9 de Polo-Dipolo realizada para el proyecto habitacional, las características litológicas del subsuelo y observaciones sobre las curvas isorresistivas del subsuelo registradas en el sitio donde se implantó dicha Línea.

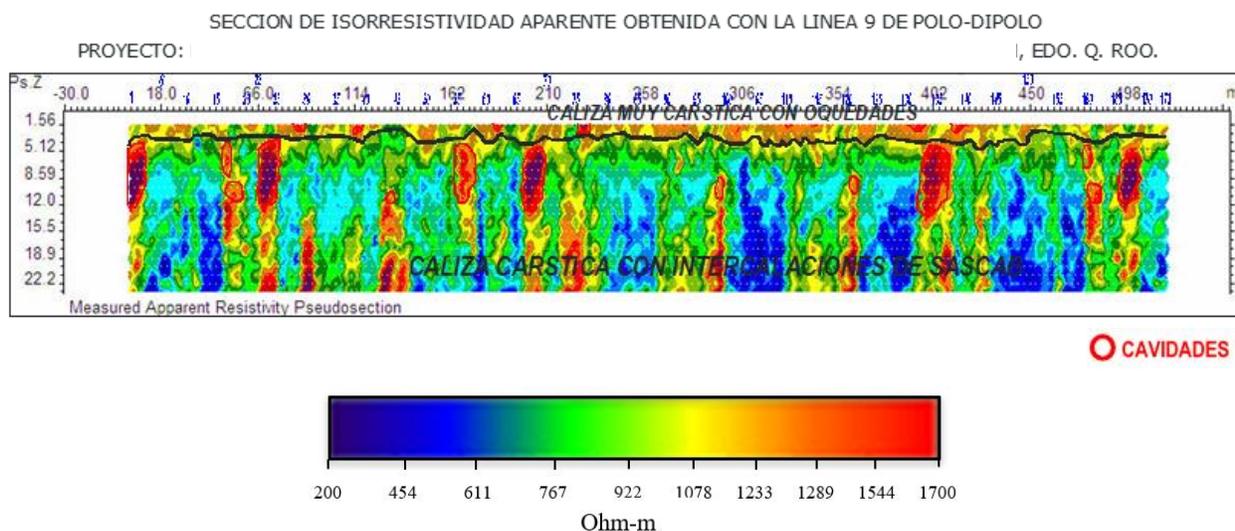


FIGURA 17 RESULTADOS OBTENIDOS CON LA LÍNEA 9 DE POLO-DIPOLO REALIZADA EN LA PORCIÓN NOROESTE DEL ÁREA.

Tabla 11. Resumen de resultados obtenidos con la Línea 9 de Polo-Dipolo realizada en la porción Noroeste del área.

LÍNEA	POSICION ELECTRICA	PROF (m)	FIGS	OBSERVACIONES
L9	<p><b>Caliza muy cárstica con oquedades</b> en las posiciones 30, 39, 62, 77, 132 y 140.</p> <p><b>Caliza cárstica con intercalaciones de sascab</b> en las posiciones 2, 17, 18, 24, 44, 57, 68, 99, 121, 134, 160, 161 y 167.</p>	2 a 11	17	<p>La <b>caliza muy cárstica con oquedades</b> (color amarillo a rojizo) presentan valores de resistividad de 748 a 1425 Ohm-m y un espesor de 1 a 5 m.</p> <p>El segundo estrato, formado por una <b>roca caliza con intercalaciones de sascab</b> (color azul a verde olivo) se detecta a una profundidad variable que va de 1 a 5 m, con resistividades entre 1000 a 1700 Ohm-m.</p>

### Planos de Isopacas

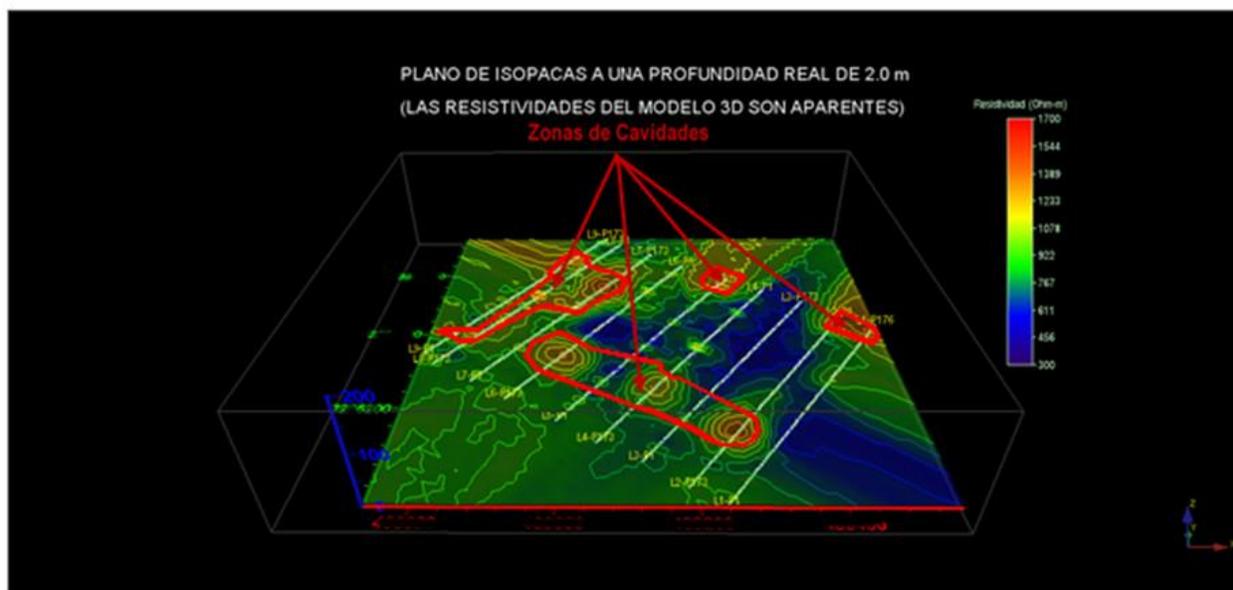
Los datos de resistividad obtenidos con las 9 Líneas de Polo-Dipolo, se analizaron e interpretaron para obtener planos de isopacas o modelos de capas a la misma profundidad, donde se indica la posición de las probables cavidades detectadas con el presente estudio.

Con el procedimiento señalado en el primer párrafo se dibujaron planos de isopacas o plantas a diferentes profundidades, en los que se pueden observar algunos ejemplos de anomalías resistivas que probablemente correspondan a cavidades o alguna otra discontinuidad del subsuelo. Debido al interés que tienen para este proyecto, se seleccionaron los planos de isopacas correspondientes a estas profundidades: de **2.0 m**, **3.0 m** y **6.0 m**, tomando como referencia la superficie actual del terreno estudiado.

De la Figura 18 a la Figura 20 se presentan los “Planos de isopacas” o modelos de capas a la misma profundidad, correspondientes a las profundidades recién citadas.

### **Plano de isopacas a 2.0 m de profundidad en el proyecto habitacional.**

En el plano de la Figura 18, en las áreas delimitadas por el contorno (marcado de color rojo) representan las zonas de cavidades en el área de estudio a una profundidad de 2.0 m y registran valores de resistividad de 1000 a 1700 Ohm-m (colores amarillos a rojos).



**FIGURA 18 PLANO DE ISOPACAS A UNA PROFUNDIDAD DE 2.0 M. LOS EJES MOSTRADOS EN LA FIGURA (DE COLOR ROJO Y VERDE RESPECTIVAMENTE) SON LAS COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM EN EL PLANO “X-Y”, Y EL EJE VERTICAL (COLOR AZUL) “Z” INDICA LA PROFUNDIDAD.**

### **Plano de isopacas a 3.0 m de profundidad en el proyecto habitacional.**

En el plano de la Figura 19, en las áreas delimitadas por el contorno (marcado de color rojo) representan las zonas de cavidades en el área de estudio a una profundidad de 3.0 m y registran valores de resistividad de 1000 a 1700 Ohm-m (colores amarillos a rojos).

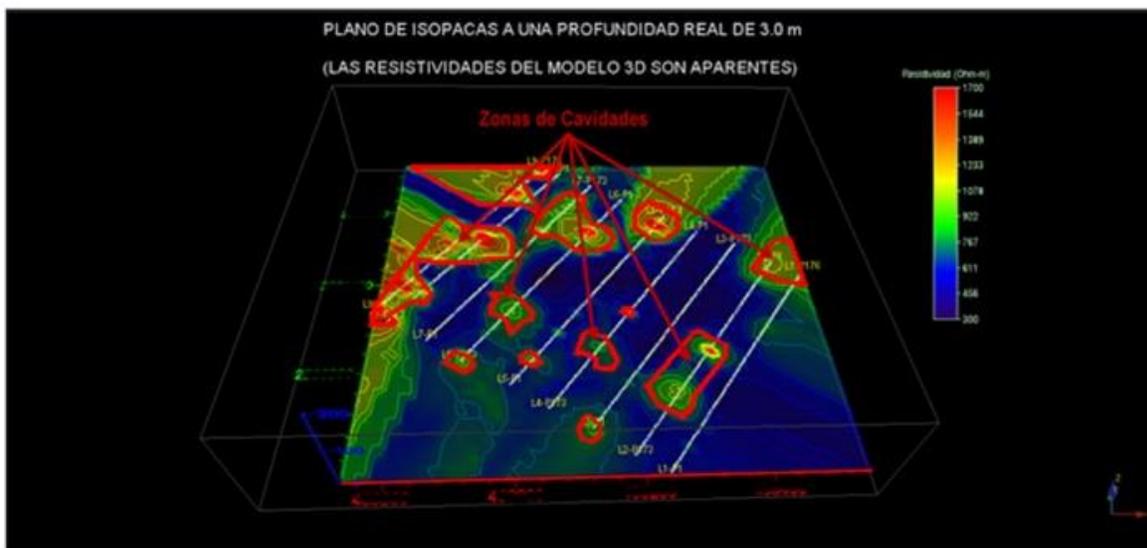


FIGURA 19 PLANO DE ISOPACAS A UNA PROFUNDIDAD DE 3.0 M. LOS EJES MOSTRADOS EN LA FIGURA (DE COLOR ROJO Y VERDE RESPECTIVAMENTE) SON LAS COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM EN EL PLANO “X-Y”, Y EL EJE VERTICAL (COLOR AZUL) “Z” INDICA LA PROFUNDIDAD.

### Plano de Isopacas a 6.0 m de profundidad en el proyecto habitacional.

En el plano de la Figura 20 en las áreas delimitadas por el contorno (marcado de color rojo) representan las zonas de cavidades en el área de estudio a una profundidad de 6.0 m y registran valores de resistividad de 1244 a 3000 Ohm-m (colores amarillos a rojos).

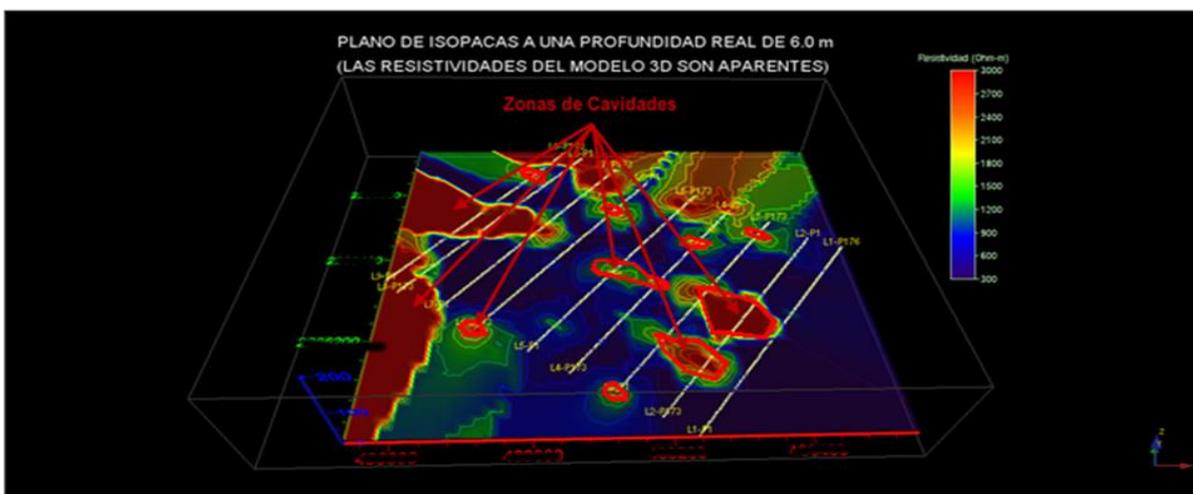


FIGURA 20 PLANO DE ISOPACAS A UNA PROFUNDIDAD DE 6.0 M. LOS EJES MOSTRADOS EN LA FIGURA (DE COLOR ROJO Y VERDE RESPECTIVAMENTE) SON LAS COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM EN EL PLANO “X-Y”, Y EL EJE VERTICAL (COLOR AZUL) “Z” INDICA LA PROFUNDIDAD.

## CASO 3

ESTUDIO GEOFÍSICO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GPR) A DETALLE, PARA LOCALIZAR POSIBLES ESTRUCTURAS ANTRÓPICAS, REALIZADAS EN UNA ZONA DEL AEROPUERTO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### INTRODUCCIÓN.

El propósito de este Informe Técnico es presentar los trabajos de campo y de gabinete del Estudio realizado con la técnica de exploración geofísica conocida como Radar de Penetración Terrestre o GPR (por sus siglas en inglés, Ground Penetration Radar), comúnmente denominado “Georadar”.

La incertidumbre ocasionada por la presencia de ductos subterráneos en la Zona (Reservada) de la Terminal del Aeropuerto de la Ciudad de México, dificulta la toma de decisiones respecto al diseño y procedimiento constructivo de la instalación de piezómetros.

Esta situación obligó a realizar una investigación sistemática de las condiciones actuales de dicho sitio, mediante el uso de métodos y técnicas indirectas que permitan de manera eficiente evaluar en forma integral el estado que presenta el subsuelo somero.

**ANTECEDENTES.**

Recientemente una empresa solicitó a otra, la ejecución de un Estudio Geofísico de Radar de Penetración Terrestre (GPR), con el fin de detectar posibles estructuras antrópicas como tuberías y/o estructuras enterradas olvidadas, en el Aeropuerto de la Ciudad de México, localizada en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Para el desarrollo de este estudio se realizó una investigación que consistió en la recopilación de información y caminamientos en el sitio y sus alrededores. Este estudio estableció el marco de referencia para correlacionar los datos del levantamiento geofísico, realizado en paralelo a través de una retícula de líneas de Georadar en los espacios disponibles conformada por 6 líneas longitudinales de 7 m cada una, paralelas entre sí, las cuales fueron intersectadas por 8 líneas transversales de 6 metros cada una.

Todas estas líneas permitieron cubrir en corto tiempo la totalidad en la Zona (Reservada) del Aeropuerto de la Ciudad de México, determinando la secuencia estratigráfica en los primeros 10 metros de profundidad, así como la distribución y tamaño de posibles estructuras geológicas.

El trabajo de campo consistió en el levantamiento de registros continuos de Georadar mediante el arrastre a velocidad constante de la antena de 250 y 500 MHz sobre la superficie del terreno, siguiendo una trayectoria establecida previamente en función de los espacios disponibles. Cabe destacar que las diferentes antenas 250 y 500 MHz se utilizaron con la finalidad de alcanzar distintas profundidades de penetración; 250MHz para una mayor profundidad de exploración a pesar de una menor resolución y 500 MHz para una mayor resolución, aunque la penetración no superara los 5 metros.

Durante el desplazamiento de la antena se van colectando continuamente los registros de Georadar, denominados técnicamente radargramas, que son expuestos en pantalla en tiempo real. Ello permite ubicar en superficie la presencia de anomalías mayores o bien, si es necesario, ajustar en el equipo otras herramientas como ganancia y filtros.

Con el fin de detallar la secuencia estratigráfica y ubicar posibles estructuras en el subsuelo somero, se decidió realizar registros continuos de Georadar por las siguientes conveniencias:

- a) Es un equipo seguro que permite realizar la exploración detallada del subsuelo de la zona en poco tiempo.
- b) Facilita la interpretación debido a que proporciona imágenes del subsuelo para conocer el espesor y la distribución de las discontinuidades.
- c) Se recolectan perfiles continuos de alta resolución en forma no destructiva y en tiempo real, que permiten hacer una evaluación inmediata.

- d) Son útiles para detectar nivel freático superficial, capas de arcilla, profundidad del lecho rocoso, fracturamiento y cavidades.

Los principios básicos del radar de penetración terrestre son simples, una antena de 250 o 500 MHz (según sea el caso) transmite un pulso electromagnético de radiofrecuencia a través del subsuelo, cambiando su forma debido a los estratos y /o estructuras que atraviesa, detectándose esos cambios en una segunda antena receptora, como se ilustra en la siguiente Figura 21.

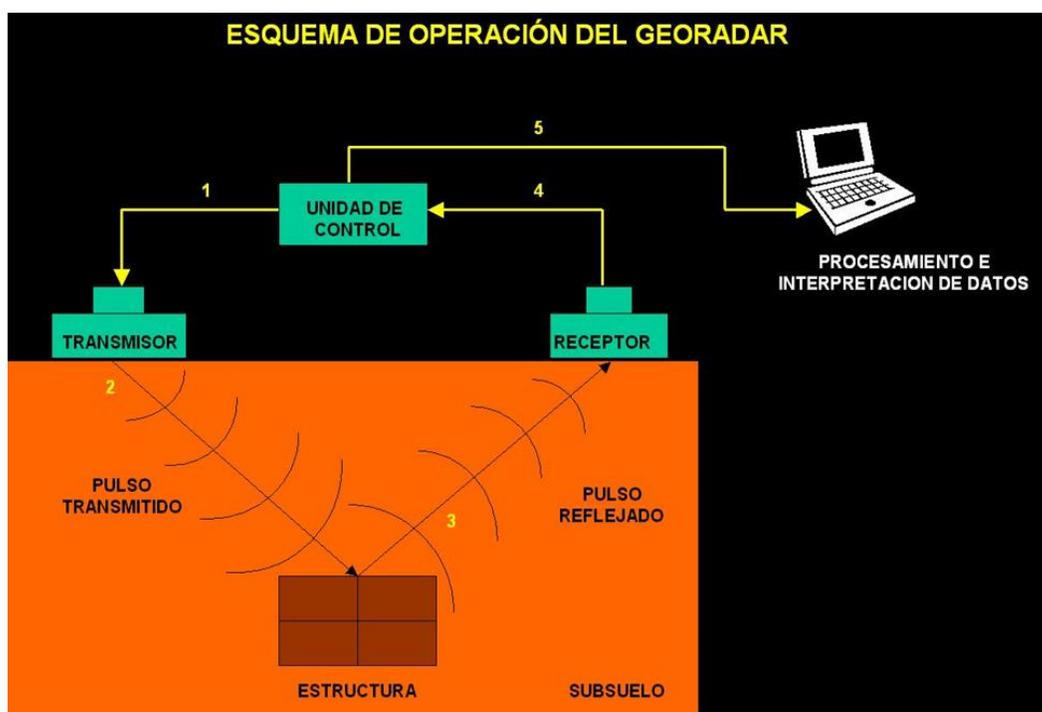


FIGURA 21 ESQUEMA DE OPERACIÓN DEL GEORADAR.

### DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Los principales objetivos del Estudio de Georadar fueron:

- Determinar la secuencia estratigráfica desde superficie y hasta una profundidad de 10 m, detallando en el espesor de los materiales de cobertura.
- Determinar la ubicación de anomalías con forma de hipérbola asociadas a la presencia de tuberías hidráulicas, oleoductos y/o gasoductos.
- Determinar la ubicación de anomalías con alta energía que rompen la secuencia electro-estratigráfica observada en los radargramas, asociadas a la presencia de tuberías energizadas (luz, telefonía o fibra óptica).

- d) Determinar posibles zonas de debilidad del subsuelo que pudieran corresponder a cavernas, discontinuidades o materiales de relleno, así como posibles estructuras geológicas o discontinuidades importantes del subsuelo.
- e) Señalar los sitios más adecuados para llevar a cabo la exploración directa para su verificación.

#### METODOLOGÍA UTILIZADA.

La Técnica de Georadar se ha desarrollado y empleado desde la década de 1950 en investigaciones superficiales de alta resolución del subsuelo o de ciertos medios en Geología, Ingeniería y Minería.

Es una técnica exploratoria no destructiva que en profundidades someras (unos cuantos metros) permite resolver algunos problemas desde el punto de vista Geofísico e Ingeniería Civil.

La técnica de Georadar o *GPR (Ground Penetration Radar)* es un sistema electromagnético para la detección y localización de elementos, formaciones y/o anomalías en el subsuelo, construcciones y otros.

El Georadar se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (entre 0.6 ns y 10 ns) en la banda de frecuencias de UHF-VHF (normalmente entre 100 MHz y 1.5 GHz) y en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio.

La propagación de estos pulsos electromagnéticos en un medio físico se establece teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas. Sus fundamentos teóricos son los mismos que los que un radar convencional emplea para detectar un objeto, pero el Georadar utiliza un ancho de banda más amplio, y las antenas receptora y emisora se dirigen hacia el medio a estudiar (subsuelo, estructura u objeto). Cada medio posee unas características electromagnéticas propias que son: la permitividad o constante dieléctrica relativa  $\epsilon$ , la permeabilidad magnética relativa  $\mu$  y la conductividad eléctrica  $\sigma$ .

El cálculo de la velocidad de propagación en un medio y la profundidad de la formación o del objeto a estudiar se determina mediante las expresiones:

$$\Delta t = \frac{2h}{v} \quad (10)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (11)$$

$\Delta t$  es el tiempo de registro

$v$  es la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío

$\epsilon'$  es la componente real de la constante dieléctrica

Las mediciones mediante Georadar se efectúan de la siguiente forma:

- Mediante la unidad central se programa un pulso electromagnético generando por medio de la antena emisora/receptora una onda electromagnética con una frecuencia característica (MHz o GHz).
- La onda electromagnética se va propagando por el medio, hasta que alcanza una zona u objeto cuyas propiedades electromagnéticas son diferentes respecto a las circundantes o adyacentes.
- Parte de la energía electromagnética de la onda sigue transmitiéndose y parte se refleja hacia la superficie, mientras el resto de energía continúa propagándose, pudiéndose generar sucesivas reflexiones.
- La onda electromagnética reflejada se recibe a través de la antena receptora y se registra en la unidad central para su posterior tratamiento e interpretación.

Cabe destacar que dependiendo del tipo de problema a resolver, es decir de la auscultación hasta la profundidad deseada (por ejemplo 25 cm, 50 cm, 1 m, 5 m, 10 m, 30 m,...), debe utilizarse una o varias antenas de emisión y recepción, teniendo en cuenta que la frecuencia de emisión de los pulsos (KHz), la duración de éstos (nanosegundos) y la amplificación de la señal a aplicar depende de cada tipo de problema a tratar y de las características de los materiales y/o terrenos a investigar.

Las secciones verticales continuas (llamadas registros radar o radargramas) del subsuelo, son semejantes a una sección sísmica. Las operaciones de campo con Georadar son sencillas y la adquisición de datos es muy rápida. Estas mediciones se realizan desplazando las antenas del Georadar instaladas en vehículos, plataformas o manualmente.

## RESULTADOS.

### Zona (Reservada). Antenas de 250 y 500 MHz.

En este sitio se implantó una retícula de líneas de Georadar espaciadas a 1 m cada una conformada por 6 líneas longitudinales de 7 m de largo con una dirección Noreste-Suroeste, paralelas entre sí, las cuales fueron intersectadas por 8 líneas transversales de 6 m de largo con una dirección Noroeste-Sureste, ver Figura 22.

En cada línea de Georadar se investigó el subsuelo hasta una profundidad de 9.5 m, habiendo detectado lo siguiente:

- Ductos de fibra óptica y/o eléctrica (alta tensión) a 1.50 m de profundidad.
- Red de Alcantarillado a 1.50 m de profundidad.



FIGURA 22 ESQUEMA DE LAS LÍNEAS DE GPR IMPLANTADAS EN LA POSICIÓN DEL AEROPUERTO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

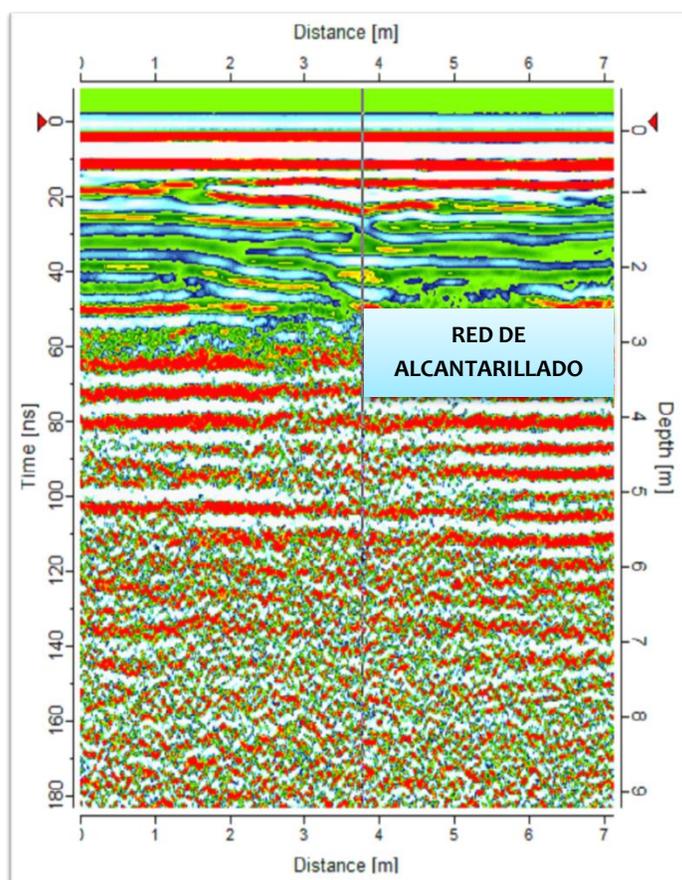


FIGURA 23 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 0 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 250 MHZ.

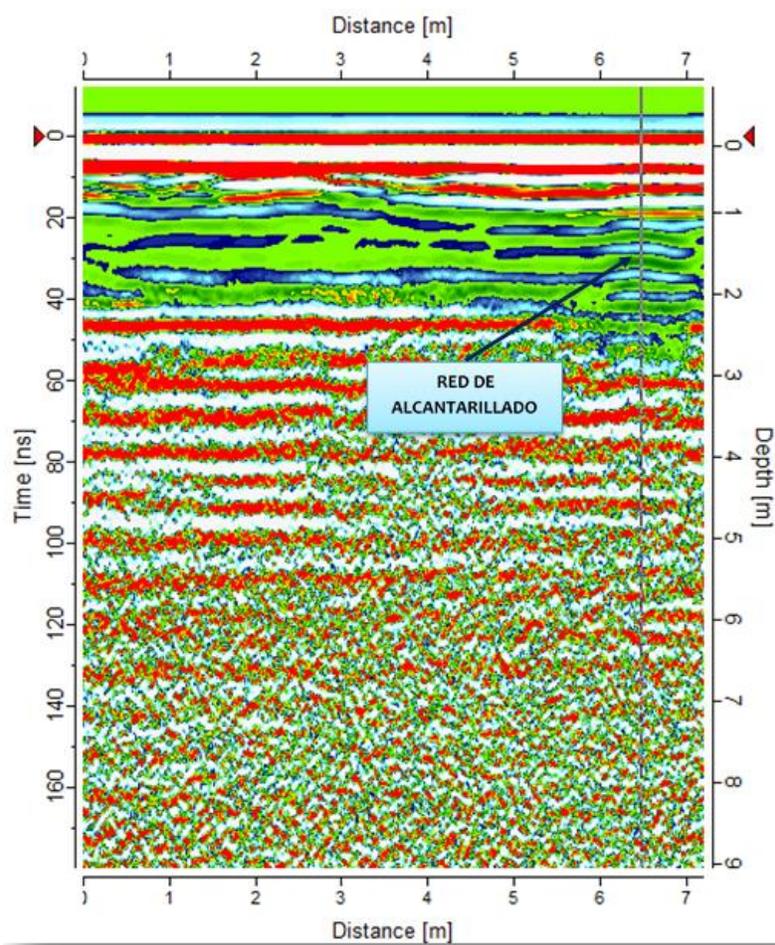


FIGURA 24 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 3 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 250 MHZ.

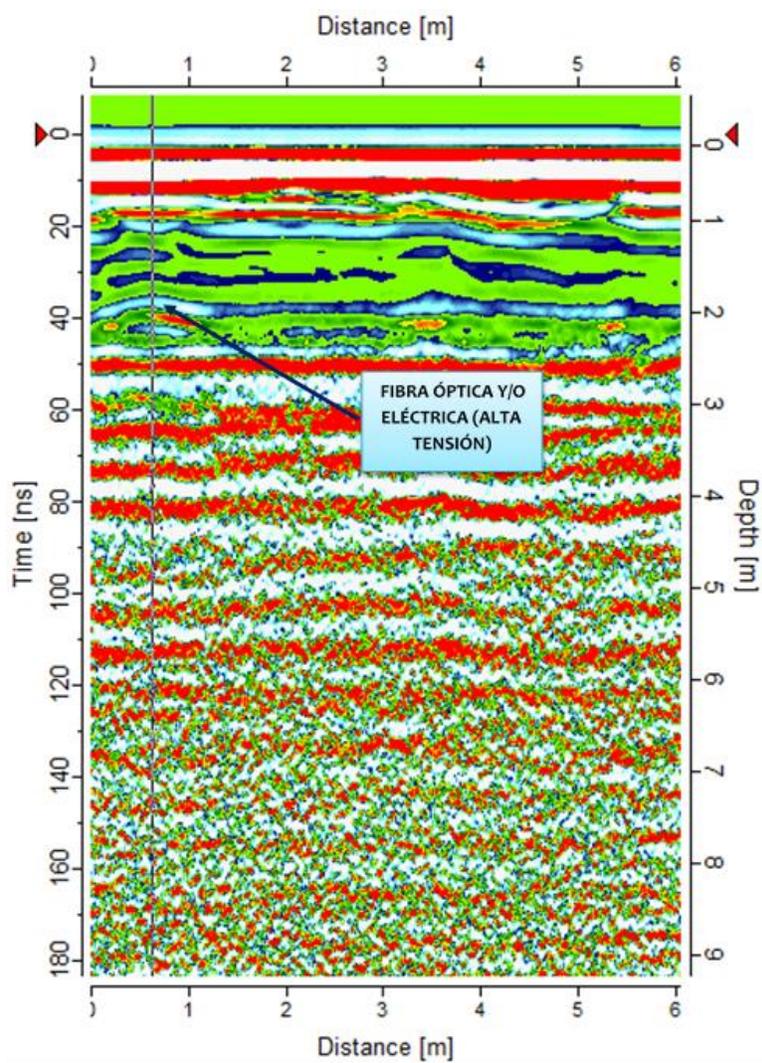


FIGURA 25 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 6 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 250 MHZ.

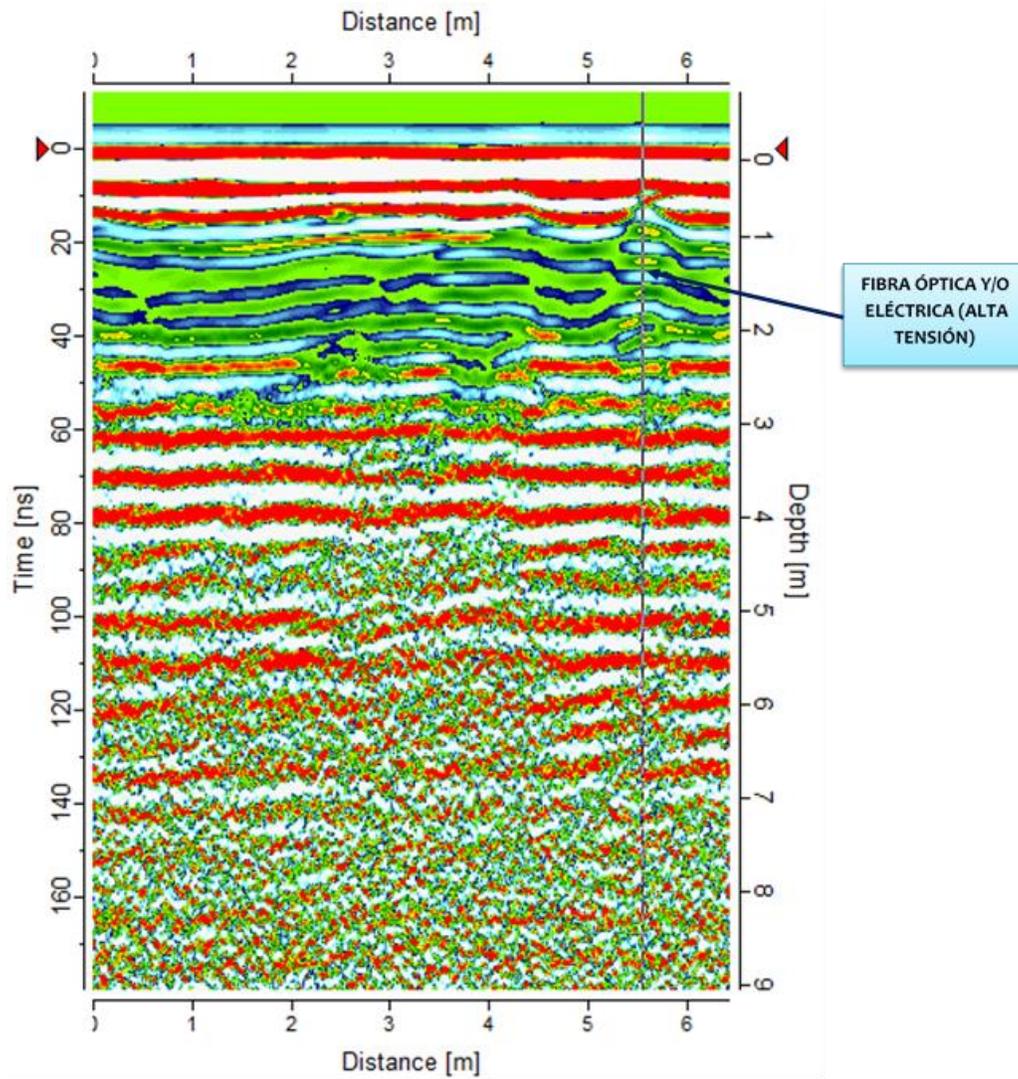


FIGURA 26 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 13 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 250 MHZ.

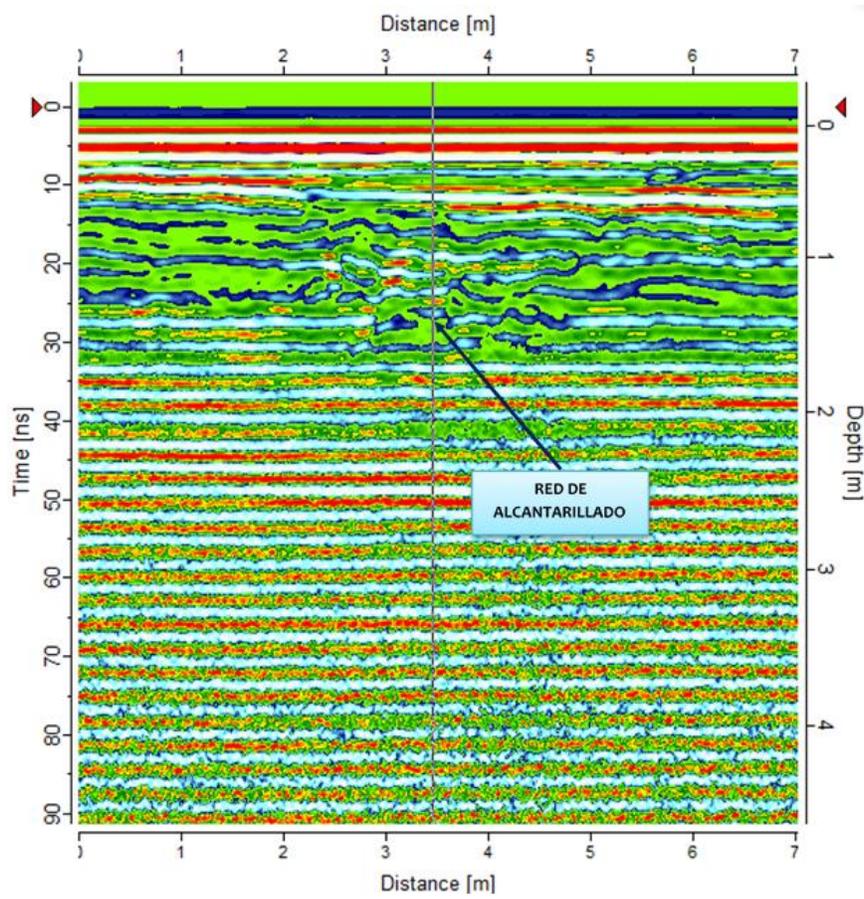


FIGURA 27 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 0 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 500 MHZ.

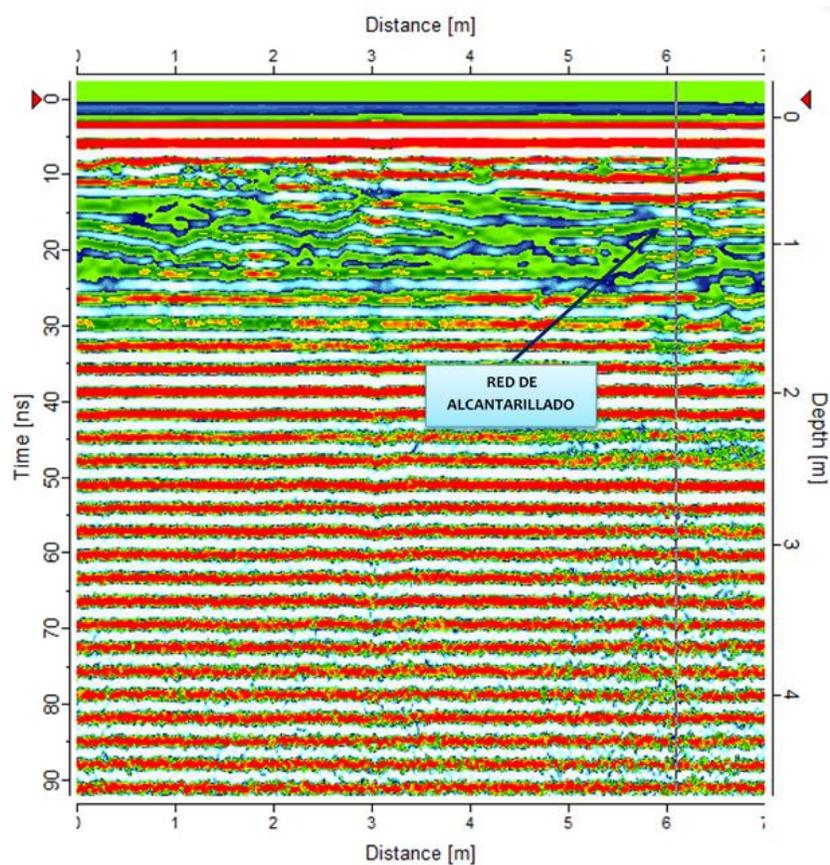


FIGURA 28 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 3 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 500 MHZ.

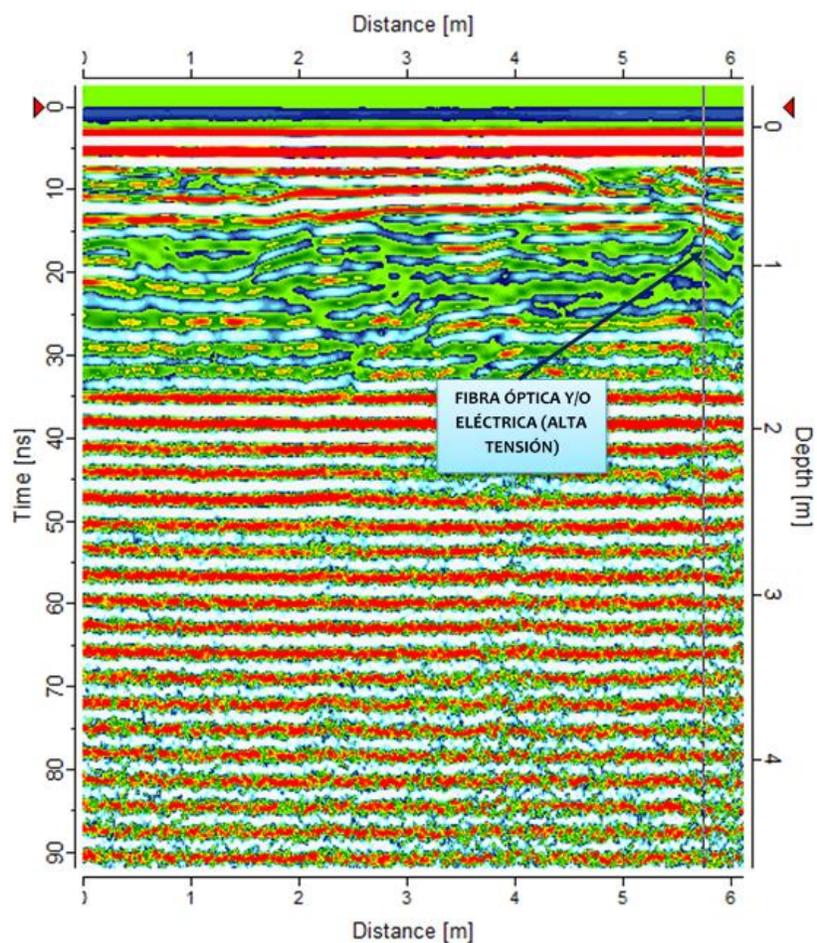


FIGURA 29 RADARGRAMA O REGISTRO DE GPR OBTENIDO CON LA LÍNEA 13 EN EL SITIO 52 CON LA ANTENA DE 500 MHZ.

Mediante el procesamiento e interpretación de los *radargramas* obtenidos en este lugar, se ubicaron los puntos donde deberán realizarse la instalación de los piezómetros, en un espacio libre de todas las tuberías detectadas y mencionadas anteriormente. Estos puntos se marcaron sobre la superficie del pavimento, con una circunferencia de color rojo, tal como se observa en la Figura 30.



**FIGURA 30 UBICACIÓN DE LOS 3 PIEZÓMETROS QUE SE INSTALARÁN EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.**

# CONCLUSIONES.

## CASO 1.

De las pruebas de integridad física realizadas en 2 Pilas de Cimentación (19C y 19D) de la Etapa 1 del Proyecto Inmobiliario en la Ciudad de México, se desprenden las siguientes conclusiones:

- El Método de Reflexión Sísmica (MRS) en esencia consiste en generar ondas de esfuerzo de muy pequeña amplitud mediante impactos de marro que se aplican sobre la porción superior del elemento estructural en estudio (en este caso, en la cara superior de cada Pila), y en registrar la propagación de estas ondas a lo largo de su fuste o cuerpo de la Pila.
- El MRS dictamina la integridad física y la continuidad de las Pilas de cimentación elegidas, así como la calidad del concreto utilizado en su construcción.
- Este método permite registrar probables anomalías o discontinuidades sismo-elásticas en el cuerpo de las Pilas, como grietas, fracturas y oquedades.
- Los fundamentos de esta técnica, procedimiento de ejecución e interpretación de resultados, cumplen la norma ASTM D5882-7 denominada “*Low Strain Integrity Pile Testing*” en la modalidad de PEM (por sus siglas en inglés, *The Pulse Echo Method*).
- En las 2 Pilas ensayadas con el Método de Reflexión Sísmica (tal como se describió en este Informe Técnico), se ha determinado que la velocidad promedio del concreto con el que fueron construidas estas Pilas varía entre 3538 y 3831 m/s, lo cual indica que las Pilas son continuas en toda su longitud y el concreto es de buena calidad.
- Si la onda se refleja desde el fondo de la Pila se denomina reflejo principal. En caso de haber una discontinuidad importante en el cuerpo de la Pila a una determinada profundidad, la onda que desciende desde el punto de tiro ya no alcanza el fondo de la Pila, sino que se refleja a dicha profundidad, originando un reflejo temprano. En caso de que existan fisuras o grietas a lo largo de la Pila, entonces la onda incidente puede alcanzar el fondo de la Pila, pero con un tiempo de retraso significativo en el reflejo principal. Este retraso conduce necesariamente a una reducción en la velocidad con la que se propagan las ondas P dentro de la Pila.

- Es importante destacar el contraste entre la velocidad de onda P ( $V_p$ ) y la densidad de masa ( $\rho_s$ ) del concreto que forma las Pilas, y la velocidad ( $V_{ps}$ ) y densidad ( $\rho_s$ ) del suelo o terreno de cimentación, lo que permitió identificar los reflejos de interés en los sismogramas de las pruebas MRS.

## CASO 2

Una vez analizada la información proporcionada por el Estudio Geofísico de Resistividad basado en la modalidad de Polo-Dipolo, enfocado a la investigación de cavidades, indica que, en el terreno del proyecto habitacional, el subsuelo presenta las siguientes características:

- En el área de estudio, se presenta la problemática de los suelos y rocas afectados por la carsticidad que genera el agua salobre sobre la roca caliza, originando un relieve irregular debido a la meteorización química de la caliza, compuesta por minerales solubles en agua.
- Con los datos obtenidos con las Líneas de Polo-Dipolo se determinaron dos unidades geoelectricas:
  - La primera unidad geoelectrica está formada por una roca caliza muy cástica con oquedades, que registró resistividades de 748 a 1625 Ohm-m y un espesor variable entre 1 y 6 m.
  - Finalmente, subyaciendo a la unidad geoelectrica anterior se tiene una roca caliza con intercalaciones de sascab que se detecta a partir de una profundidad variable que va de 1 a 6 m. El rango de resistividades registradas en este estrato varía entre 1000 y 1700 Ohm-m.
- Con los datos de isoresistividad aparente se detectaron anomalías resistivas que se asociaron a cavidades.
- A partir de los Planos de Isopacas a profundidades de 2.0, 3.0 y 6.0 m se configuraron varias **zonas de cavidades**, que registraron resistividades que varían de 1544 a más de 1700 Ohm-m.
- Para verificar las cavidades registradas en este Estudio Geofísico, se recomienda realizar Pozos exploratorios en los siguientes puntos:



3. La ubicación de estos puntos de acuerdo con las zonas libres mostradas en los radargramas se indica a continuación:

▪ ***Punto 1.***

Sobre la Línea 2 a los 4 metros y sobre la Línea 10 a 2.00 m de la rejilla mostrada en la Figura 30.

▪ ***Punto 2.***

Sobre la Línea 2 a los 5 metros y sobre la Línea 11 a 2.00 m de la rejilla mostrada en la Figura 30.

▪ ***Punto 3.***

Sobre la Línea 2 a los 6 metros y sobre la Línea 12 a 2.00 m de la rejilla mostrada en la Figura 30.

## CONCLUSIONES GENERALES

La Geofísica somera brindó información muy importante para la caracterización geotécnica de sitio, algunos de los métodos han sido utilizados desde hace muchos años por Ingenieros geotecnistas, debido a la eficacia y a la relación costo beneficio de estos, una de las principales ventajas de estos métodos es la accesibilidad del equipo geofísico en áreas que no son accesibles para otros métodos de exploración, al menos no, a un costo razonable.

Debe tenerse en cuenta que los parámetros geofísicos no necesariamente reflejan propiedades geotécnicas directamente, la relación pudiese ser no lineal, no única, y específica del sitio, además deben tenerse en cuenta las limitaciones propias de cada método, como la precisión de los instrumentos y la limitada resolución de estos, también las técnicas involucradas en la construcción del modelo geofísico llevan imprecisiones y eventualmente ambigüedades.

En la práctica, más de un modelo geofísico teórico es capaz de explicar correctamente los datos, aunque una combinación de métodos geofísicos y la correcta selección de parámetros a obtener, ayudará al o los ingenieros a seleccionar el modelo geofísico que más le convenga al cliente.

El desarrollo de las tecnologías de la información junto con la aplicación de matemáticas avanzadas ha dado impulso y desarrollo a la geoestadística. La geoestadística juega un papel importante en la interfaz entre la geofísica y la geotecnia, ya que con ella se construyen modelos geotécnicos robustos con conocimiento a priori, que combinan resultados provenientes de distintos métodos geofísicos. La importancia de la geofísica somera en la geotecnia radica en la "traducción" de los parámetros geofísicos en parámetros geotécnicos que sirvan al ingeniero a la construcción de un modelo que represente más confiablemente la geología en el sitio de interés.

## BIBLIOGRAFÍA

### CASO 1

- ASTM (2013). “*Standard Test Method for Low Strain Integrity Test Piles*”. D5882-16.
- Dobrin, M.B., (1952). “*Introduction to Geophysical Prospecting*”. McGraw Hill Book Co.
- González de Vallejo, L., (2002). “*Ingeniería Geológica*”. Prentice Hall, Madrid.
- Heiland, C.A., (1940). “*Geophysical Exploration*”. Prentice Hall.
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., (1975). “*Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*”. Limusa, México.
- Parasnis, D.S., (1970). “*Principios de Geofísica Aplicada*”. Paraninfo, Madrid.
- Rausche, F. et. al. (1992). “*Pile Integrity and Analysis. Procedures of the Fourth International Conference on the Application of Stress Wave Measurements to Piles*”. The Hague, Netherlands.
- Webster, K., Rausche, F. & Webster, S. (2011). “*Pile and Shaft Integrity Test Results, Classification, Acceptance and/or Rejection (TRB) 90<sup>th</sup> Annual Meeting*”. Washington D.C.

### CASO 2

- Dobrin, M.B., 1952. “*Introduction to Geophysical Prospecting*”. McGraw Hill Book Co.
- González de Vallejo, L., 2002. “*Ingeniería Geológica*”. Prentice Hall, Madrid.
- Heiland, C.A., 1940. “*Geophysical Exploration*”. Prentice Hall.
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., 1975. “*Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*”. Limusa, México.
- NORMA ASTM.D 6431-99.
- Parasnis, D.S., 1970. “*Principios de Geofísica Aplicada*”. Paraninfo, Madrid.

### CASO 3

- Annan, A. P., 1992. “*Ground penetrating radar workshop notes*”. Ontario, Canada. Sensors & Software Inc.
- Davis, J. L., Annan, A. P., 1989. “*Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*”. Geophysical Prospecting, v.37, No. 5, p. 531-551.

- Grasmueck, M., 1996. “*3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss*”. *Geophysics*, vol. 61, No. 4, p. 1050-1064.
- Yilmaz, O., 2001. “*Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*”. Volumen 1. Society of Exploration Geophysicists, USA.
- Young, R.A., Slatt, R. M., Staggs, J. G., 2003. “*Application of ground penetrating radar imaging to deepwater (turbidite) outcrops*”. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 20, p. 809-821.