



Estudio geofísico para la identificación de cavidades en el área de Cocimientos de la Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma Heineken Navojoa

Navojoa, Sonora, México

Informe preparado para:

Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma Heineken



Informe
EMS-CCMH-21-10
Junio de 2021

Elaboró

Ing. Roberto A. Ortega Guerrero
Ing. Ricardo Barajas Domínguez

Revisó

M. en I. José Ramón Cruz Águila

Aprobó

M. en I. José María Reyes Mariano



CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABLAS.....	iii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos y alcances	2
1.3 Información proporcionada	2
1.4 Descripción general del proyecto.....	3
1.4.1 Descripción general de la problemática	5
1.4.2 Descripción geotécnica de la formación de cavidades y su detección a través de métodos geofísicos	6
2 TRABAJOS DE CAMPO	7
2.1 Levantamiento de rasgos superficiales.....	7
2.2 Trabajos de exploración geofísica	9
2.3 Metodologías de prospección Geofísica.....	14
2.3.1 Imágenes de Resistividad	14
2.3.2 Radar de Penetración Terrestre	16
3 RESULTADO DE TRABAJOS GEOFÍSICOS DE CAMPO.....	19
3.1 Imágenes de Resistividad.....	19
3.2 Radar de Penetración Terrestre	20
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
4.1 Criterios de interpretación.....	31
4.2 Identificación de Cavidades	36
4.3 Zonas con presencia de agua a altas temperaturas	37
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
REFERENCIAS.....	43
Anexo A Levantamiento de rasgos superficiales	
Anexo B Imágenes de Radagramas	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación planta CCMH Navojoa, Sonora (INEGI, 2015).....	1
Figura 1.2. Localización del área de cocimientos dentro de la Cervecería Cuauhtémoc-Moctezuma-Heineken Navojoa.....	4
Figura 1.3. Vista en planta de la distribución de tanques del área de cocimiento	4
Figura 1.4 Huella de socavón al norte de tanque extractor No.2.....	5
Figura 1.5 Condiciones del relleno de alcantarilla de entrada a zona de cocimiento	6
Figura 1.6. Arrastre de granos por efecto de tubificación	7
Figura 2.1. Agrietamientos en los pedestales de las zapatas de cimentación de estructuras dentro del área de cocimiento	8
Figura 2.2. Agrietamientos en la estructura del tanque Macerador 1, asimismo se aprecian agrietamientos en la cimentación del equipo del mismo tanque.....	9
Figura 2.3. Propuesta de exploración geofísica inicial.....	10
Figura 2.4. Ubicación de fracturas encontradas en la inspección del sitio	11
Figura 2.5. Ubicación de la Exploración Geofísica realizada.....	12
Figura 2.6. Arreglo Axil o Dipolo - dipolo, empleado en el levantamiento de Imágenes de Resistividad	14
Figura 2.7. Ejecución de la técnica de Imágenes de Resistividad Eléctrica	16
Figura 2.8. Esquema de adquisición de datos de georadar con arreglo de reflexión en modo continuo	17
Figura 2.9. Ejecución de la técnica de Radar de Penetración Terrestre (RPT)	18
Figura 3.1. Sección Geoeléctrica Línea LG1	21
Figura 3.2. Sección Geoeléctrica Línea LG3	22
Figura 3.3. Sección Geoeléctrica Línea LG7	23
Figura 3.4. Sección Geoeléctrica Línea LG8	24
Figura 3.5. Sección Geoeléctrica Línea LG9	25
Figura 3.6. Sección Geoeléctrica Línea LG10	26
Figura 3.7. Sección Geoeléctrica Línea LG12	27
Figura 3.8. Sección Geoeléctrica Línea LGF1	28
Figura 3.9. Sección Geoeléctrica Línea LGF2	29
Figura 3.10. Sección Geoeléctrica Línea LGF3.....	30
Figura 4.1. Elementos estructurales con valores de resistividad mayores a 50 ohm-m	31
Figura 4.2. Elementos estructurales con valores de resistividad mayores a 50 ohm-m	32
Figura 4.3. Cavidad con valores de resistividad mayores a 50 ohm-m	32

Figura 4.4. Correlación entre Secciones de Imágenes de Resistividad Eléctrica, la infraestructura y zonas con presencia de arcillas con agua caliente	33
Figura 4.5. Correlación entre Secciones de Imágenes de Resistividad Eléctrica, la infraestructura y zonas con presencia de arcillas con agua caliente	34
Figura 4.6. Zonas con presencia de arcillas con agua caliente, fracturas y cavidades, encontradas mediante la exploración	35
Figura 4.7. Ubicación de líneas de exploración geofísica con valores sugerentes de cavidades.	36
Figura 4.8. Distribución de las zonas arcillosas con presencia de agua caliente (Color Azul claro)	38
Figura 4.9. Ubicación de la Exploración Geofísica realizada, cimentaciones, zonas con presencia de arcillas con agua caliente, fracturas y cavidades encontradas	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Levantamiento de rasgos superficiales en área de cocimiento de la planta CCMH Navojoa	8
Tabla 2.2. Exploración geofísica ejecutada en el área de cocimiento de la CCMH Navojoa.	13
Tabla 4.1. Cavidades inferidas con exploración geofísica.....	37
Tabla 4.2. Detección de agua caliente con exploración geofísica	37

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma Heineken (CCMH), a través del ingeniero Luis Fernando Camacho Laureán, Jefe del departamento de Planeación de Mantenimiento, solicitó a Dicimsa realizar un estudio geofísico encaminado a identificar o a descartar la presencia de cavidades superficiales generadas por el fenómeno de tubificación, mismo que podría estar siendo desencadenado por el flujo de las aguas residuales en el área de cocimiento de la planta CCMH Navojoa, misma que se ubica en el Municipio de Navojoa, en el Estado de Sonora, tal y como se indica en la Figura 1.1.

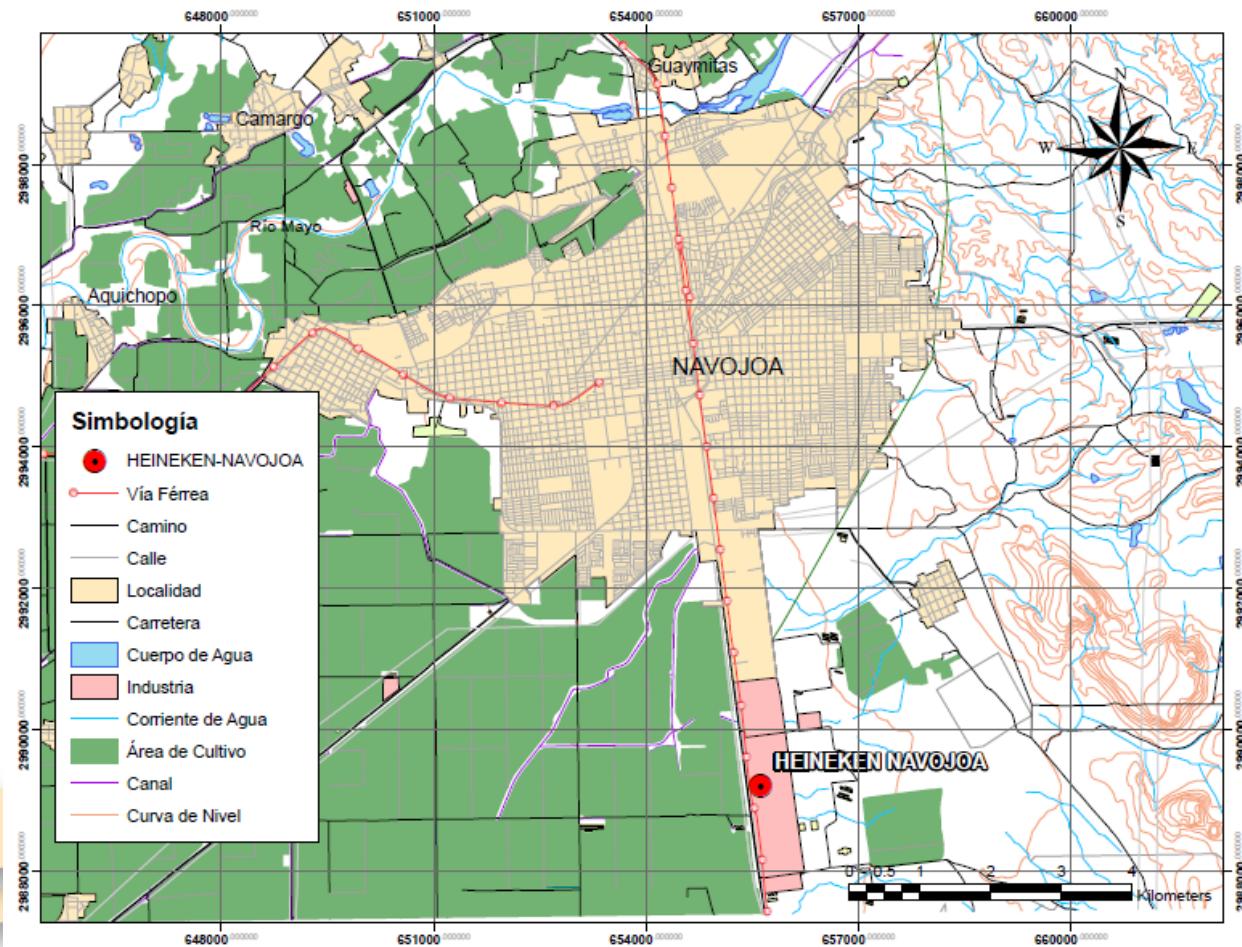


Figura 1.1. Ubicación planta CCMH Navojoa, Sonora (INEGI, 2015)

1.2 Objetivos y alcances

El objetivo del presente estudio es identificar o descartar la presencia de cavidades superficiales generadas por el fenómeno de tubificación en el área de cocimiento en la planta de CCMH en Navojoa, Estado de Sonora. Para alcanzar dicho objetivo, se plantearon los alcances siguientes:

- Levantamiento de rasgos superficiales.
- Ejecución de 11 sondeos de imagen de resistividad
- Ejecución de 29 sondeos de radar de penetración terrestre.

1.3 Información proporcionada

Para la realización del presente informe, CCMH Navojoa proporcionó, en formato digital, los documentos siguientes:

- Plano No. A-005 PLANTA BAJA, BAÑOS, VESTIDORES Y COMEDOR, NIVEL 11.10, COCIMIENTOS. REV.1.
- Plano No. A-006 PLANTA, CONTROL DE CALIDAD Y OFICINAS, NIVEL +16.60, COCIMIENTOS REV.1.
- Plano No. A-007 FACHADAS, COCIMIENTOS REV.1.
- Plano No. A-008 CORTES POR FACHADA Y DETALLES, COCIMIENTOS REV.1.
- Plano No. A-048 INSTALACIONES HIDROSANITARIAS, PLANTA BAJA Y PLANTA ALTA, COCIMIENTOS REV.1.
- Plano No. A-049 INSTALACIONES HIDROSANITARIAS, ISOMETRICOS DE OFICINAS Y CONTROL DE CALIDAD, COCIMIENTOS REV.1.
- Plano No. C-018 PLANTA DE CIMENTACIÓN, COCIMIENTOS REV.4.
- Plano No. C-019 CIMENTACIÓN, BASES, CORTES Y DETALLES, COCTOS, REV.0.
- Plano No. C-021 DRENAJE INDUSTRIAL, PLANTA, CORTES Y DETALLES, COCIMIENTOS, REV.1.
- Plano No. C-022 PLANTA, LOSA DE PISO, COCIMIENTOS, REV.1.
- Plano No. C-023 BASES DE EQUIPO, LOSA DE PISO, CORTES Y DETALLES, COCIMIENTOS, REV.1.
- Plano No. C-032 CIMENTACIÓN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE PROCESO, COCIMIENTOS, REV.2.

- Plano No. C-072 BASES DE EQUIPO Y BOMBAS, CORTES Y DETALLES, COCIMIENTOS, REV.0.
- Plano No. C-085 LOSAS NTC +16.27, +16.57, +20.05, ESTRUCTURA DE CONCRETO, COCIMIENTOS, REV.2.
- Plano No. C-086 ESCALERAS, CORTES Y DETALLES, ESTRUCTURA DE CONCRETO, COCIMIENTOS, REV.1.
- Plano No. C-111 ESTRUCTURA DE ACERO PLANTAS, NTA +15.245, +21.094 Y +23+600, COCIMIENTOS, REV.3.
- Plano No. C-113 ESTRUCTURA DE ACERO, FACHADAS, COCIMIENTOS, REV.1
- Plano No. C-125 ESTRUCTURA DE ACERO, PLATAFORMAS PARA EQUIPOS T-310, T-311, T-312, COCIMIENTOS, REV.0.
- PLANTAS: N.S.P +13.05, +16.25, +18.800, ESTRUCTURA DE ACERO, COCIMIENTOS.
- COCIMIENTOS, RACK DE TUBERIAS, ESTRUCTURAS DE ACERO, AREAS EXTERIORES, (SOLO DE REFERENCIA).

1.4 Descripción general del proyecto

El área de cocimiento se encuentra ubicada al norte del complejo de la Cervecería, ésta cuenta con un área aproximada de 1,656 m² y dentro de ella se encuentran los siguientes tanques:

- 2 Tanques tipo Holding.
- 2 Tanques tipo olla.
- 2 Tanques tipo extractor.
- 2 Tanques macerador.
- 2 Tanques tipo cocedor.
- 3 Tanques tipo clip.
- 2 Tanques Tq Trub.
- 1 Tanque de mosto antiguo.
- 1 Tanque de levadura inactivada.

En la Figura 1.3 se presenta la distribución en planta de los tanques que se encuentran dentro del área de cocimiento.



Figura 1.2. Localización del área de cocimientos dentro de la Cervecería Cuauhtémoc-Moctezuma-Heineken Navojoa

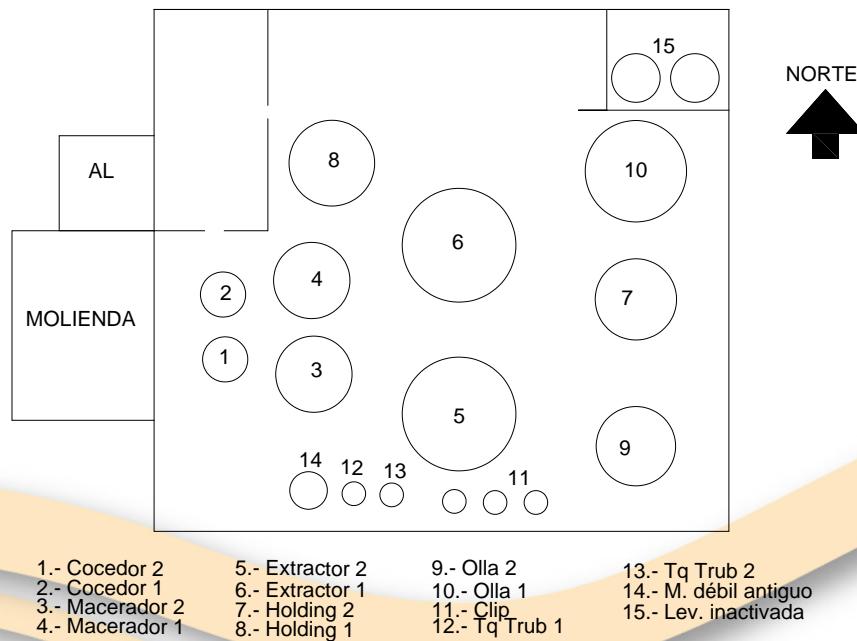


Figura 1.3. Vista en planta de la distribución de tanques del área de cocimiento

1.4.1 Descripción general de la problemática

Actualmente, diferentes zonas del piso y algunos de los pedestales de cimentación de las estructuras del área de Cocimientos de la CCMH en Navojoa presentan diferentes niveles de agrietamientos, los cuales han sugerido la presencia de cavidades principalmente en el área contigua a la red de drenaje. Esta red de drenaje está constituida por ductos de barro vitrificado de aproximadamente 22 cm de diámetro interior, mediante los cuales se desalojan aguas residuales que se encuentran a altas temperaturas, debido a la génesis de la elaboración del producto. Como parte de la historia de la problemática en cuestión, personal del área de cocimiento comentó a personal de Dicimsa que aproximadamente hace 15 años se detectó la presencia de un socavón al norte de tanque extractor No.2, el socavón tuvo una longitud 1.20 m y un ancho de 0.90 cm, la huella de su reparación quedó evidenciada en los pisos de la Cervecería tal y como se muestra en la Figura 1.4. En un evento más reciente se realizó la inspección de algunos puntos del sistema de la red de drenaje del área de cocimiento donde se observó lavamiento del material fino del colchón de relleno de la zanja de la tubería, a través del cual se observó que el material de relleno de la zanja de la tubería está constituido por gravas redondeadas y arena que presentan evidencia de cierto grado de socavación, tal y como se muestra en la Figura 1.5.



Figura 1.4 Huella de socavón al norte de tanque extractor No.2



Figura 1.5 Condiciones del relleno de alcantarilla de entrada a zona de cocimiento

1.4.2 Descripción geotécnica de la formación de cavidades y su detección a través de métodos geofísicos

Como se pudo observar durante el levantamiento de rasgos superficiales, en la zona de cocimiento existen zonas donde el sistema de alcantarillado de la zona ha cedido al flujo de agua, lo cual ha conllevado a la formación de cavidades similares a las que se observan en la Figura 1.5. En términos generales, dichas cavidades se forman por el arrastre de finos que se produce cuando la carga hidráulica se disipa venciendo las fuerzas viscosas inducidas y que se oponen al flujo en los canalículos formados entre las partículas; asimismo, el agua que fluye genera fuerzas erosivas que tienden a empujar a las partículas, arrastrándolas en la dirección del flujo. En el momento en que el arrastre se produce, ha comenzado la tubificación del suelo que se manifiesta a través de la formación de cavidades. En la Figura 1.6 se presenta de manera esquemática el mecanismo simplificado de generación de cavidades por tubificación.

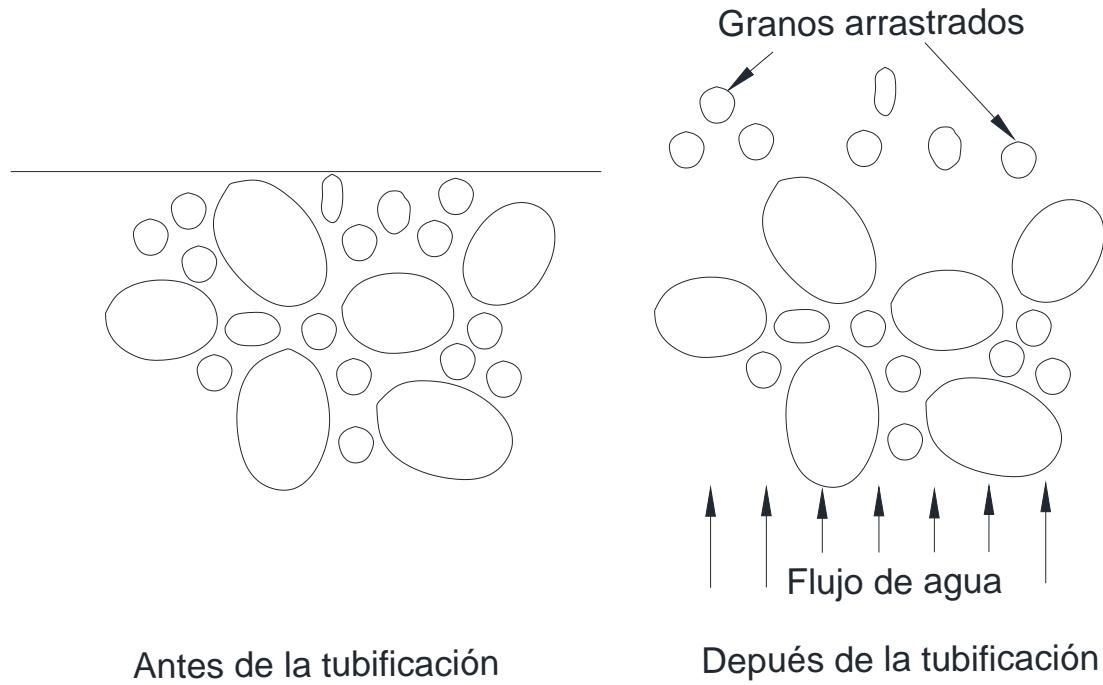


Figura 1.6. Arrastre de granos por efecto de tubificación

2 TRABAJOS DE CAMPO

2.1 Levantamiento de rasgos superficiales

Los trabajos de levantamiento de rasgos superficiales en el área de cocimiento consistieron en realizar un recorrido en toda el área para identificar la presencia y las evidencias de daños en las estructuras. Durante el recorrido se identificó la presencia de grietas en diferentes zonas del área, en las Figuras 2.1 y 2.2 se muestran algunas de las anomalías identificadas y en la Tabla 2.1 se indican los principales rasgos superficiales detectados. Uno de los rasgos que más destaca es la presencia de una grieta del orden de 22 m de longitud que atraviesa los ejes C-D-E-F-2-3-4 y 5.

Finalmente, en el Anexo A se presenta el reporte fotográfico del levantamiento de rasgos superficiales realizado.

Tabla 2.1. Levantamiento de rasgos superficiales en área de cocimiento de la planta CCMH Navojoa

Eje o Zona	Estructura Contigua	Rasgo superficial
		Agrietamientos o anomalía
F2	Zapata eje F2	Caída de herramienta durante perforación para IR LG8
F3	Zapata eje F3	Grieta en zapata
F4	Zapata eje F4	Grieta en zapata
F6	Zapata eje F6	Grieta en zapata
F-E-6	Tanque TQ 211, TQ212, TQ213	Grieta en guarnición
D-E-F-6	Tanque TQ 211	Grieta en zapatas
D-E-F-6	Tanque TQ 212	Grieta en zapatas
D-E-F-6	Tanque TQ 213	Grieta en zapatas
E-F-4	Norte de Tanque Extractor No.2	Grieta en piso área de socavón
D4	Noroeste de Tanque Extractor No.2	Grieta en zapata de cimentación de maquinaria
C-D-E-F-2-3-4-5	Macerador 1, Tanque Extractor No.2	Grietas con una continuidad de aproximadamente 22 m de longitud
CD-3-4	Macerador 1	Grietas en la estructura del tanque, grietas en cimentación de equipo
G-6-7	Tuberías externas	Grietas en zapatas



Figura 2.1. Agrietamientos en los pedestales de las zapatas de cimentación de estructuras dentro del área de cocimiento



Figura 2.2. Agrietamientos en la estructura del tanque Macerador 1, asimismo se aprecian agrietamientos en la cimentación del equipo del mismo tanque

2.2 Trabajos de exploración geofísica

Como parte de los trabajos de exploración geofísica, inicialmente se tenía programado realizar 12 líneas de entre 13 y 55 m de longitud, para un total de 298 m lineales de Imágenes de Resistividad Eléctrica y 431 m de Radar de penetración Terrestre. El plan de exploración geofísica inicial se indica en la Figura 2.3. No obstante, al realizar el recorrido por el área en estudio se identificó la distribución de las instalaciones dentro de las zonas de Cocimiento, Fermentación y Bodega; con base en la cual se realizó una redistribución de las líneas programadas inicialmente. En el arreglo final de los trabajos de prospección geofísica también se tomó en cuenta que durante el recorrido de reconocimiento se encontraron una serie de fracturas sobre el piso dentro de las instalaciones de Cocimiento, mismas que se presentan en la Figura 2.4. Por tanto, el programa de exploración geofísica que se llevó a cabo es el que se presenta en la Figura 2.5 y los trabajos de prospección geofísica finales quedaron distribuidos de la manera siguiente:

- Se realizaron 11 líneas con el método de Imágenes de Resistividad, con longitudes de 11 a 43 m, para un total de 280 m lineales.
- Se llevaron a cabo 29 líneas con la técnica de Radar de Penetración Terrestre, con longitudes de 3.2 a 43 m, para un total de 432 m lineales.

En la Figura 2.5, se presenta enlista la exploración geofísica que se ejecutó en el área en estudio.

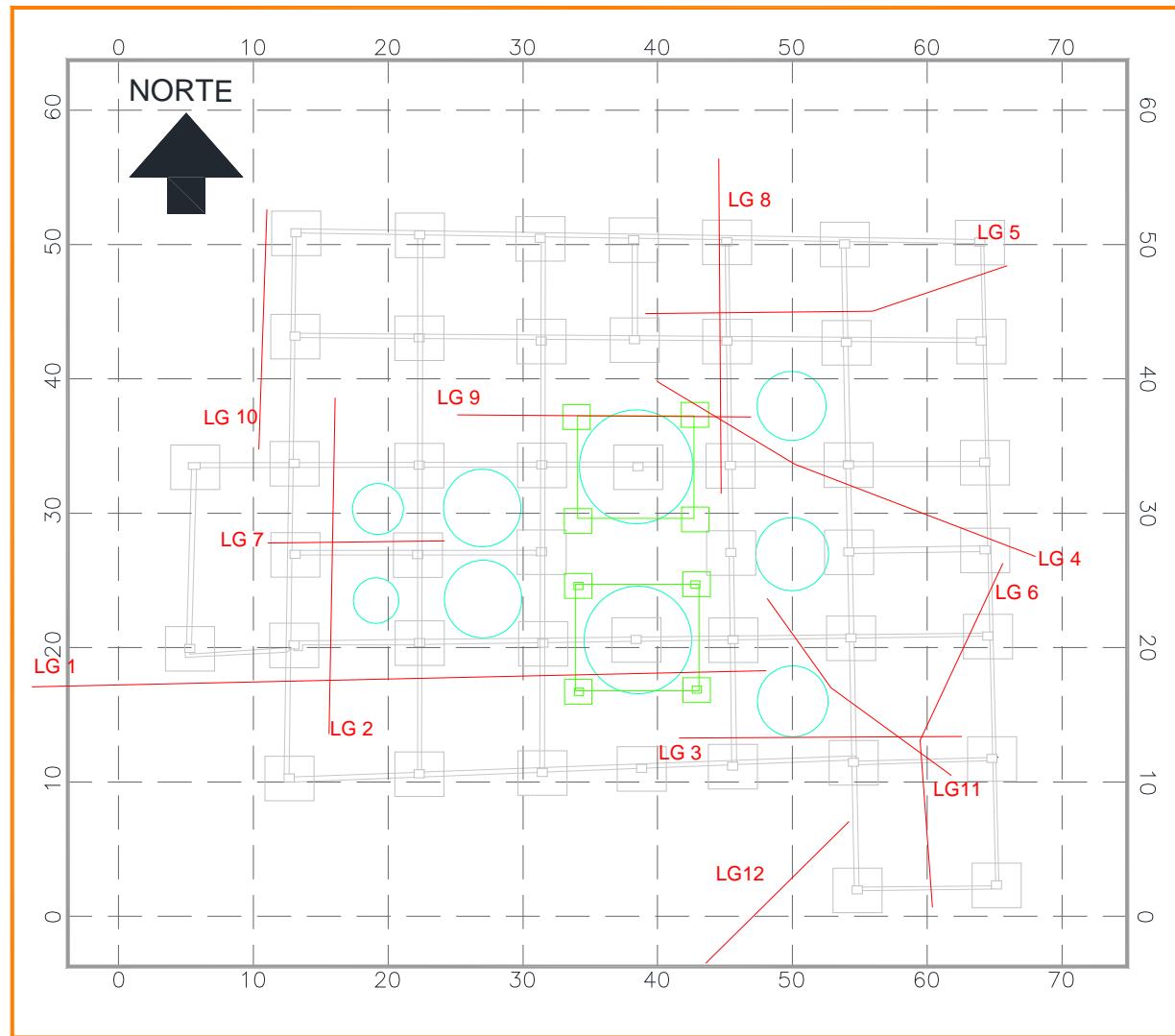


Figura 2.3. Propuesta de exploración geofísica inicial

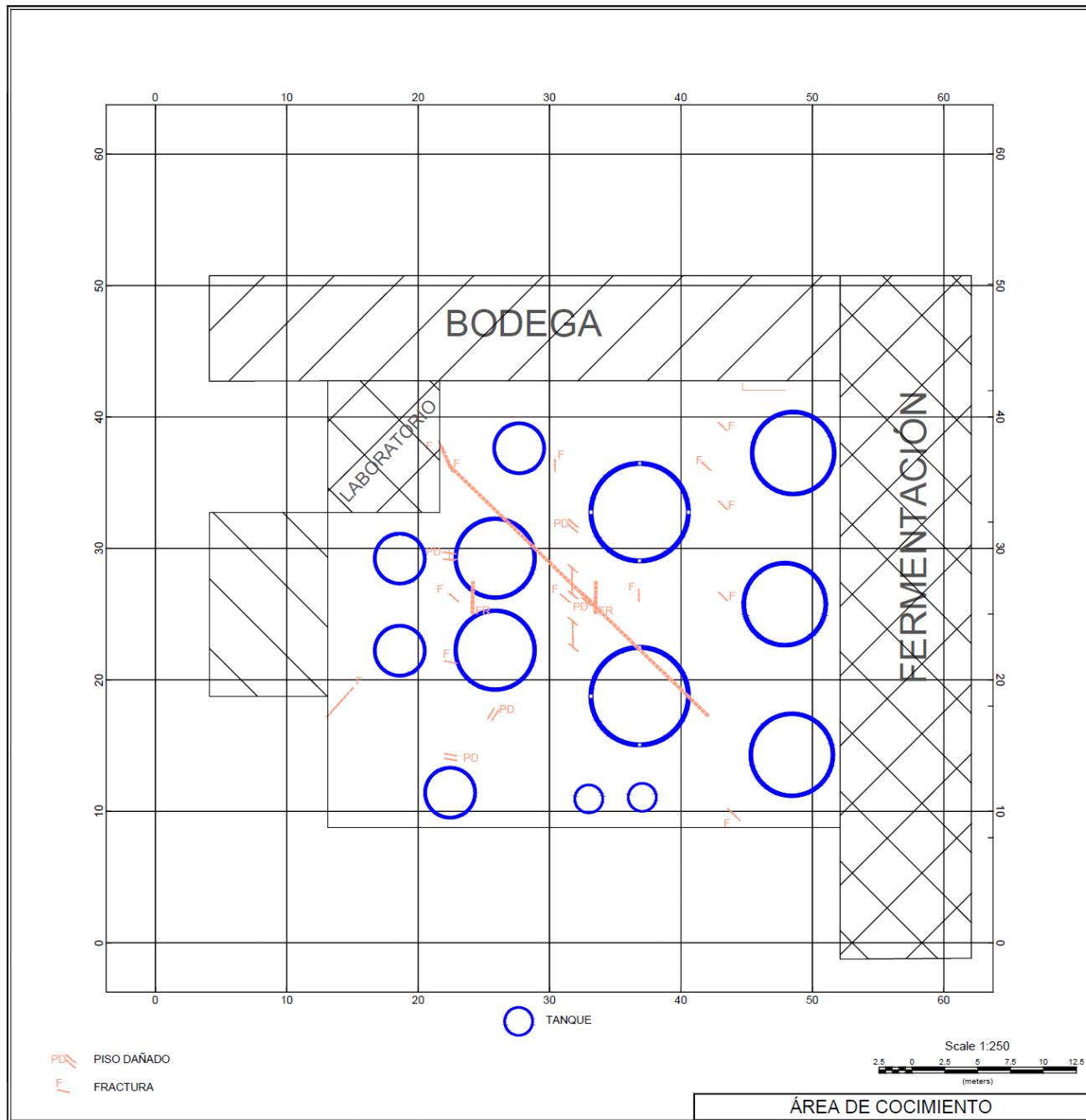


Figura 2.4. Ubicación de fracturas encontradas en la inspección del sitio

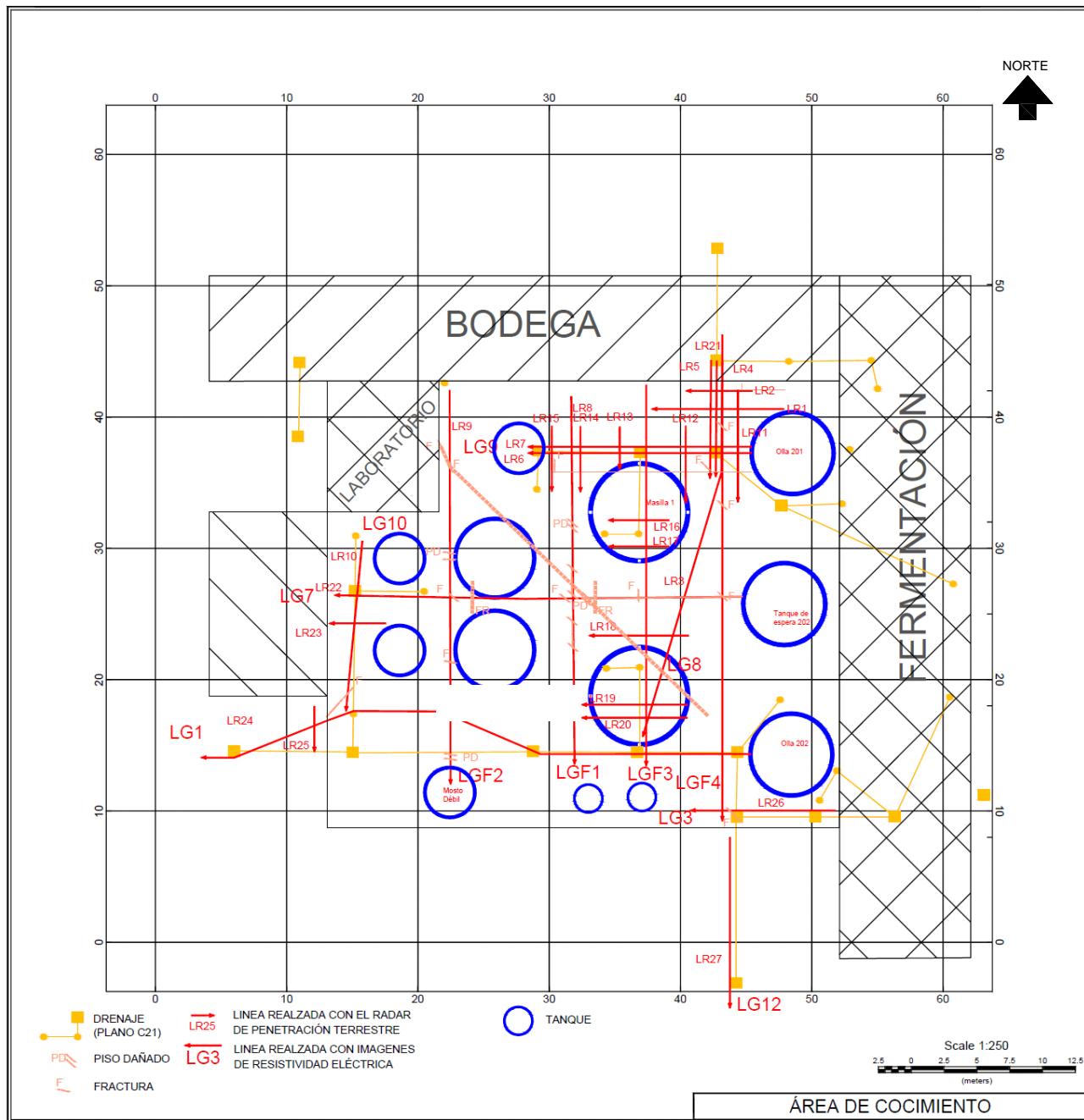


Figura 2.5. Ubicación de la Exploración Geofísica realizada

Tabla 2.2. Exploración geofísica ejecutada en el área de cocimiento de la CCMH Navojoa

Línea de geofísica	Longitud propuesta [m]	Longitud final [m]	Metodología	Línea de geofísica	Longitud final [m]	Metodología
LG1, LR24	55	43	IRE y RPT (GPR)	LR1	10	RPT (GPR)
LG2	25		IRE y RPT (GPR)	LR2	5	RPT (GPR)
LG3, LR26	21	11	IRE y RPT (GPR)	LR4	11	RPT (GPR)
LG4	31		IRE y RPT (GPR)	LR5	7.4	RPT (GPR)
LG5	27		IRE y RPT (GPR)	LR7	7.4	RPT (GPR)
LG6	27		IRE y RPT (GPR)	LR11	8.72	RPT (GPR)
LG7, LR22	13	29	IRE y RPT (GPR)	LR12	5.83	RPT (GPR)
LG8, LR3	25	29	IRE y RPT (GPR)	LR13	3.2	RPT (GPR)
LG9, LR6	22	17	IRE y RPT (GPR)	LR14	5	RPT (GPR)
LG10, LR10	18	14	IRE y RPT (GPR)	LR15	4.5	RPT (GPR)
LG11	19		IRE y RPT (GPR)	LR16	4.6	RPT (GPR)
LG12, LR27	15	13	IRE y RPT (GPR)	LR17	4.6	RPT (GPR)
LGF1, LR8		28	IRE y RPT (GPR)	LR18	7.55	RPT (GPR)
LGF2, LR9		30	IRE y RPT (GPR)	LR19	8	RPT (GPR)
LGF3		29	IRE y RPT (GPR)	LR20	8	RPT (GPR)
LGF4, LR21		37	IRE y RPT (GPR)	LR23	4.27	RPT (GPR)
PARCIAL	298	280		LR25	3.45	RPT (GPR)
LR	5		RPT (GPR)	LR28	3.5	RPT (GPR)
LR	15		RPT (GPR)	LR29	5.3	RPT (GPR)
LR	8		RPT (GPR)	LR1 (500 MHz)	10	RPT (GPR)
LR	5		RPT (GPR)	LR11 (500 MHz)	8.72	RPT (GPR)
LR TRANSVERSALES	100		RPT (GPR)	LR19 (500 MHz)	8	RPT (GPR)
PARCIAL	133			LR20 (500 MHz)	8	RPT (GPR)
				PARCIAL	152.04	

2.3 Metodologías de prospección Geofísica

2.3.1 Imágenes de Resistividad

Las mediciones se efectuaron con la técnica de resistividad en corriente continua, esto con el objetivo de investigar la distribución de los valores de resistividad, tanto en el sentido vertical, como en sentido horizontal. Para este trabajo se utilizó el dominio del tiempo con el arreglo electródico denominado Axil (Dipolo – dipolo), modalidad de calicatas de alta densidad de medidas, con separaciones de 1 m y las posibles combinaciones (2 m, 3 m, 4 m, 6 m, etc.), entre electrodos y 5 dipolos de potencial por cada dipolo de corriente ($N=1$ a 5). El paso o avance de las lecturas fue de 1 m. En la Figura 2.6 se muestra el arreglo dipolo-dipolo, el cual consiste en desplazar los cuatro electrodos a la vez, manteniendo sus separaciones interelectródicas, a lo largo del recorrido.

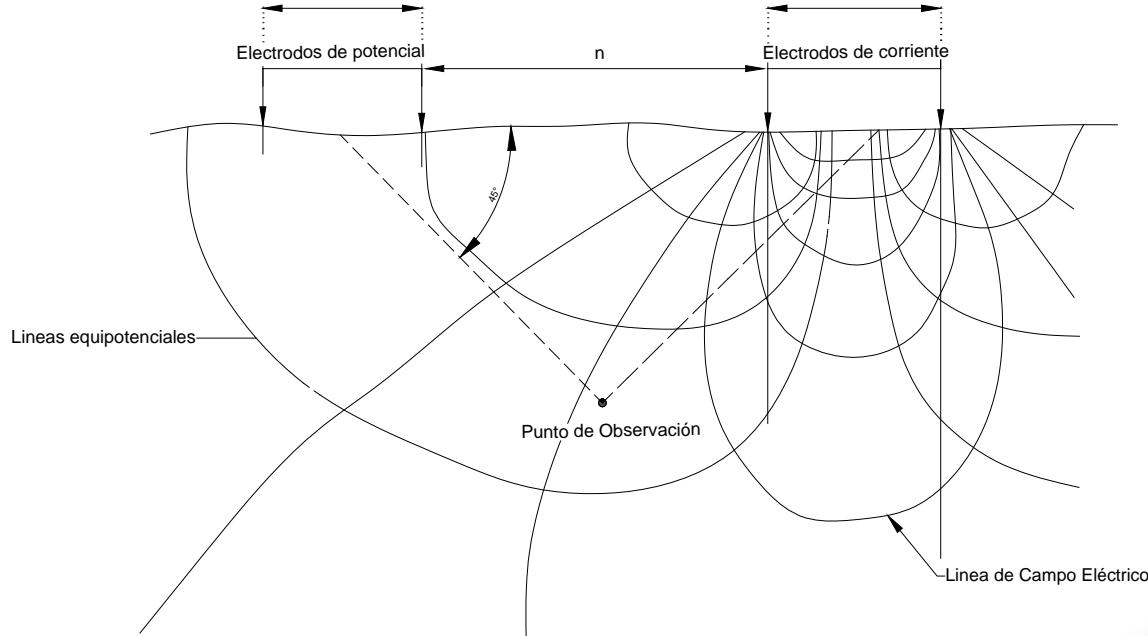


Figura 2.6. Arreglo Axil o Dipolo - dipolo, empleado en el levantamiento de Imágenes de Resistividad

El método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la

distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada.

La finalidad de las Imágenes de Resistividad (IR), conocidas también como calicatas eléctricas (CE) o Tomografía Eléctrica (TE) o Tendidos de Resistividad Eléctrica (TRE), es obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijada una o múltiples profundidades de investigación. Esto hace que el método sea adecuado para la detección de contactos verticales, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad. La zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos.

El método de medición de la Resistividad Eléctrica del subsuelo se realizó de acuerdo a la norma de la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (American Society for Testing Materials (ASTM) ASTM D6431 – 99 (2010) (Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation). Guía para el Uso Normal de Métodos de Resistividad en Corriente Continua para Investigaciones del Subsuelo.

Prácticamente el método de Imágenes de Resistividad consiste en trasladar los cuatro electrodos del dispositivo a lo largo de un recorrido, manteniendo su separación constante, obteniéndose un perfil de resistividades aparentes a lo largo de la línea explorada. La Figura 2.7 presenta imágenes tomadas durante los trabajos de campo dentro de la CCMH Navojoa.

La resistividad eléctrica es una propiedad física de los materiales, en el caso particular del subsuelo, la resistividad depende de las características físicas y químicas a las que se encuentran sometidas las rocas y materiales, tales como: la composición mineralógica, grado de saturación, fracturamiento, la compacidad, entre otras.

Para el levantamiento se colocaron todos los electrodos necesarios de manera equidistantes a lo largo de la línea de estudio y se procedió a la medición del potencial y corriente. Con estos datos y considerando un factor que depende del arreglo electrónico se procedió a efectuar los cálculos necesarios para obtener los valores de resistividad aparente.

El equipo utilizado en la obtención de los datos de campo fue el siguiente:

- Resistivímetro Modelo ARES II, Marca GF Instruments, el cual está integrado por un equipo de transmisión y recepción de corriente eléctrica, así como por equipo accesorio constituido por cables activos, controladores y electrodos metálicos.
- Alimentado por baterías de 12 Volts.

- Para este trabajo el equipo se interconectó con siete cables activos que permiten realizar lecturas de hasta 56 electrodos.



Figura 2.7. Ejecución de la técnica de Imágenes de Resistividad Eléctrica

2.3.2 Radar de Penetración Terrestre

La técnica geofísica de Radar de Penetración Terrestre (RPT) es una herramienta muy útil y de uso común en la detección de cavidades, fracturas, fallas, distribución estratigráfica, detección de tuberías metálicas y no metálicas. En términos generales, en esta técnica se transmite una señal electromagnética de alta frecuencia al subsuelo, la cual regresa con información del terreno. Con la técnica de radar se puede obtener un perfil continuo del terreno, obteniendo información detallada tanto de manera vertical como horizontal. La Figura 2.8 ilustra conceptualmente la técnica RPT durante su ejecución.

La metodología de operación del radar es la siguiente: mediante un transmisor (Tx) emite una señal sobre la superficie del terreno, la señal se dispersa por el subsuelo y regresa a la superficie, esta señal se detecta y almacena en un receptor (Rx). El radar utiliza ondas electromagnéticas que dan mapas de gran resolución del subsuelo. En la Figura 2.9 se presentan imágenes tomadas durante la realización de esta técnica dentro de las instalaciones de la CCMH Navojoa.

Los objetivos que presentan un contraste de propiedades eléctricas y/o magnéticas, con el medio que los rodea, producen que la señal que se emite a la superficie del terreno pueda sufrir refracción, reflexión o difracción. Parte de esa energía regresa a la superficie del terreno, misma que se registra y almacena para su posterior interpretación.

La profundidad de investigación puede ser de menos de un metro a 10 o 15 metros, algunos fabricantes indican que la profundidad máxima de investigación en algunos casos particulares llega a ser de 30 a 40 m.

La toma de datos con el radar se realiza moviendo la antena sobre una línea recta, las distancias de calibración dan un control sobre los puntos muestreados (trazas). La información se muestra de manera instantánea en una computadora portátil, controlando de esta manera la calidad de la información y creando una imagen de los materiales que se presentan en el subsuelo

Los objetivos de formas geométricas como tuberías o ductos, producen que las trayectorias de la señal que llegan a estos puntos se comportan como un reflector a la señal teniéndose una dispersión esférica, por lo que se registran como hipérbolas, mientras que los reflectores planos mantienen su forma natural.

La resolución vertical y horizontal varía entre 0.03 y 0.05 m dependiendo de la frecuencia de la antena escogida y de la profundidad de investigación elegida. La interpretación cuantitativa del Radar produce información de la profundidad, tamaño, forma, etc. Para este proyecto se consideró la información obtenida con las antenas de 800 y 500 MHz, tomando una muestra a cada 0.02 m y 0.05 m.

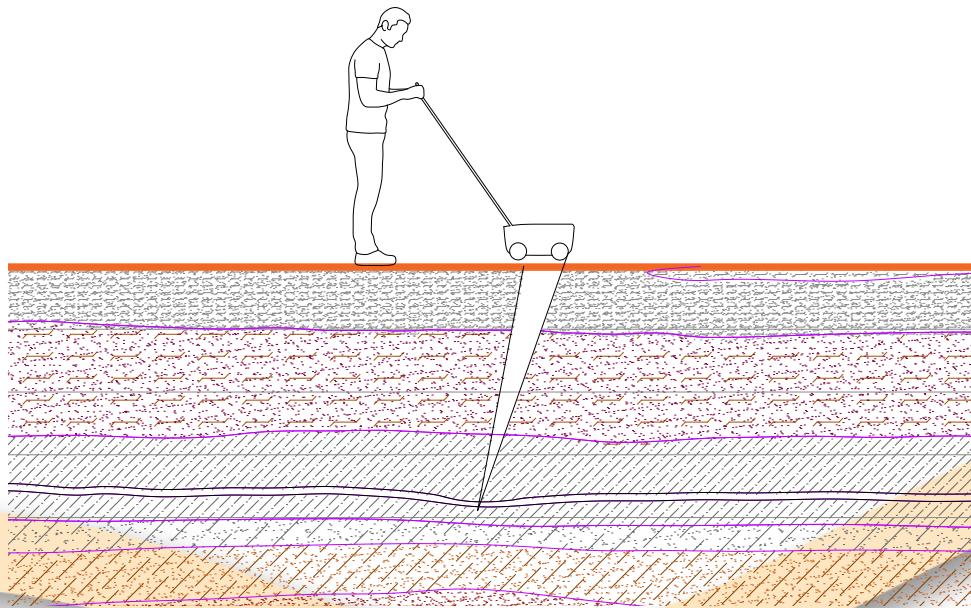


Figura 2.8. Esquema de adquisición de datos de georadar con arreglo de reflexión en modo continuo

De manera particular, para los trabajos que se llevaron a cabo en la CCMH Navojoa, las características de la unidad de control del georadar empleado para los trabajos de prospección geofísica fueron las siguientes:

- Modelo: X3M.
- Marca: RAMAC (MALA GeoSciense AB).
- Antena Blindada de 800 MHz.
- Modelo: 800 MHz.
- Marca: RAMAC (MALA GeoSciense AB).
- Antena Blindada de 500 MHz.
- Modelo: 500 MHz.
- Marca: RAMAC (MALA GeoSciense AB).
- Computadora Portátil.
- Carro todo terreno.
- Modelo: 250.
- Marca: RAMAC (MALA GeoSciense AB).

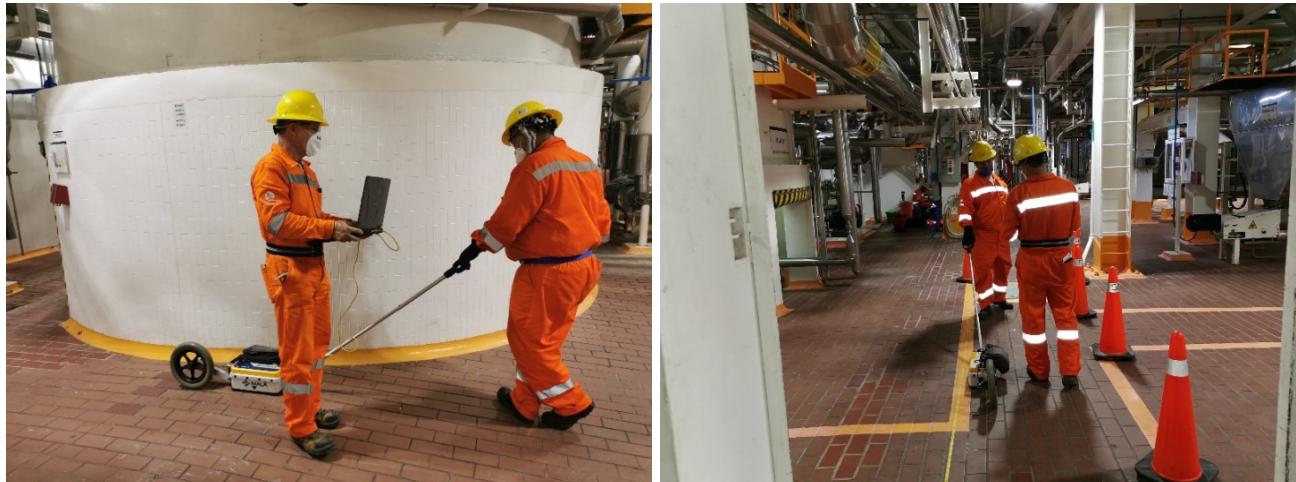


Figura 2.9. Ejecución de la técnica de Radar de Penetración Terrestre (RPT)

3 RESULTADO DE TRABAJOS GEOFÍSICOS DE CAMPO

3.1 Imágenes de Resistividad

El método de Imágenes de Resistividad Eléctrica permitió apreciar la distribución de las resistividades tanto en sentido lateral como vertical y detectar anomalías o diferencias de comportamiento que presentan las isolíneas de resistividad, identificando diferentes intervalos de resistividad, los cuales se asociaron con las diferentes características de los materiales existentes en el subsuelo.

Se utilizó el arreglo Dipolo-Dipolo con espaciamiento entre electrodos de 1 m para conocer los valores de resistividad aparente obtenidos por métodos convencionales de corriente continua, caracterizar electro-estratigráficamente el sitio y obtener un modelo litológico-estructural. Con las 11 líneas se cubrió una longitud de exploración de 280 m, para adquirir una respuesta eléctrica del sitio a una profundidad aproximada de 3.0 a 7.0 m.

En las Imágenes de Resistividad Eléctrica, la medición y distribución de las variaciones de los isovalores de resistividad permite inferir la litología y posibles condiciones estructurales del subsuelo para correlacionar los valores medidos o zonas anómalas con los efectos calculados en modelos numéricos donde se calculan las relaciones causa-efecto en términos de una función matemática. De esta forma se generan modelos de inversión y a partir del análisis de la técnica empleada, se realiza una valoración del subsuelo. Debe considerarse que la resistividad del subsuelo y especialmente la de los estratos superiores (los más superficiales) puede variar notablemente con las estaciones del año y la precipitación pluvial que pueden modificar su contenido de humedad y la calidad del agua.

La profundidad real de penetración alcanzada por la prospección es función de la distribución y características de los materiales en el subsuelo. El procesamiento, análisis e interpretación de los valores de resistividad obtenidos a partir de las líneas realizadas en campo alcanzaron una profundidad máxima de prospección de 7.0 m. Dicha interpretación muestra que en la estratigrafía del subsuelo predominan materiales arcillosos y arcillo limosos.

En las imágenes que se presentan en las Figuras 3.1 a 3.10 se presentan la distribución de las curvas isoresistivas obtenidas con los trabajos de prospección realizados. Con la finalidad de observar claramente las zonas de concentración de valores asociadas con las diferentes características de los materiales y la magnitud del valor atribuido a cada una de ellas es posible agrupar los resultados en torno a los valores siguientes:

- Intervalo de valores de resistividad eléctrica menores a 1 ohm-m, asociado con la presencia de agua caliente en el subsuelo.
- Intervalo de valores de resistividad eléctrica entre 1 y 10 ohm-m, atribuidos a material arcilloso.
- Intervalo de valores de resistividad eléctrica entre 10 y 30 ohm-m, atribuidos a material para la mejora del terreno y cimentación de las estructuras de las instalaciones.
- Intervalo de valores de resistividad eléctrica de mayores a 30 ohm-m, relacionados con **cimentaciones y oquedades**.

En general entre 0.50 y 1.0 m de profundidad, se tiene la presencia del piso, concreto, relleno y cimentación de la infraestructura con que cuenta el Área de Cocimiento, que se caracterizan por presentar valores de resistividad de entre 10 y 30 ohm-m, alcanzando valores de 30 a 300 ohm-m cuando se tiene la presencia de la cimentación. A partir de esta profundidad se presenta material arcilloso que en condiciones normales presenta valores de resistividad de entre 4 y 10 ohm-m, al presentar mayor contenido de humedad los valores de resistividad eléctrica llegan a mostrar hasta 1 ohm-m. Los materiales arcillosos al estar húmedos o saturados con agua a altas temperaturas presentan valores de resistividad eléctrica menores a 1 ohm-m.

3.2 Radar de Penetración Terrestre

En el sitio de trabajo en el momento de realizar el levantamiento se presentó una gran cantidad de infraestructura subterránea, formada por ductos de conducción de agua potable, drenaje, energía eléctrica, rejillas metálicas, cimentación, entre otros, lo cual puede generar anomalías en los registros del Radar de Penetración Terrestre. Por ejemplo, en algunos de los radargramas obtenidos, hay manifestaciones de zonas con presencia de discontinuidades de origen geológico o antropogénico, tales como cavidades, grietas, fracturas, bajo las líneas realizadas. En el anexo B se presentan los radargramas obtenidos en cada una de las líneas de exploración ejecutadas.

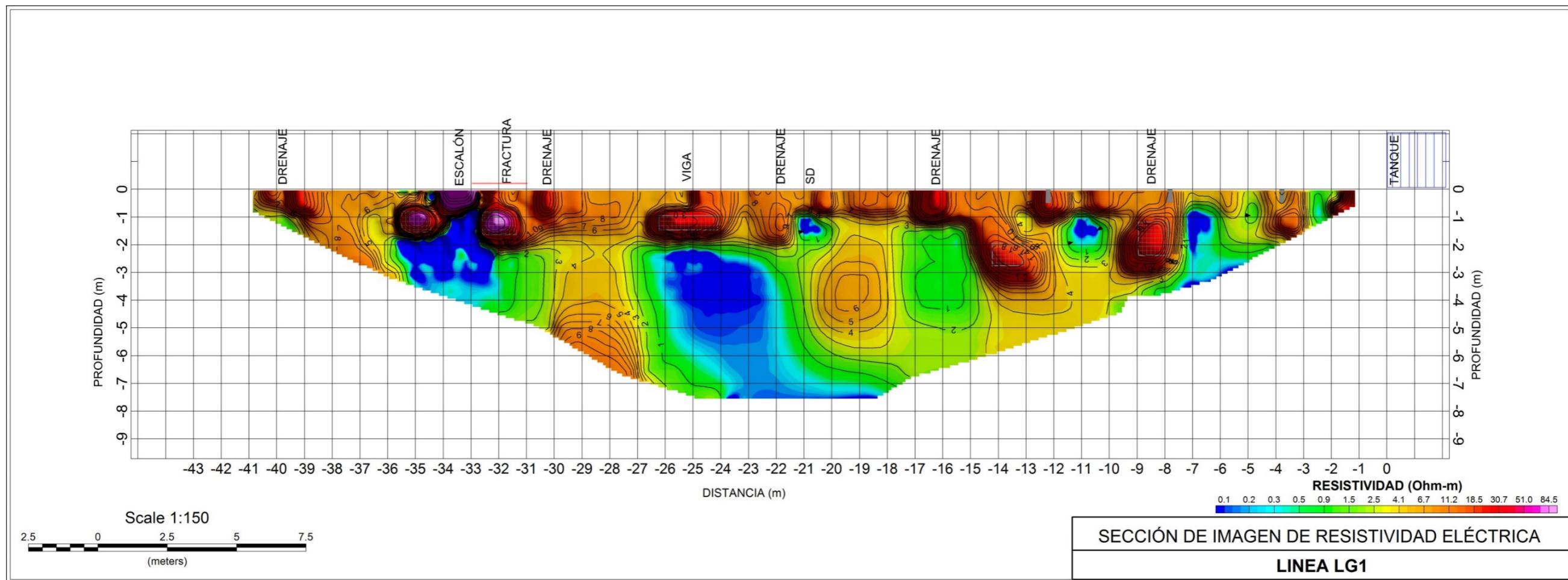
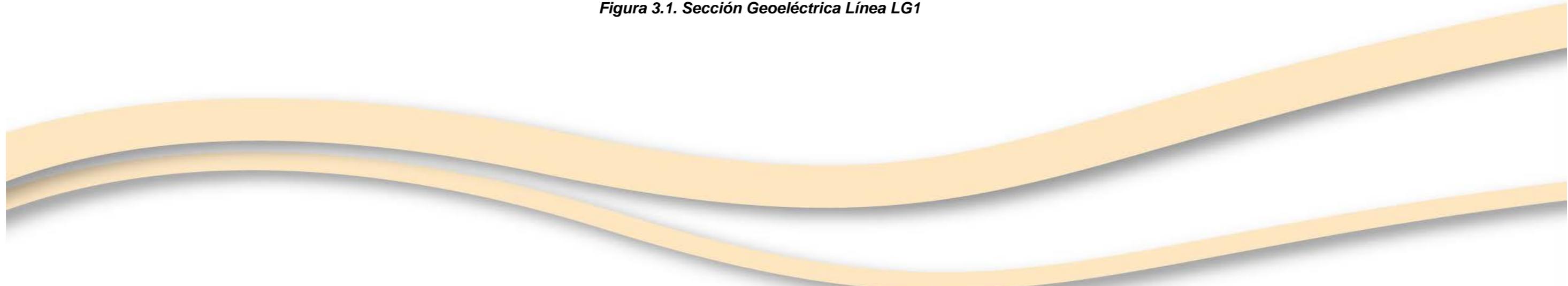


Figura 3.1. Sección Geoeléctrica Línea LG1



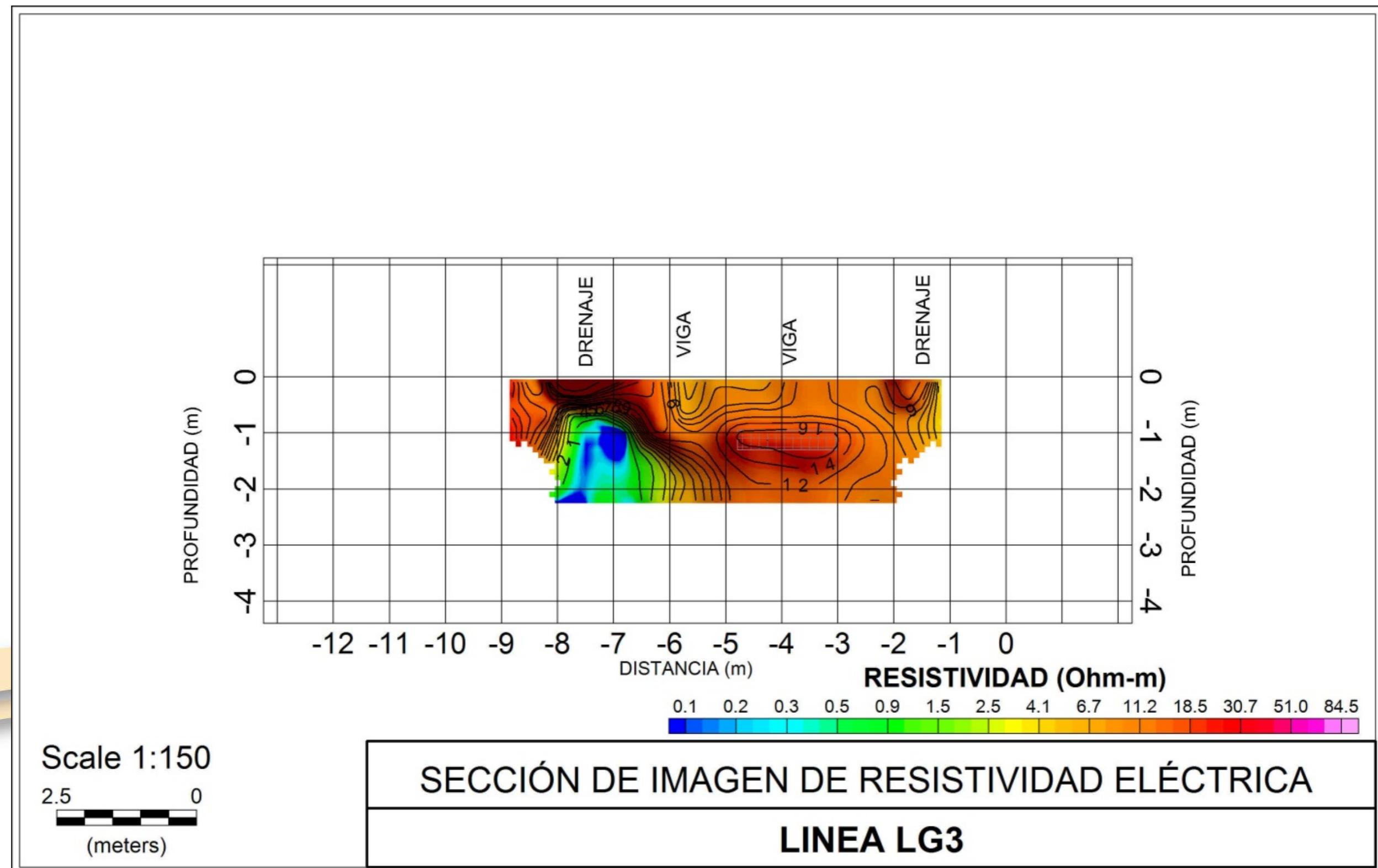


Figura 3.2. Sección Geoeléctrica Línea LG3

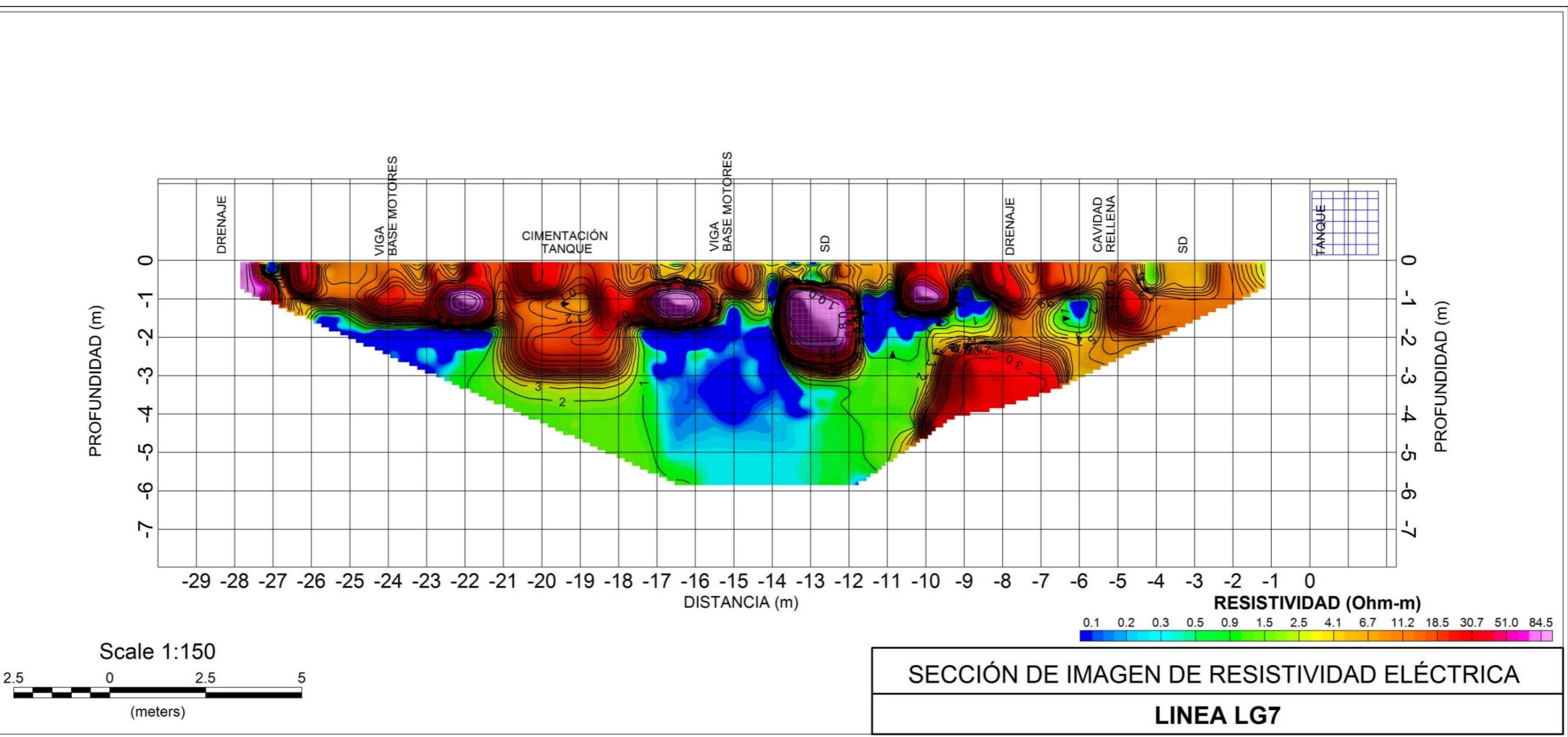


Figura 3.3. Sección Geoeléctrica Línea LG7

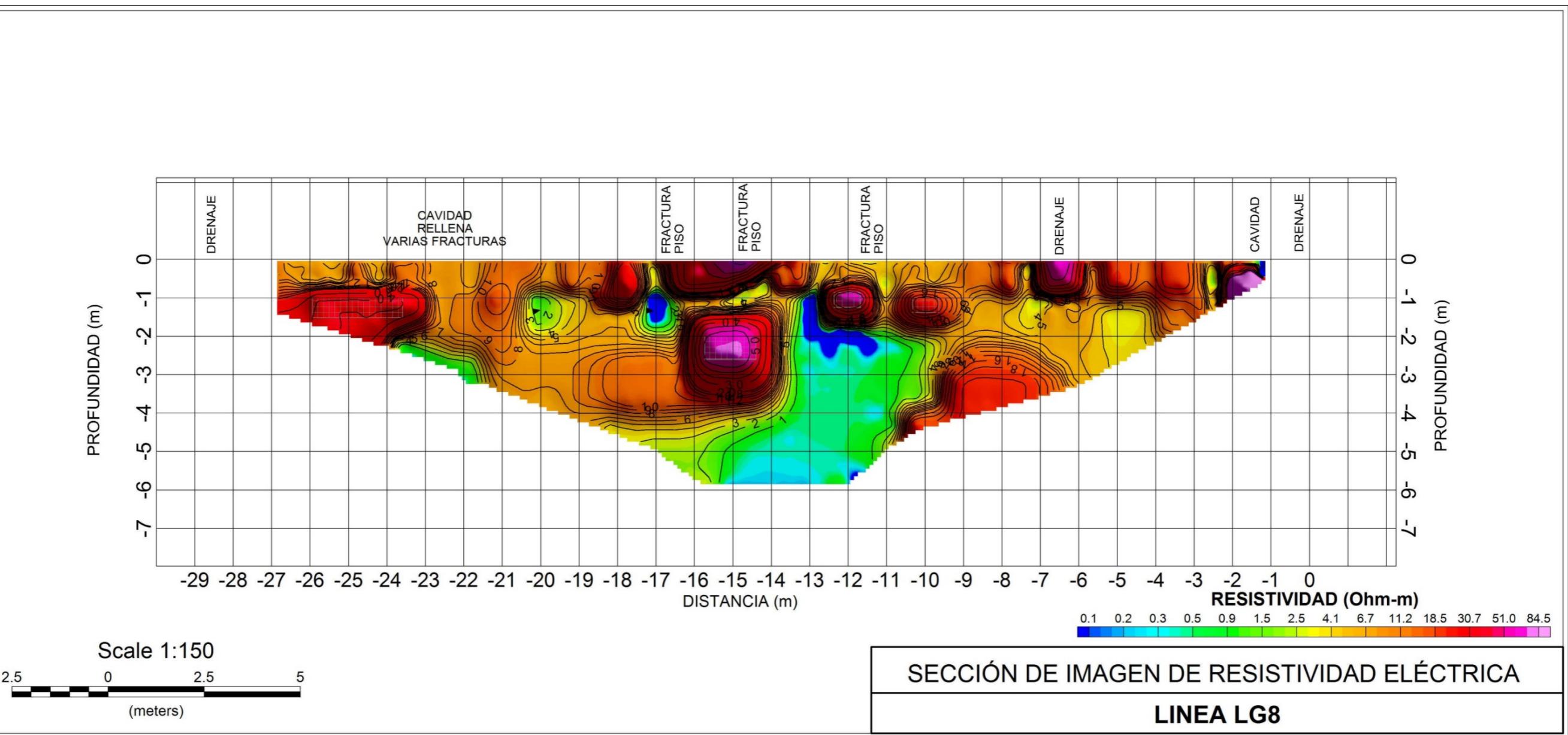


Figura 3.4. Sección Geoeléctrica Línea LG8

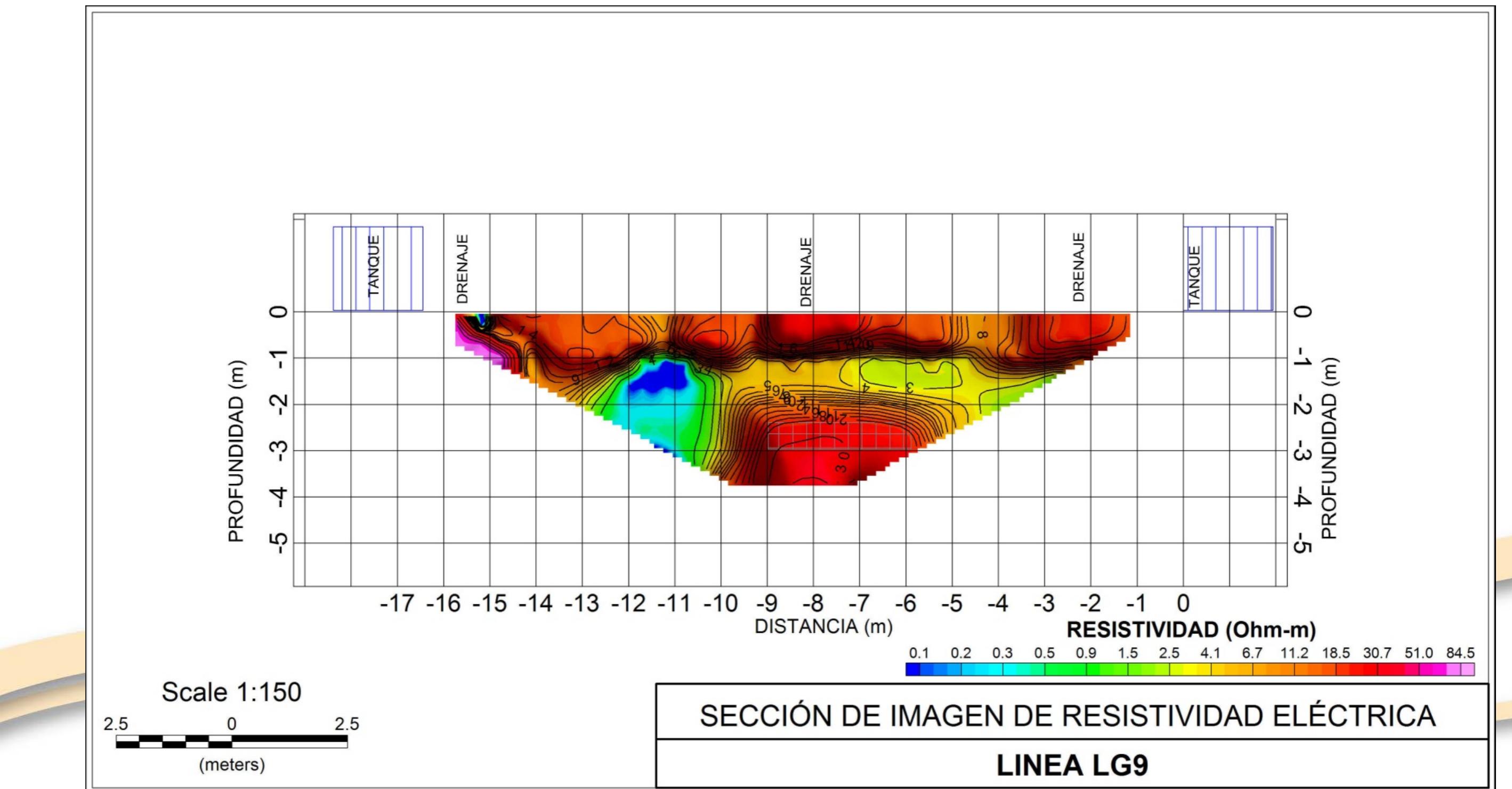


Figura 3.5. Sección Geoeléctrica Línea LG9

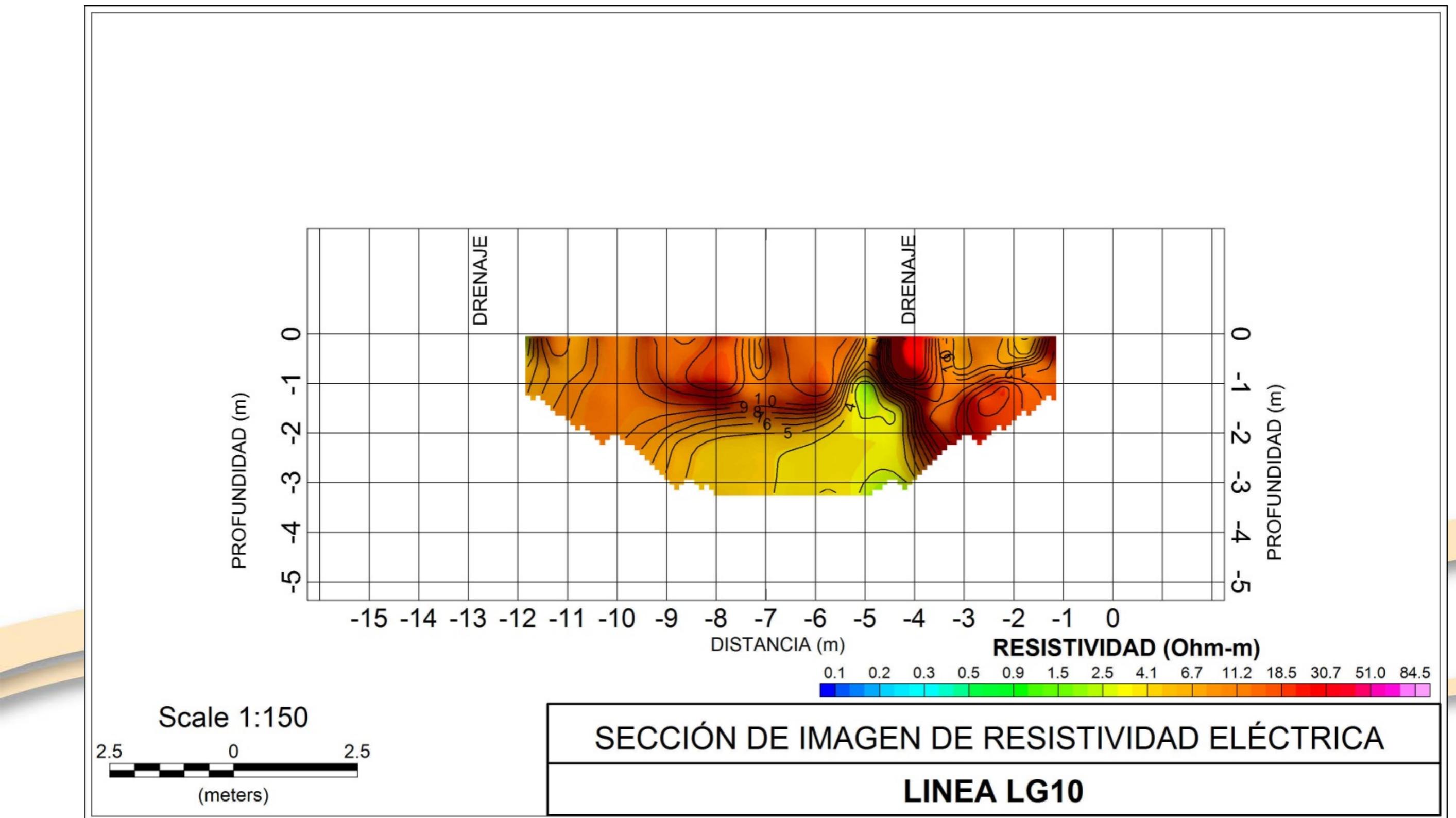


Figura 3.6. Sección Geoeléctrica Línea LG10

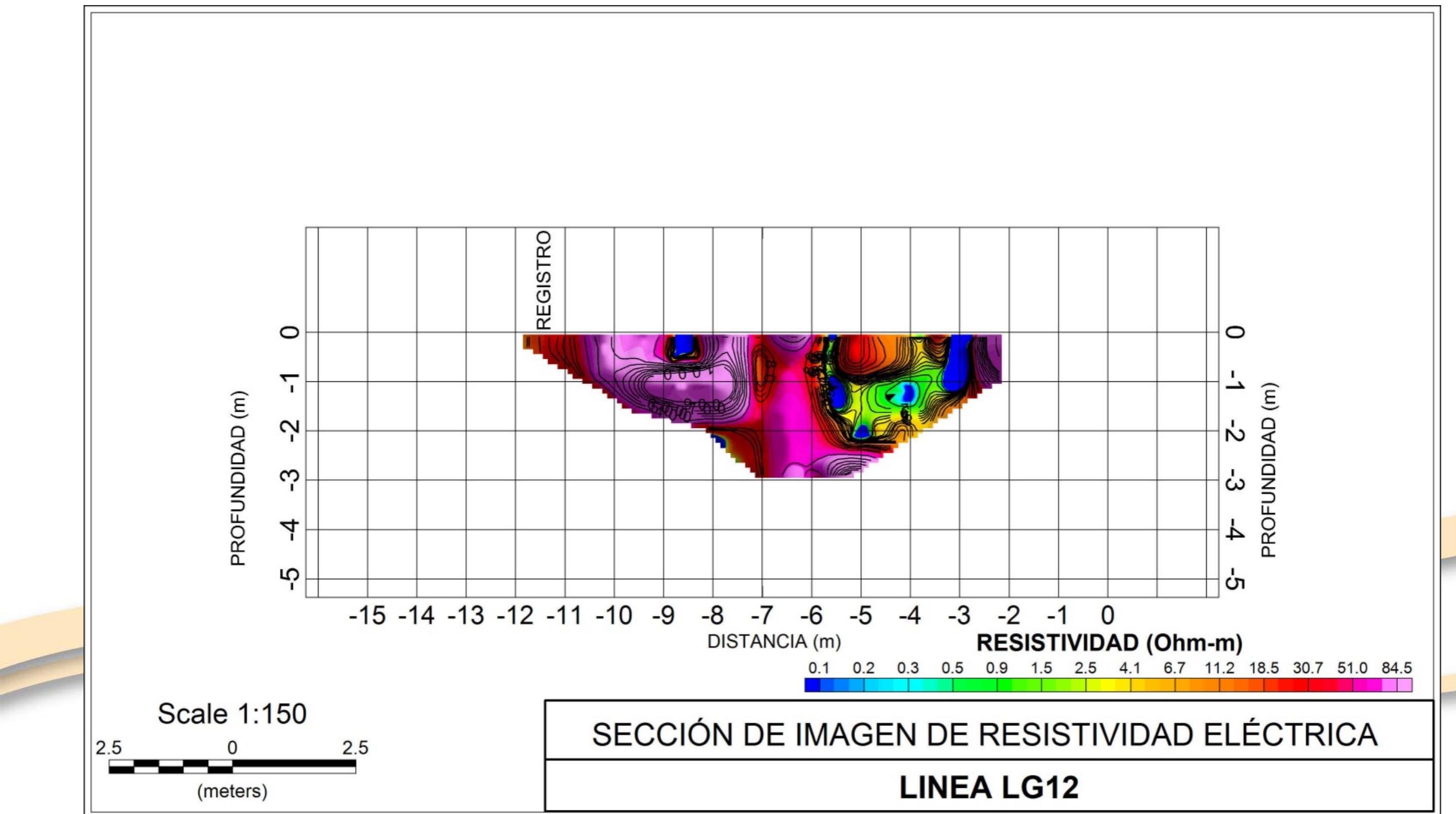


Figura 3.7. Sección Geoeléctrica Línea LG12

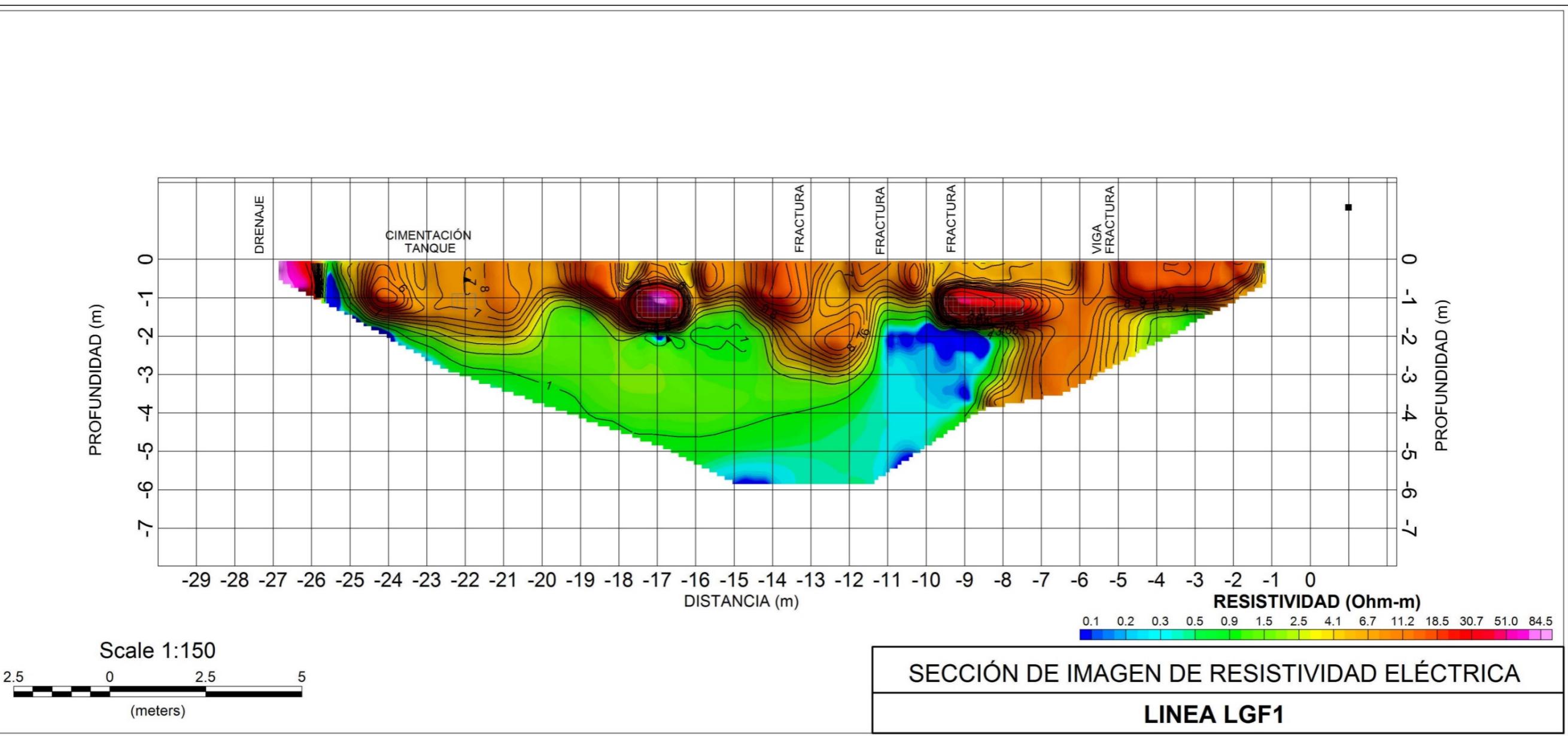


Figura 3.8. Sección Geoeléctrica Línea LGF1

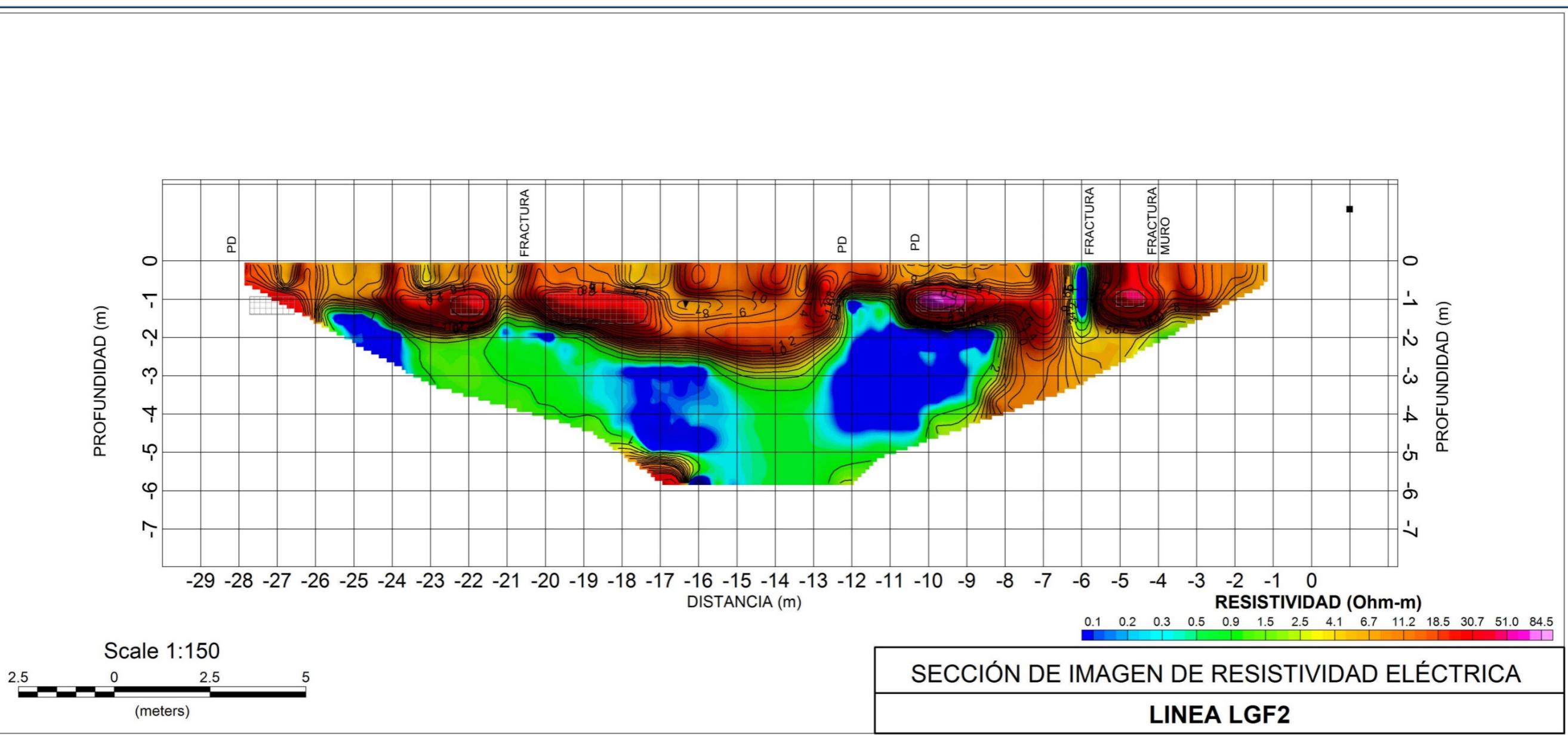


Figura 3.9. Sección Geoeléctrica Línea LGF2

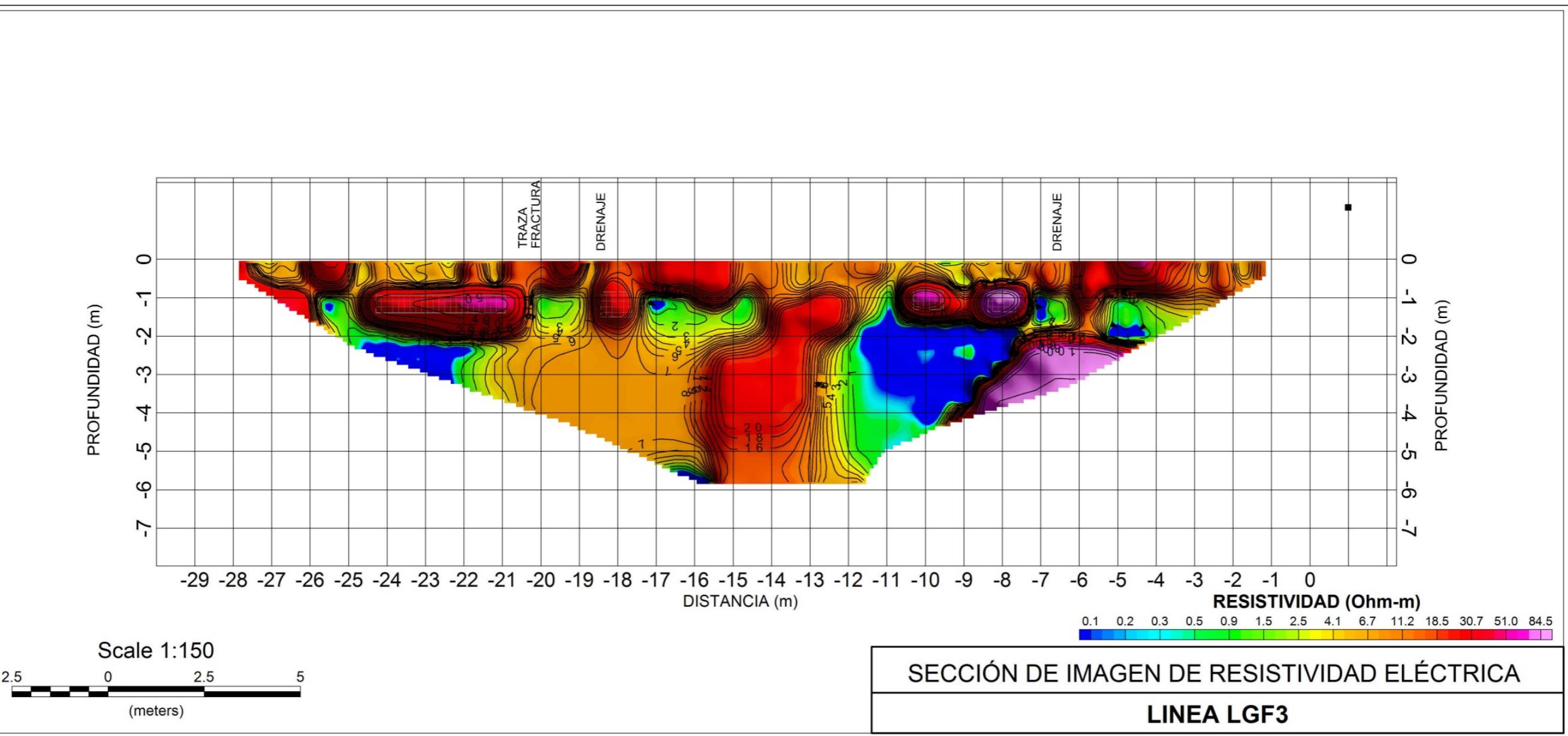


Figura 3.10. Sección Geoeléctrica Línea LGF3

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Criterios de interpretación

Con la información obtenida mediante las técnicas de Imágenes de Resistividad Eléctrica y de Radar de Penetración Terrestre se formaron las Figuras 3.1 a 3.10, en ellas se muestra la distribución de las zonas arcillosas con presencia de agua caliente (Color Azul claro), la correlación entre Secciones de Imágenes de Resistividad Eléctrica con la infraestructura, fracturas y cavidades encontradas.

Las Figuras 4.1 a 4.3 muestran de manera general los criterios aplicados para la interpretación de los resultados obtenidos mediante los trabajos de prospección geofísica. Como parte de los aspectos de interpretación cabe aclarar que se identificaron algunas zonas con valores de resistividad alta; sin embargo, estos valores podrían atender a componentes estructurales del área de cimiento como cimentaciones, drenajes, elementos estructurales, ya que estos elementos presentan en su mayoría una forma geométrica bien definida (en contraste con aquellas geometrías que pudiesen interpretarse como cavidades o discontinuidades, en cuyo caso se esperarían geometrías altamente irregulares o de bóveda).

Los resultados sugieren que existe una relación directa entre los agrietamientos que se observan en el piso y el inicio o final de una zona de arcillas en el subsuelo con presencia de agua caliente. En la sección de imágenes de las Figuras 4.4 a 4.6 se muestran en planta las anomalías encontradas con los métodos geofísicos aplicados.

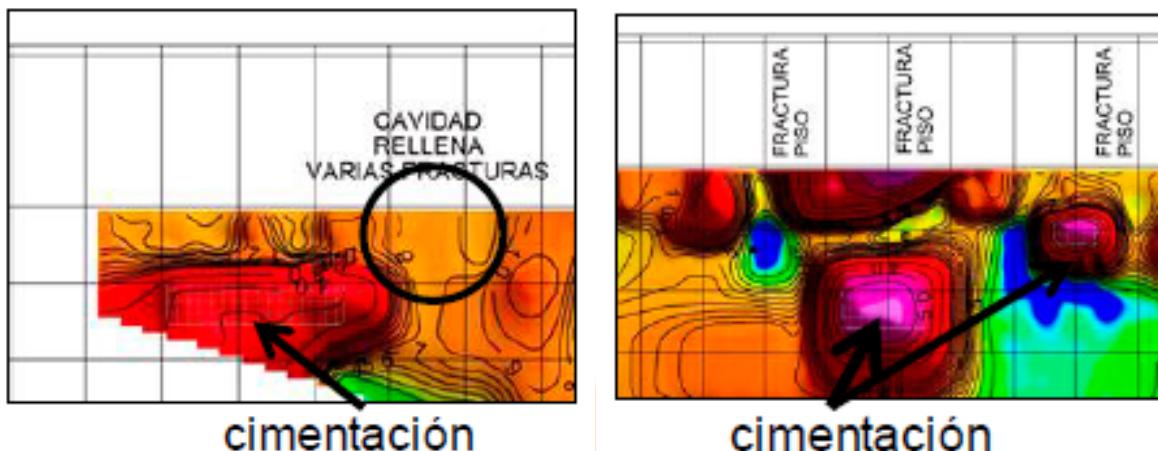


Figura 4.1. Elementos estructurales con valores de resistividad mayores a 50 ohm-m

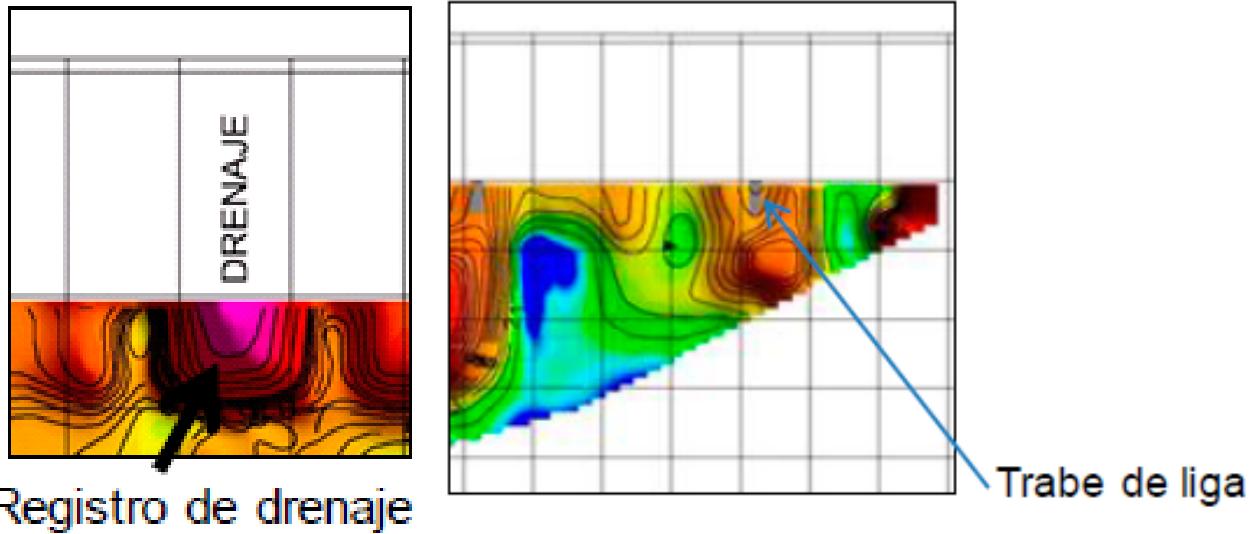


Figura 4.2. Elementos estructurales con valores de resistividad mayores a 50 ohm-m

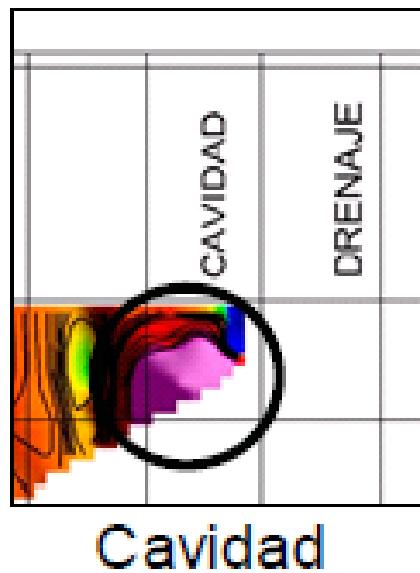


Figura 4.3. Cavidad con valores de resistividad mayores a 50 ohm-m

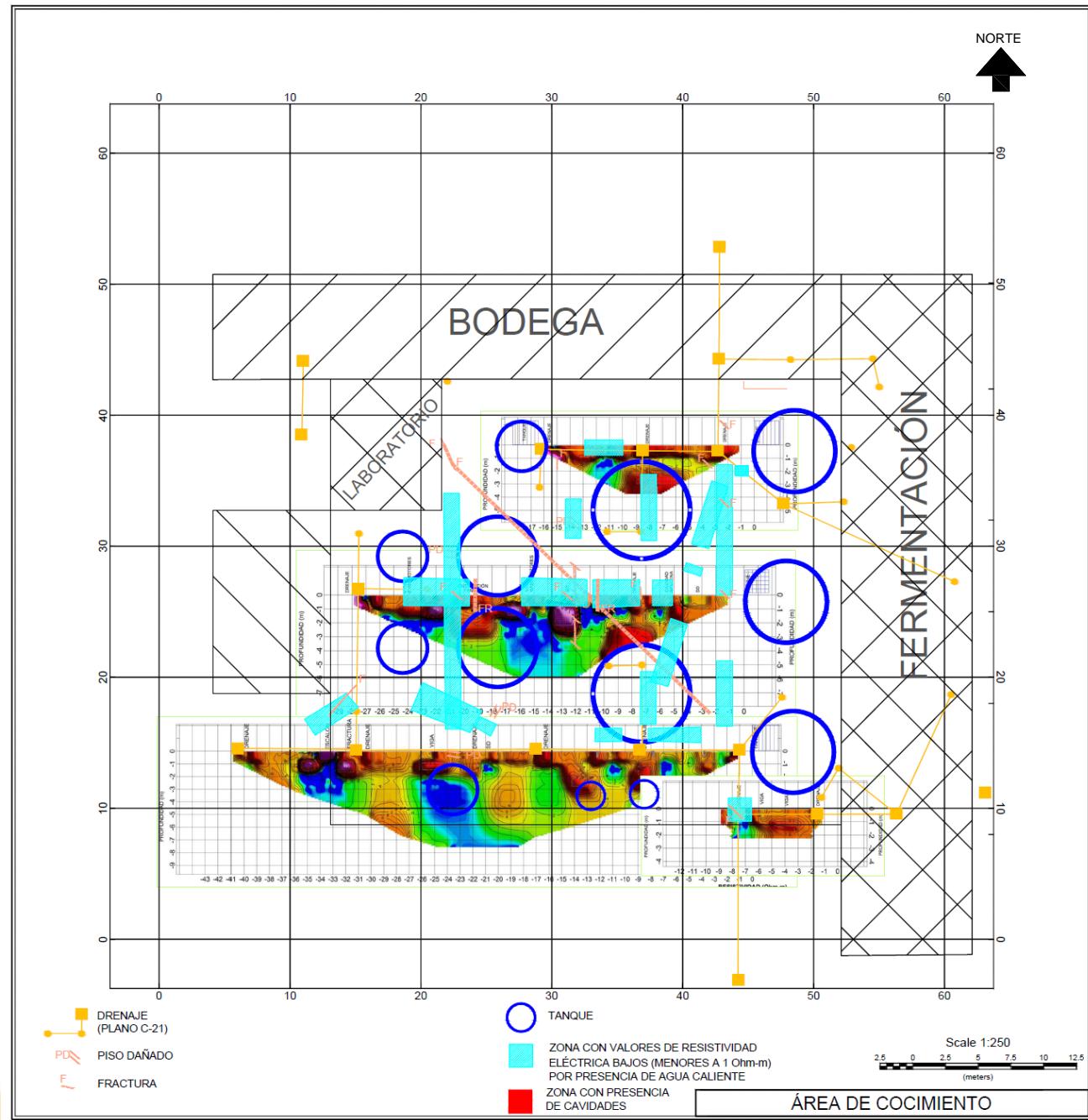


Figura 4.4. Correlación entre Secciones de Imágenes de Resistividad Eléctrica, la infraestructura y zonas con presencia de arcillas con agua caliente

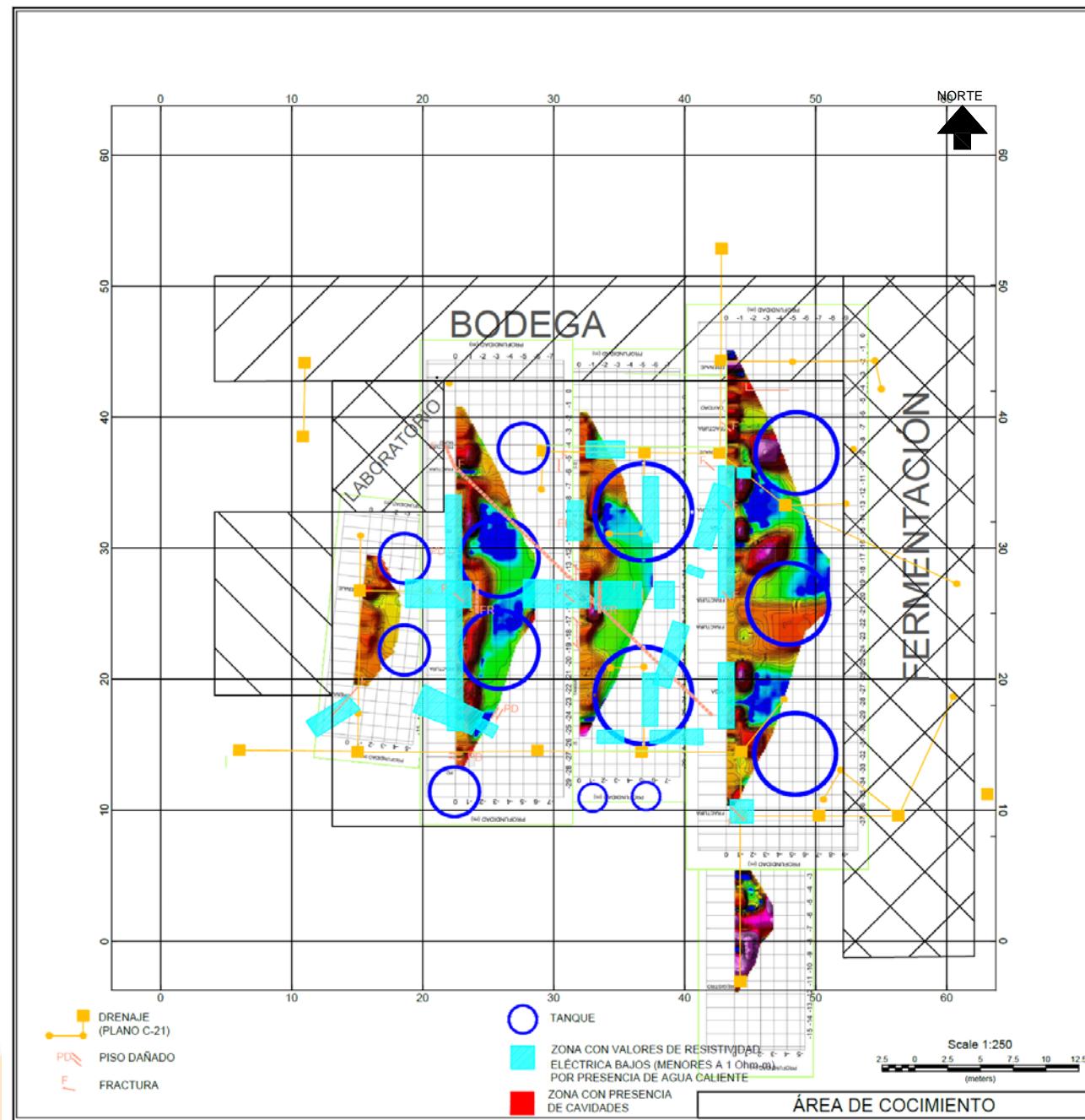


Figura 4.5. Correlación entre Secciones de Imágenes de Resistividad Eléctrica, la infraestructura y zonas con presencia de arcillas con agua caliente

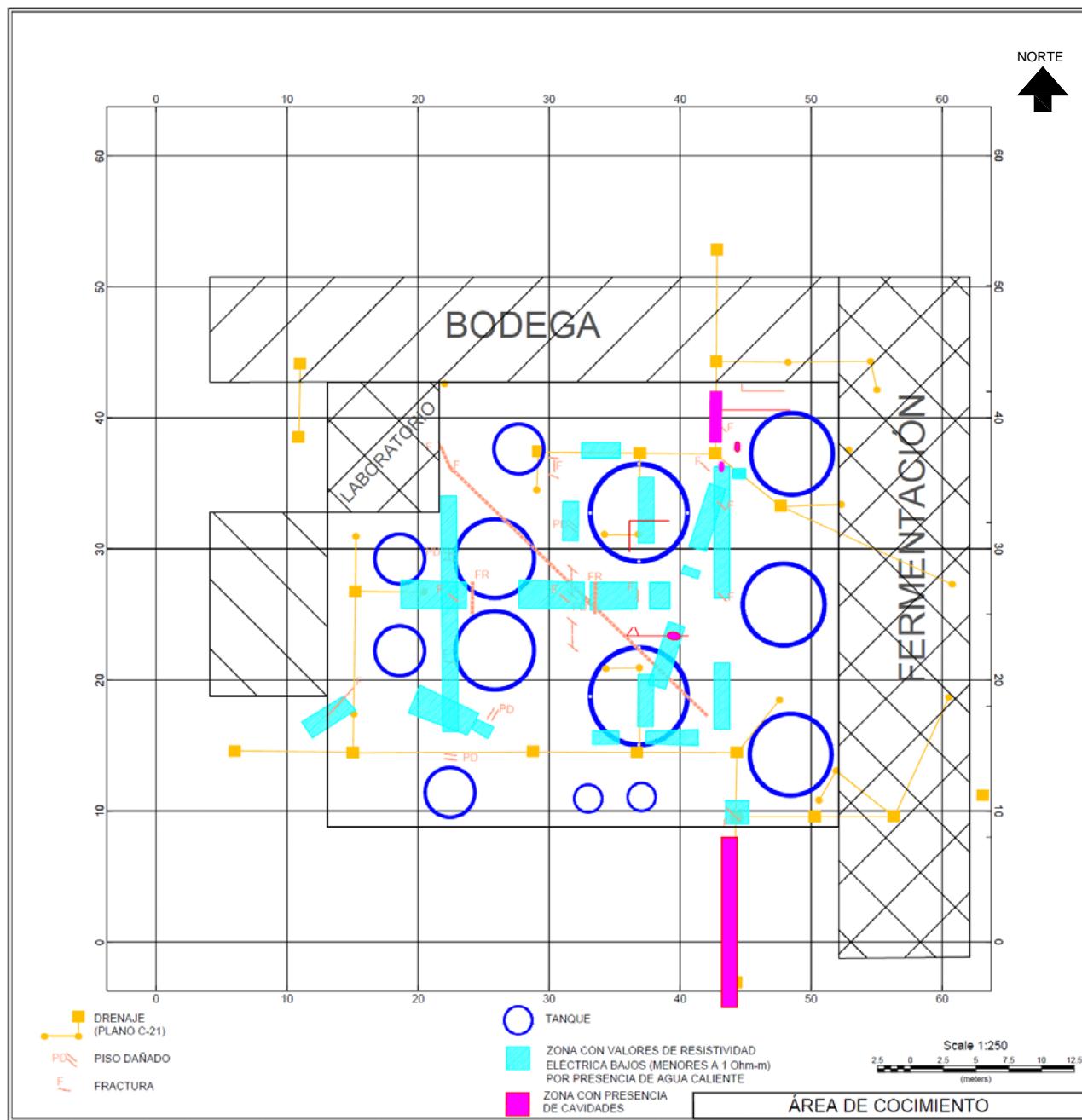


Figura 4.6. Zonas con presencia de arcillas con agua caliente, fracturas y cavidades, encontradas mediante la exploración

4.2 Identificación de Cavidades

De acuerdo con la exploración geofísica realizada combinando las dos técnicas geofísicas ejecutadas se identificaron valores que sugieren la presencia de cavidades en las siguientes líneas: LG8, LG12, LR18, LGF4, LR11, LR7, LR27, LR21, LR5, LR1, estas cavidades se identificaron principalmente de manera superficial, y se encontrarían entre 0.5 y 0.8 m de profundidad. En la Figura 4.7 se muestra en planta las zonas identificadas con presencia de cavidades y en la Tabla 4.1 se enlistan un resumen de las cavidades mencionadas.

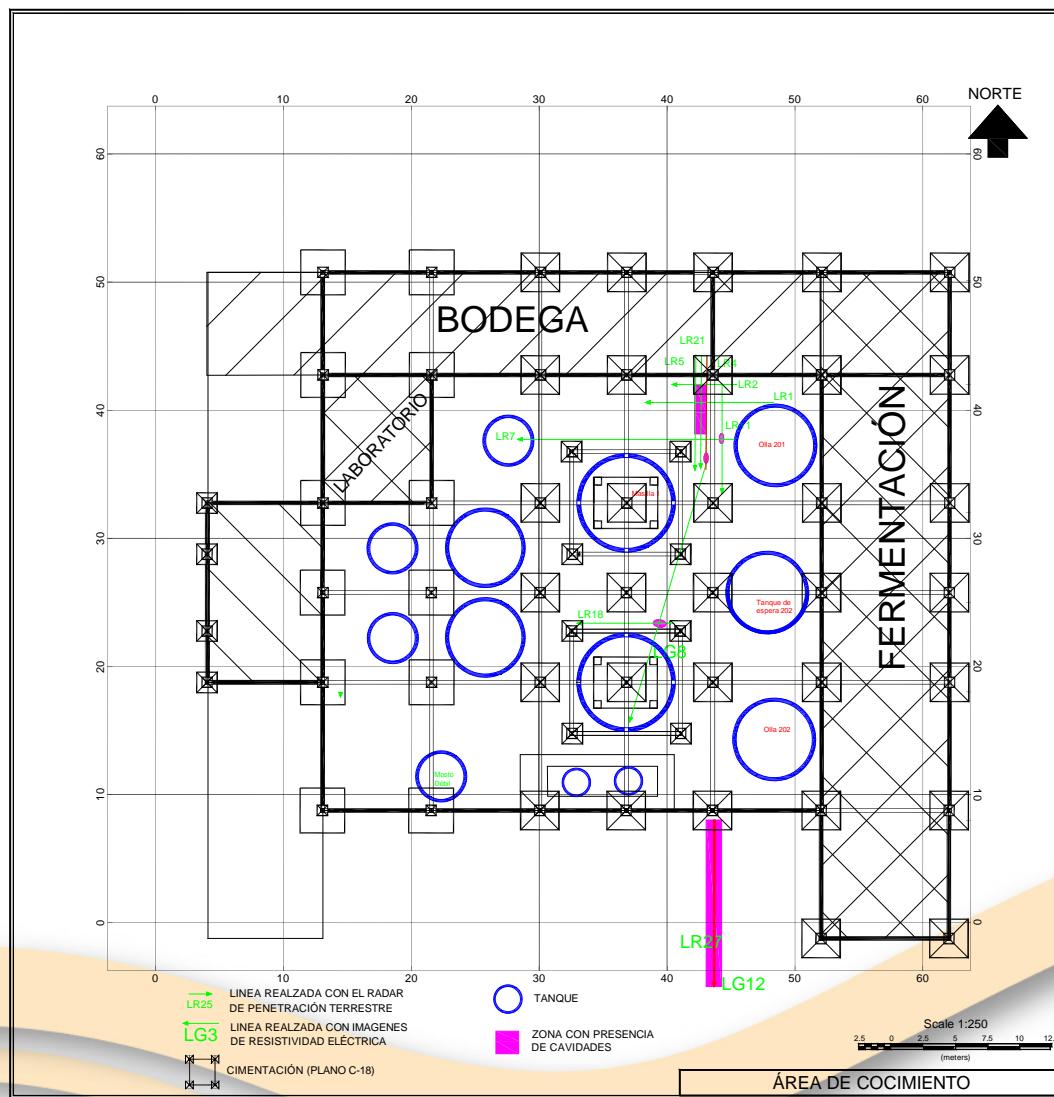


Figura 4.7. Ubicación de líneas de exploración geofísica con valores sugerentes de cavidades.

Tabla 4.1. Cavidades inferidas con exploración geofísica

LÍNEA DE GEOFÍSICA	DIMENSIÓN APROXIMADA DE LA CAVIDAD [m]	PROFUNDIDAD [m]
LG8, LR4, LR21, LR5 Y LR1	3.7	0.50-0.80
LR11, LR7	0.8	0.50-0.80
LG8, LR18	0.8	0.50-0.80
LR27, LG12	5-13	0.50-0.80

4.3 Zonas con presencia de agua a altas temperaturas

Adicionalmente, con base en los trabajos de exploración geofísica se identificaron zonas con valores que sugieren la presencia de agua caliente en el subsuelo. Es posible que la saturación del subsuelo por efecto del flujo de esta agua pudiera ser el principal detonante de las anomalías superficiales identificadas en la sección 2.1 de este documento. En la Figura 4.8 se muestra en planta las zonas con presencia de agua caliente, en la Tabla 4.2 se enlista las líneas donde se detectó agua caliente.

Finalmente, en la Figura 4.9 se muestran las anomalías detectadas, tanto las zonas con presencia de agua caliente, como las zonas en donde se detectaron cavidades.

Tabla 4.2. Detección de agua caliente con exploración geofísica

Línea Geofísica	Zona con presencia de agua caliente [m]
LG1, LR25, LR24	3.8
LGF2, LG1, LR19	6.48
LGF2, LR22, LG7	15.21
LR22	5
LGF1	3
LR22, LGF1	5
LR20	2
LR26	1.75
LGF3, LG1	4
LR20, LGF3, LR19, LG8	4
LG1	4
LR19, LGF4	5
LG8, LR18	5
LGF1, LR22	5
LR22	3.5

LR22	1.5.
LG8	0.6
LGF4	10
LG8	5
LR16, LGF3	5
LR11	0.8
LR6, LR7, LR13	3

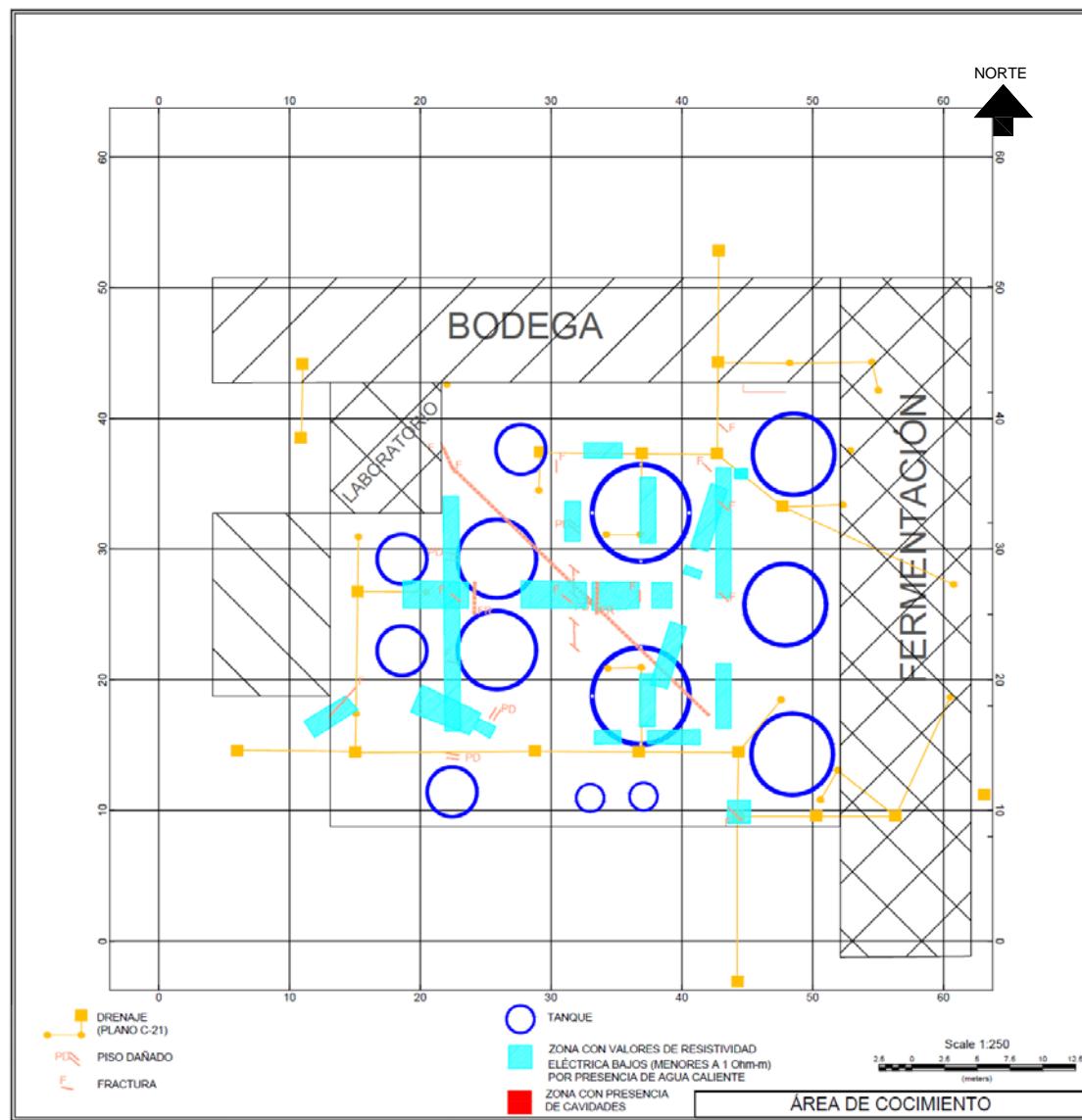


Figura 4.8. Distribución de las zonas arcillosas con presencia de agua caliente (Color Azul claro)

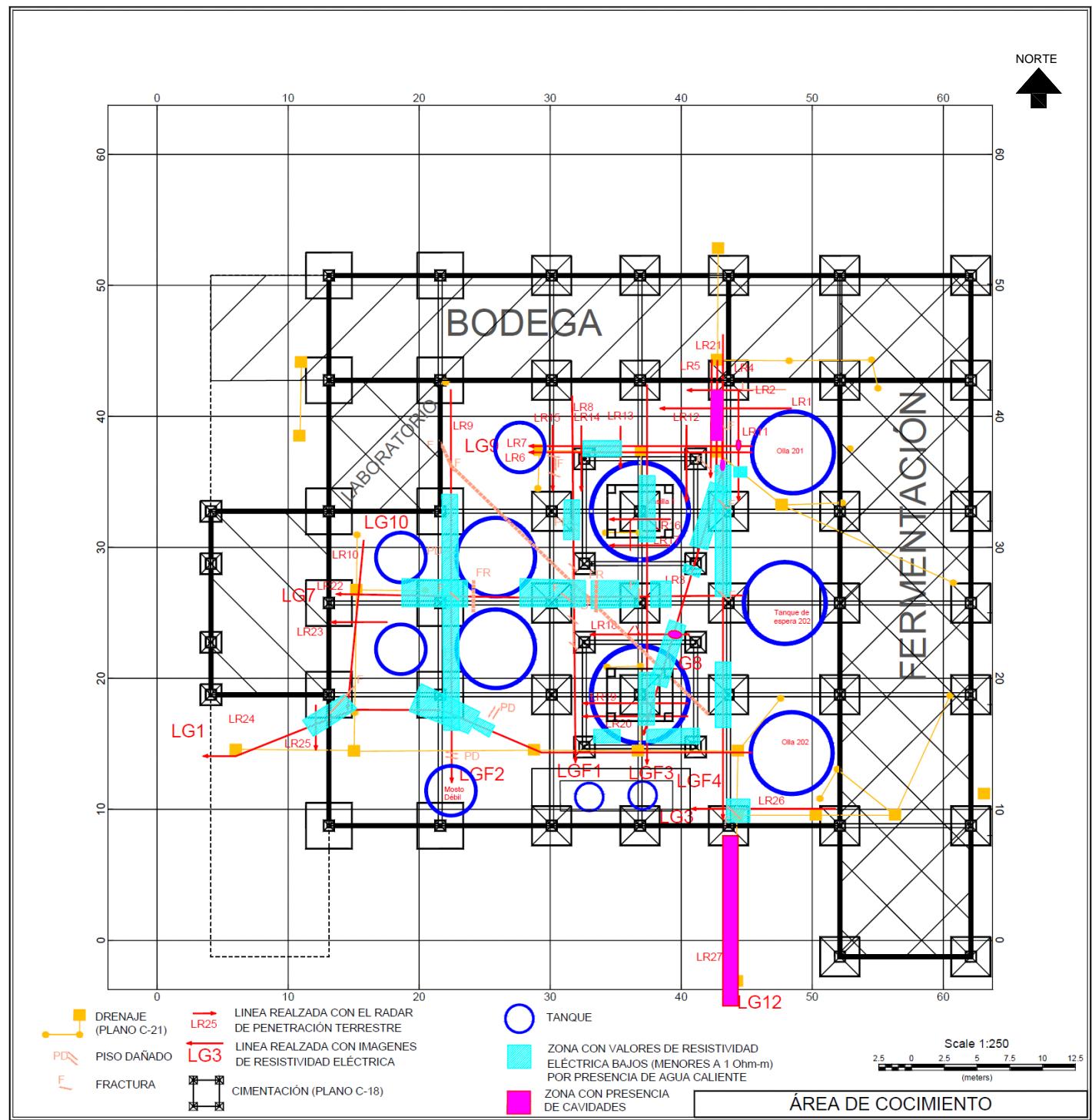


Figura 4.9. Ubicación de la Exploración Geofísica realizada, cimentaciones, zonas con presencia de arcillas con agua caliente, fracturas y cavidades encontradas

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este informe se presenta el Estudio Geofísico para la identificación de cavidades en el área de Cocimiento de la Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma Heniken planta Navojoa, misma que se ubica en el municipio de Navojoa, Sonora, México. En resumen, el presente informe da cuenta de los resultados obtenidos con la campaña de prospección geofísica, su localización y la interpretación desprendida de ellos. A partir de lo cual se emiten las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Dentro de los trabajos de campo se realizó un recorrido por la zona de cocimiento donde se identificaron rasgos superficiales con presencia de agrietamientos en piso, zapatas de cimentación y en un muro de laboratorio, de igual manera se observó una cavidad en la alcantarilla de la entrada de la zona de cocimiento. Estos rasgos se han recopilado de manera fotográfica en el Anexo A.
- Como parte de la problemática que presenta la zona de cocimiento se identificó el fenómeno de tubificación como responsable de la formación de cavidades adyacentes a algunas de las tuberías de barro vitrificado que se encuentran dentro del área cocimiento.
- Al revisar la distribución de las instalaciones dentro de las zonas de Cocimiento, Fermentación y Bodega, se realizó una redistribución de las líneas programadas, adicionalmente, se encontraron una serie de fracturas sobre el piso dentro de las instalaciones de Cocimiento, por lo que la distribución de la Exploración Geofísica quedó de la siguiente manera:
 - Se realizaron 11 líneas con el método de Imágenes de Resistividad, con longitudes de 11 a 43 m, para un total de 280 m lineales
 - Se llevaron a cabo 29 líneas con la técnica de Radar de Penetración Terrestre, con longitudes de 3.2 a 43 m, para un total de 432 m lineales.
- Como parte de los trabajos geofísicos se obtuvieron secciones Geoeléctricas con diferentes colores de acuerdo a la distribución de las curvas isorresistivas. Con la finalidad de observar claramente las zonas de concentración de valores asociadas con las diferentes características de los materiales y la magnitud del valor atribuido a cada una de ellas es posible agrupar los resultados en torno a los valores siguientes:
 - Intervalo de valores de resistividad eléctrica menores a 1 ohm-m, asociado con la presencia de agua caliente en el subsuelo.
 - Intervalo de valores de resistividad eléctrica entre 1 y 10 ohm-m, atribuidos a material arcilloso.

- Intervalo de valores de resistividad eléctrica entre 10 y 30 ohm-m, atribuidos a material para la mejora del terreno y cimentación de las estructuras de las instalaciones.
- Intervalo de valores de resistividad eléctrica de mayores a 30 ohm-m, relacionados con **cimentaciones y oquedades**.
- En el sitio de trabajo en el momento de realizar el levantamiento se presentó una gran cantidad de infraestructura, formada por ductos de conducción de agua potable, drenaje, energía eléctrica, rejillas metálicas, cimentación, etc., lo cual genera pequeñas anomalías en los registros del Radar de Penetración Terrestre.
- En general entre 0.50 y 1.0 m de profundidad, se tiene la presencia del piso, concreto, relleno y cimentación de la infraestructura con que cuenta el Área de Cocimiento, que se caracterizan por presentar valores de resistividad de entre 10 y 30 ohm-m, alcanzando valores de 30 a 300 ohm-m cuando se tiene la presencia de la cimentación. A partir de esta profundidad se presenta material arcilloso que en condiciones normales presenta valores de resistividad de entre 4 y 10 ohm-m, al presentar mayor contenido de humedad los valores de resistividad eléctrica llegan a mostrar hasta 1 ohm-m. Los materiales arcillosos al estar húmedos o saturados con agua caliente presentan valores de resistividad eléctrica menores a 1 ohm-m.
- Se identificaron 4 zonas con valores de resistencia que sugieren la presencia de cavidades, con dimensiones aproximadas de 0.80 m y 13 m con una profundidad entre 0.50 m y 0.80 m, en la Figura 4.7 se presenta en planta la ubicación de los resultados con sugerencia de cavidades.
- Se identificaron 22 zonas con valores de resistencia que sugieren la presencia de agua caliente, con dimensiones aproximadas que oscilan entre 0.60 m y 15 m, en la Figura 4.8, se presentan las zonas identificadas con presencia de agua caliente.
- Los resultados obtenidos sugieren que existen fugas en la red de alcantarillado que han generado la formación de cavidades superficiales y la saturación del depósito de suelo. Por tanto, para mitigar el impacto de estas situaciones sobre el comportamiento de las cimentaciones se presentan las recomendaciones siguientes:
 - Sanear el sistema de alcantarillado del área en estudio, ya que esta es la principal fuente de la problemática, el saneamiento se podrá realizar por secciones o de forma general, esta es una reparación de carácter mayor por lo que se deberá evaluar de acuerdo con la logística propia de la producción de la planta.
 - Una vez saneado el sistema de alcantarillado se deberán llenar las oquedades superficiales producidas por el fenómeno de tubificación, este relleno se podría realizar mediante, material de relleno compactado, inyecciones de relleno fluido,

colocación de concreto ciclópeo o material granular adecuadamente compactado.

- Como ya se mencionó se ha detectado agua caliente en el medio de la zona cocimiento lo cual podría reducir de manera significativa la capacidad de carga de las cimentaciones, conduciendo eventualmente a condiciones de falla o a la generación de asentamientos diferenciales importantes. Asimismo, la presencia de agua en el medio ha modificado las propiedades mecánicas del subsuelo de cimentación, por lo cual se recomienda realizar la revisión de las propiedades mecánicas del subsuelo y evaluar la seguridad actual de las cimentaciones.
- Asimismo, es recomendable realizar la revisión estructural de los equipos y tanque que se encuentran dentro de la CCMH Navojoa, con el fin de conocer el nivel de seguridad actual de las estructuras.
- Se recomienda verificar la calidad de las terracerías y la localización y dimensiones de las cavidades a través de sondeos de penetración dinámica tipo Panda ®.
- Dadas las condiciones de operación actual de la CCMH Navojoa es altamente recomendable contar con un plan de instrumentación y un programa de monitoreo de las estructuras de mayor envergadura del área, este monitoreo se puede realizar mediante controles topográficos como son líneas de colimación y control de asentamientos, y también a través de instrumentos de medición como podrían ser clinómetros, piezómetros o strain-gauge en elementos estructurales.

REFERENCIAS

1. ASTM D6431 – 99 (2010) Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation.

Elaboró:

Ing. Roberto A. Ortega Guerrero

Ing. Ricardo Barajas Dominguez

Revisó:

M. I. José Ramón Cruz Águila

Aprobó:

M. en I. José Ma. Reyes Mariano

Av. Dr. José Ma. Vértiz no. 1097
Col. Vértiz Narvarte, Del. Benito Juárez
México, D.F. C.P. 03600
Tel.: (55) 4753 3568

contacto@dicimsa.com
www.dicimsa.com