



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D EN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS

Alumno: María Alejandra Baltodano Pineda

Tutor: Rosendo Mendoza Vilchez
Julián Martínez López

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2024



**Universidad
de Jaén**

Escuela Politécnica Superior
de Linares

UNIVERSIDAD DE JAÉN
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LINARES

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS MINERAS
EXPLOTACIÓN DE MINAS, SONDEOS Y PROSPECCIONES MINERAS

TRABAJO FIN DE GRADO

**APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D EN LA DETECCIÓN DE
ESTRUCTURAS ENTERRADAS**

Alumna: María Alejandra Baltodano Pineda

Tutor: D. Rosendo Mendoza Vílchez

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Tutor: D. Julián Martínez López

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Firma Alumna:

Firma Tutor:

Firma Tutor:

Tabla de contenido

Resumen	11
Introducción	12
Objetivos	14
1. CAPITULO I: ANTECEDENTES	15
1.1. Situación geográfica	15
1.2. Descripción del emplazamiento	17
1.3. Situación geológica	21
1.3.1. Litoestratigrafía	23
1.3.2. Orogenia Hercínica	26
1.4. Tipología de los Yacimientos	28
1.5. Minería.	30
1.5.1. Minería romana en la zona de estudio.	30
1.5.2. Antiguas concesiones mineras de la zona de estudio. Mina de San Telmo.	36
1.5.3. Descripción del sistema de explotación utilizado en el distrito. Época industrial.	44
1.6. Estudios geofísicos realizados en la zona.	50
2. CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	52
2.1. Técnicas geofísicas utilizadas en arqueología	52
2.1.1. Técnicas electromagnéticas. Georradar (GPR)	53
2.2. Técnicas eléctricas	56
2.2.1. Fundamento del método de resistividades	57
2.3. Tomografía Eléctrica (ERT)	58
2.3.1. Fundamento Tomografía Eléctrica	58
2.3.2. Resistividad	59

2.3.3.	Resistividad aparente	60
2.3.4.	Resistividad real	61
2.3.5.	Configuraciones electródicas	62
2.3.6.	Inversión de los datos	65
2.3.7.	Softwares aplicados a la técnica	66
3.	CAPITULO III: TRABAJO DE CAMPO	88
3.1.	Descripción del equipo utilizado	89
3.2.	Trabajos de campo.	92
	Día 1: adaptación del equipo de una configuración 2D a 3D	92
3.3.	Día 2: Fase de reconocimiento del emplazamiento y representación en RES2DMOD99	
3.4.	Día 3 y 4: Campaña de campo en el área de estudio	104
3.4.1.	Planificación de la campaña	104
3.4.2.	Montaje del dispositivo	107
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
4.1.	PROSYS III	111
4.2.	Comparativa de datos obtenidos en RES2DMOD y RES2DINV para el perfil 6 y 7.	114
4.3.	Inversión de datos en RES3DINV	117
4.3.1.	Configuración Wenner-Schlumberger	117
4.3.2.	Configuración Dipolo – Dipolo	120
4.4.	Representación del bloque 3D en el software Voxler	124
4.4.1.	Dispositivo Wenner – Schlumberger	124
4.4.2.	Dispositivo Dipolo – Dipolo	131
	Conclusiones	139
	Referencias	140
	ANEXOS	144

Índice de ilustraciones

Figura. 1.1. Esquema de cotas y desniveles del área de estudio. Vista en planta.	16
Figura. 1.2. Vista en planta de la reconstrucción del conjunto de muros.	17
Figura. 1.3. Vista de uno de los muros en el que se aprecia la disminución gradual en altura hacia la zona abierta.....	18
Figura. 1.4. Altura máxima que alcanza el muro en el enclave.....	19
Figura. 1.5. Roca en forma de cuña encontrada en las inmediaciones del muro.19	
Figura. 1.6. Yacimientos de la Prehistoria reciente. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).	32
Figura. 1.7. Mapa de localización de yacimientos y minas romanas del distrito Linares – La Carolina. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).	33
Figura. 1.8. Apeadero de El Centenillo en el ferrocarril de Linares a La Carolina, con la estación del cable. (García Sánchez-Berbel, 1993).	37
Figura. 1.9. Fundición La Tortilla de Linares en el siglo XX. (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, s.f.)	38
Figura. 1.10. Vista de una cámara y pilares de la Mina Las Torrecillas.	39
Figura. 1.11. Mina San Telmo. (Eiffel Lab, 2013).	40
Figura. 1.12. Planta de Mina San Telmo. Obtenido de Google Maps https://maps.app.goo.gl/UQsrups3GHFFXeRr5	41
Figura. 1.13. Vista de un Pozo Maestro. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).	45
Figura. 1.14. Labores preparatorias a la explotación. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).	46
Figura. 1.15. Labores mineras a realce (macizo inferior) y rebaje (macizo superior). (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010)	47
Figura. 1.16. Explotación de un realce por el sistema de macizos (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).	48
Figura. 1.17. Explotación de un realce por relleno (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).	49
Figura. 2.1. Esquema del funcionamiento de un georradar.	54

Figura. 2.2. Configuración electródica del dispositivo Wenner – Schlumberger.	57
Figura. 2.3. Paso de la corriente y potenciales asociadas en un medio homogéneo.	61
Figura. 2.4. Dispositivo Wenner. (Olona, Fernández, López, & Llana, 2016)...	62
Figura. 2.5. Dispositivo Schlumberger. (Olona, Fernández, López, & Llana, 2016).....	63
Figura. 2.6. Esquema de los dispositivos electródicos más habituales en los métodos de resistividad. (Serrano Ontiveros, 2003).....	63
Figura. 2.7. Dispositivo dipolo-dipolo. (Olona, Fernández, López, & Llana, 2016).	64
Figura. 2.8. Disposición de los elementos conectados del equipo de tomografía. (COTECNO, s.f.).....	66
Figura. 2.9. Menú para escoger y configurar el dispositivo. (Rey Arrans & Martínez López, 2012).	67
Figura. 2.10. Configuración de los tiempos de inyección de corriente y voltaje.	67
Figura. 2.11. Visualización de las curvas de inyección de corriente y potencial medido, y pseudo-sección de resistividades aparentes.....	68
Figura. 2.12. Ejemplo de un modelo de bloques creado con el software RES2DMOD.....	69
Figura. 2.13. Ventana del programa RES2DMOD en la que permite al usuario realizar cambios en la configuración electródica.	70
Figura. 2.14. Ventana del programa RES2DMOD que permite configurar el ruido.	70
Figura. 2.15. Gráfica de resistividad aparente obtenida del manual del software PROSYS II. (IRIS INSTRUMENTS, 2021).	72
Figura. 2.16. Ejemplo de un conjunto de datos con puntos erróneos. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).	74
Figura. 2.17. Ventana de ajustes del RES2DINV para seleccionar el valor de RMS y límite de convergencia.....	75
Figura. 2.18. Ventana del RES2DINV para seleccionar el número de iteraciones que realizará el programa.	76
Figura. 2.19. Herramientas utilizadas para la distorsión de la malla del terreno con respecto a la topografía. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).....	78

Figura. 2.20. Secuencia para obtener el resultado de la inversión por mínimos cuadrados en RES2DINV.....	79
Figura. 2.21. Ejemplo de un perfil realizado en RES2DINV a partir de un modelo teórico.....	79
Figura. 2.22. Menú de Display en programa RES3DINV. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).....	82
Figura. 2.23. Ventana "Mostrar cambio en el modelo" en el software RES3DINV. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).....	82
Figura. 2.24. Resultado del modelo de inversión del vertedero de Ekeboda. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).....	83
Figura. 2.25. Ilustración de la relación entre diferentes archivos de datos y diferentes tipos de mapas.....	84
Figura. 2.26. Editor de cuadrícula de Surfer con las ventanas de Contenidos y Propiedades a la izquierda y la ventana del editor de cuadrícula a la derecha.....	85
Figura. 2.27. Representación de una isosuperficie en la ventana de resultados.	86
Figura. 2.28. Ejemplo de diagrama de dispersión luego de añadir la caja que marcan los límites de los datos.....	87
Figura. 2.29. Ejemplo de resultado posterior al uso de Heightfields tomado de la guía para el usuario de Voxler.....	87
Figura. 3.1. Detalle de electrodo conectado al cable y caja de conexión.	89
Figura. 3.2. Familia de cable 2.	90
Figura. 3.3. Tomógrafo. DMT. Resecs.....	90
Figura. 3.4. Convertidor.....	91
Figura. 3.5. Batería y cargador.	91
Figura. 3.6. Configuración de electrodos en forma de Zigzag. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).....	93
Figura. 3.7. Dispositivo Wenner-Schlumberger.	93
Figura. 3.8. Secuencia de medidas para construir una pseudosección (Rey Arrans & Martínez López, 2012).	94
Figura. 3.9. Dispositivo Dipolo-Dipolo.....	95
Figura. 3.10. Geometría del campo. Día 1.....	95
Figura. 3.11. Configuración electródica Wenner – Schlumberger.	96
Figura. 3.12. Configuración electródica Dipolo – Dipolo.	96
Figura. 3.13. Conexión entre electrodos y el cable.....	96

Figura. 3.14. Conexión de los componentes al ordenador.....	97
Figura. 3.15. Introducción de parámetros al software.	97
Figura. 3.16. Vista de la pantalla del ordenador en donde se muestran de manera gráfica las resistividades aparentes.....	98
Figura. 3.17. Planteamiento del método y dispositivo.....	99
Figura. 3.18. Configuración de la malla del modelo realizado en RES2DMOD.	101
Figura. 3.19. Modelo teórico del perfil para obtención de la pseudosección en RES2DMOD.....	101
Figura. 3.20. Elección de porcentaje de ruido al modelo creado.....	102
Figura. 3.21. a) Pseudosección para dispositivo Wenner – Schlumberger. b) Pseudosección para dispositivo Dipolo – Dipolo. Obtenido del modelo teórico creado en RES2DMOD.....	103
Figura. 3.22. Cuadrícula.	104
Figura. 3.23. División del área de trabajo en dos campañas.....	105
Figura. 3.24. Geometría del campo para días 3 y 4.	105
Figura. 3.25. Colocación de cinta métrica para medir la distancia entre estacas.	107
Figura. 3.26. Tensión de cinta métrica para comprobación de alineación de los electrodos.....	107
Figura. 3.27. Esquema de regiones de interés y electrodos ubicados en los muros.	108
Figura. 3.28. Esquema de instalación del dispositivo y ubicación de la estación base.	108
Figura. 3.29. a) Distribución y conexión de electrodos en el terreno de estudio para el día 3. b) Introducción de parámetros de estudio en el tomógrafo para el día 3.....	109
Figura. 3.30. a) Distribución y conexión de electrodos en el terreno de estudio para el día 4. b) Introducción de parámetros de estudio en el tomógrafo para el día 4.....	110
Figura. 4.1. Cambio en negativo de coordenadas x.	111
Figura. 4.2. Representación de las coordenadas x que el equipo ha medido en campo.	112
Figura. 4.3. a) adición de cotas topográficas de región sur. b) adición de cotas topográficas en región norte. c) orientación de medidas región sur. d) orientación de medidas región norte.	112

Figura. 4.4. Panel para revisión y realización del filtrado de datos.....	113
Figura. 4.5. a) Resultado de la inversión con el dispositivo Wenner – Schlumberger. b) Resultado de la inversión con el dispositivo Dipolo – Dipolo. Obtenido del software RES2DINV a partir del modelo teórico creado en el programa RES2DMOD.	114
Figura. 4.6. a) Resistividad real del perfil 7 de los datos de campo con el dispositivo Wenner – Schlumberger. b) Resistividad real del modelo teórico del perfil 7 con el dispositivo Wenner – Schlumberger.....	115
Figura. 4.7. a) Resistividad real del perfil 7 de los datos de campo con el dispositivo Dipolo – Dipolo. b) Resistividad real del modelo teórico del perfil 7 con el dispositivo Dipolo – Dipolo.	116
Figura. 4.8. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Wenner - Schlumberger de los perfiles con coordenadas (X, Y).....	118
Figura. 4.9. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Wenner – Schlumberger de los perfiles con coordenadas (X, Z).	119
Figura. 4.10. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (Y, Z).	120
Figura. 4.11. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (X, Y).....	121
Figura. 4.12. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (X, Z).	122
Figura. 4.13. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (Y, Z).	123
Figura. 4.14. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger.....	125
Figura. 4.15. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger.....	125
Figura. 4.16. Vista perfil izquierdo del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger.....	126
Figura. 4.17. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546,1. b) Plano de corte en cota 545. c) Plano de corte en cota 544,8.....	127
Figura. 4.18. Resultado del gráfico Facerender del software Voxler para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.	128

Figura. 4.19. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.	129
Figura. 4.20. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.	129
Figura. 4.21. Vista perfil izquierdo del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.	130
Figura. 4.22. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546. b) Plano de corte en cota 545. c) Plano de corte en cota 544,8.	131
Figura. 4.23. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo.	132
Figura. 4.24. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo.	132
Figura. 4.25. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo.	133
Figura. 4.26. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546. b) Plano de corte en cota 545,4. c) Plano de corte en cota 545.	134
Figura. 4.27. Resultado del gráfico Volrender del software Voxler para dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica.	135
Figura. 4.28. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.	136
Figura. 4.29. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica.	136
Figura. 4.30. Vista perfil izquierdo del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica.	137
Figura. 4.31. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546. b) Plano de corte en cota 545,2. c) Plano de corte en cota 545.	138

Índice de tablas

Tabla 1.1. Fundiciones romanas del Distrito Minero de Linares – La Carolina – Andújar.	36
Tabla 1.2. Concesiones mineras (Gutiérrez Guzmán, 2007).	42
Tabla 2.1. Tipos de antenas en relación con la frecuencia, resolución y profundidad. (Guía para el uso del equipo Georadar, s.f.).	55
Tabla 2.2. Rangos típicos de resistividades para rocas y suelos.	60
Tabla 3.1. Configuración electródica Wenner-Schlumberger.	106
Tabla 3.2. Configuración electródica dipolo-dipolo.	106

ANEXOS

ANEXO 1. Plano 1/6. Plano de situación.....	145
ANEXO 2. Plano 2/6. Plano de emplazamiento.....	146
ANEXO 3. Mapa Geológico de España. MAGNA 50 Hoja 884 (La Carolina).	147
ANEXO 4. Plano 3/6. Plano de detalle geológico del emplazamiento.	148
ANEXO 5. Mapa Metalogenético Hoja 70 (Linares).....	149
ANEXO 6. Plano 4/6. Plano de ubicación de vértices del paralelogramo del área de estudio.....	150
ANEXO 7. Plano 5/6. Plano de ubicación de electrodos del día 3.....	151
ANEXO 8. Plano 6/6. Plano de ubicación de electrodos del día 4.....	152

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Grado se realizará una revisión bibliográfica de la historia de la minería en el Distrito Linares – La Carolina; así como de los métodos de extracción empleados en las distintas etapas en las que la minería fue parte fundamental del Distrito. Es así que, con la información recopilada, se pretende contextualizar la época y la relación que tienen los muros aflorantes con la actividad minera de la zona.

Para el estudio de esta estructura enterrada, se aplicará la Tomografía Eléctrica (ERT) con un equipo capacitado para medir en 2D, y a partir de una serie de modificaciones del mismo se pretende obtener como resultado una imagen 3D de dicho cuerpo.

Introducción

En la prospección geofísica se emplean una serie de técnicas para el reconocimiento, exploración e investigación de las estructuras y materiales que yacen en el subsuelo, por lo que su utilización aporta gran información en campos de investigación minera, hidrogeológica, medio ambiente, ingeniería civil, arqueología, entre otros.

Este reconocimiento de litologías y estructuras en una determinada localización, se realiza mediante el estudio del comportamiento de sus propiedades físicas como son: la densidad, la conductividad eléctrica, la susceptibilidad que tenga el material al magnetismo, velocidad de propagación de las ondas, etc.

Para la realización de este TFG se empleará la tomografía eléctrica. Se trata de un método eléctrico que mide las resistividades del terreno utilizando un dispositivo multielectrónico. Los métodos clásicos de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Calicatas Eléctricas (CE), han evolucionado en los últimos años a la tomografía eléctrica, mejorando considerablemente las prestaciones y posibilidades de uso. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de la electrónica e informática consiguiendo la automatización del proceso, la gestión de una gran cantidad de datos, lo que permite la obtención de modelos 2D de dichas resistividades, con respecto a los antiguos Sondeos Eléctricos Verticales que aportaban modelos 1D.

Si bien es cierto que la obtención de estos modelos 2D son un avance importante dentro del campo de la prospección geofísica, pueden ser insuficientes para identificar ciertas estructuras presentes en el subsuelo, por lo que el desarrollo de modelos 3D con tomografía eléctrica, obtenidos combinando la información de múltiples perfiles, consigue obtener mayor detalle del objeto que se pretende visualizar.

Para la detección de estructuras enterradas en el subsuelo, en campos como la arqueología y la ingeniería civil, se utiliza habitualmente el GEORRADAR (GPR), técnica que permite el modelado 3D, presentando una buena resolución en la mayoría de los casos.

Por el contrario, no es habitual utilizar tomografía eléctrica ya que, aunque hay programas de modelización 3D, estos requieren implantar numerosos electrodos y

presenta limitaciones en cuanto a la superficie a cubrir y la profundidad a alcanzar para definir el objeto o estructura a investigar.

Con estas premisas, en este TFG, se quiere utilizar Tomografía Eléctrica de forma experimental para que, a partir de un gran número de perfiles paralelos, se obtenga un modelo 3D de las estructuras enterradas buscadas, comprobando su alcance y aplicabilidad. Para ello, en base a una propuesta de trabajo de campo, utilizaremos el equipamiento necesario y diferentes softwares; RESECS, RES2INV, PROSYS II, SURFER, ARCGIS y otros, para la interpretación y el modelado.

Objetivos

Objetivo general

Aplicar el método de Tomografía Eléctrica para obtener un modelo 3D en la detección de estructuras y objetos enterrados.

Objetivos específicos

- Desarrollar el método de Tomografía Eléctrica 3D para su aplicación en arqueología, extensible a otros campos de la ingeniería civil y de minas.
- Modelizar en 2D y 3D las posibles estructuras enterradas de un asentamiento íbero/romano en un enclave minero de La Carolina.

1. CAPITULO I: ANTECEDENTES

1.1. Situación geográfica

El lugar de estudio sobre el que se desarrollará el TFG, se encuentra ubicado en el norte de la Provincia de Jaén; concretamente, en el municipio de La Carolina Hoja 884 (La Carolina) a escala 1:50.000.

El acceso al emplazamiento se realiza desde el municipio de La Carolina, partiendo de la Calle del Acebuchar se toma el antiguo trazado del ferrocarril (camino del Cristo de la Buena Muerte), hacia el cortijo Molino de Goro. A unos 1.350 m. a la salida del 2º túnel al Este hay un pequeño cerro donde se localizan los restos arqueológicos que se van a investigar. Véase Anexo 2.

Las coordenadas del emplazamiento son:

- LONGITUD: 3°38'9,66"
- LATITUD: 38°15'41,30"
- X UTM: 444.358
- Y UTM: 4.235.018

El sistema de referencia empleado es el ETRS 89 ZONA 30 EPSG:25830, sistema oficial dentro del territorio de España Peninsular.

El área de trabajo está comprendida en un paralelogramo de 15 x 15 m (Véase Anexo 6), en los que afloran en superficie, con dirección NO, un conjunto de muros de un asentamiento íbero/romano, seguramente relacionado con la explotación de la actual mina de San Telmo en épocas romanas.

El asentamiento se localiza en un promontorio que presenta una orografía en forma de cerro con una altura máxima de 546,627 msnm. Los desniveles estimados del emplazamiento se pueden observar en el esquema de la Figura 1.1., en el que indican las cotas topográficas que se utilizarán en la fase de interpretación.

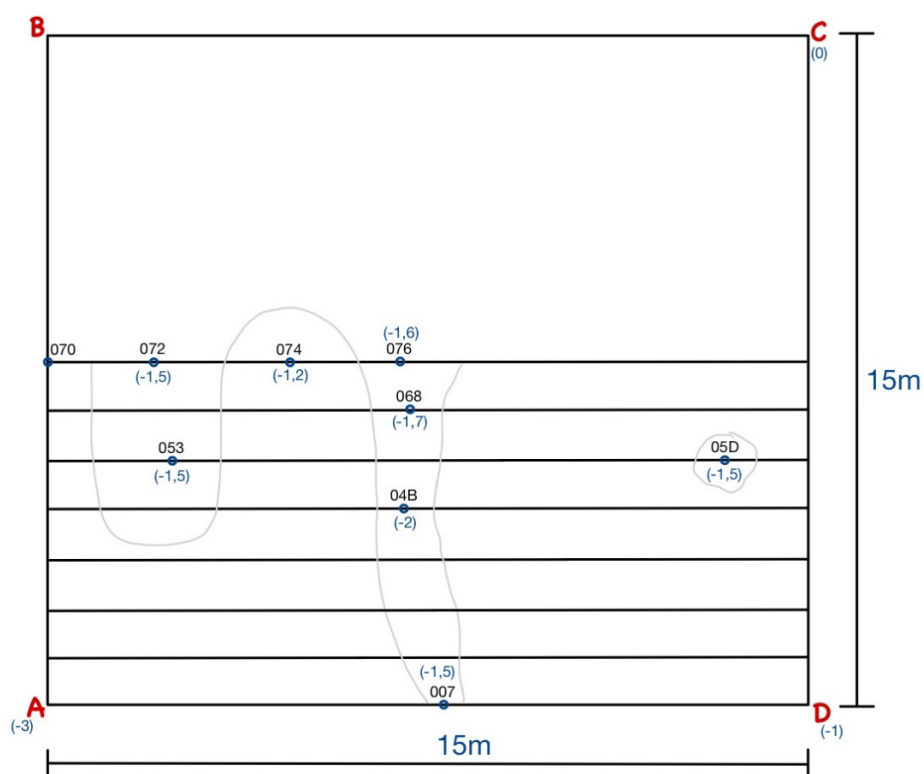


Figura. 1.1. Esquema de cotas y desniveles del área de estudio. Vista en planta.

1.2. Descripción del emplazamiento

La reconstrucción en planta a partir de los muros aflorantes de la estructura principal del conjunto, presenta una forma sencilla en herradura abierta hacia la cota menor. Los muros, están contruidos de mampostería donde se apilan bloques de pizarras y cuarcitas procedentes del entorno inmediato no observándose el uso mortero o argamasa, con una anchura perceptible de 40 – 50 cm. No presentan continuidad y están muy cubiertos por la vegetación que se ha desarrollado en la zona (encinas y monte bajo). Véase Figura 1.2.

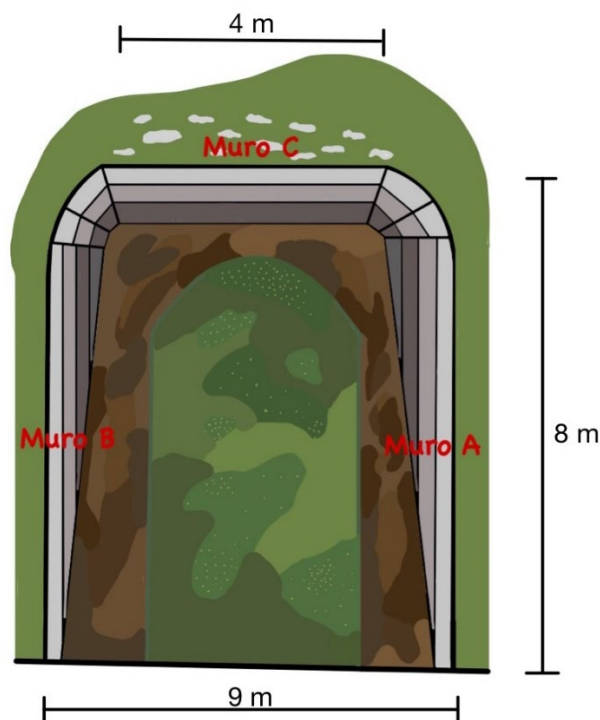


Figura. 1.2. Vista en planta de la reconstrucción del conjunto de muros.

Tiene una longitud máxima sobre el terreno de 8 m, la anchura máxima es de 9 m y la mínima en la parte abierta de unos 4 metros. Véase Figura 1.3.



Figura. 1.3. Vista de uno de los muros en el que se aprecia la disminución gradual en altura hacia la zona abierta.

Estos muros presentan distintas alturas en función a la proximidad al cierre de la estructura, en donde llega a tener una altura de hasta 1 m. Véase Figura 1.4. En otras zonas la altura del afloramiento puede tener de 30 – 40 cm y, en su parte menos perceptible, unos pocos centímetros.

Las características que presenta, tanto por su posición elevada en el terreno como por su forma constructiva, podría tratarse de un muro defensivo, ya que este tipo de construcciones eran comúnmente realizadas por los romanos por su alta eficacia a la hora de defender el sitio. Se evitaban los ángulos salientes y estructuralmente buscaban la capacidad de repartir las cargas de empuje lateral del terreno, haciendo que estas obras perduren hasta nuestros días. (Ortega Andrade, 1994).



Figura. 1.4. Altura máxima que alcanza el muro en el enclave.

Con respecto a la forma constructiva del muro, algunas de las rocas con las que fue construido poseen forma de cuña para lograr la curvatura del muro, como se aprecia en algunas rocas sueltas dispersas sobre el terreno, que probablemente provienen del muro (Ver Figura 1.5.), lo que concuerda con la documentación sobre los métodos constructivos empleados por los romanos. (Vitruvio Polion, 1997)



Figura. 1.5. Roca en forma de cuña encontrada en las inmediaciones del muro.

Usualmente, para este tipo de construcciones, los romanos utilizaban una gama de materiales que van desde ladrillos, piedras o mampostería que cumplían con las exigencias constructivas de la época para la correcta disposición del mortero y, también del mármol. (Vitruvio Polion, 1997).

En las construcciones relevantes, el mortero era obtenido a partir de la mezcla de cal y toba con puzolana triturada que se utilizaba para constituir el núcleo de los muros o en su defecto un material con el que se podría encajar las piezas de piedra. Los bloques, si bien es cierto que los romanos se proveían de canteras que garantizasen piedras de gran calidad, lo habitual era utilizar la piedra local para la construcción de muros. (Ortega Andrade, 1994).

Además del muro principal, la revisión preliminar parece revelar otras estructuras menores en el emplazamiento estudiado.

1.3. Situación geológica

Es fundamental, el establecimiento de una serie de conceptos esenciales que permitan una comprensión clara y concisa de acápites siguientes, utilizándolos como base para el análisis y desarrollo del presente escrito.

- Mena: mineral que presenta interés económico en un yacimiento mineral y que puede estar formada por una o varias especies de minerales.
- Ganga: mineral sin valor económico, que acompaña a la mena.
- Filón: criadero en el que una dimensión es pequeña (potencia) en comparación con las otras dos; rompe el terreno encajante y generalmente está comprendido entre dos superficies paralelas.
- Afloramiento mineral: parte superior de un filón o veta que sale a la superficie. (del Olmo, 2009)
- Buzamiento: inclinación o ángulo de inclinación de los filones o capas, con respecto a un plano horizontal.
- Potencia: espesor del criadero medido perpendicularmente a los hastiales, entre techo y muro.
- Acuíferos: “compartimento de las rocas o sedimentos cuyos poros pueden ser ocupados por el agua y en los que ésta puede circular libremente, en cantidades apreciables, bajo la acción de la gravedad hacia los manantiales o captaciones (pozos, galerías, etc.)” (Intituto Geológico Minero de España).
- Calicatas: zanja abierta en la dirección del filón, que levanta el terreno meteorizado y descubre el yacimiento y sus hastiales para reconocerlo.
- Trincheras: zanja que avanza superficialmente en la dirección normal al filón y con profundidad moderada, para reconocerlo.
- Pozo: Acceso vertical a la mina y, a partir de él, se realiza el laboreo de la misma: investigación, estructuración de la mina, comunicaciones, plantas o niveles, etc. (del Olmo, 2009).
- Criaderos: estructuras geológicas, confirmando los indicios, pero sin cantidades ni calidades.

- Concesión minera: es aquella que “otorga a su titular el derecho a la exploración y explotación de los recursos minerales concedidos, que se encuentren dentro de un sólido de profundidad indefinida”
- Tomografía eléctrica: es un método de resistividad multielectródico no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, diferenciándolos según sean sus valores de resistividad eléctrica. Se basa en la modelización 2D y 3D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas).
- Resistividad eléctrica: es la propiedad que presentan las rocas para oponerse al paso de la corriente eléctrica a su través.
- Conductividad: es el valor inverso de la resistividad, es decir, la facilidad de paso de la corriente eléctrica a través de un material.
- Actividad electroquímica: la actividad electroquímica está relacionada con la composición de las rocas, pero principalmente con la concentración de los electrolitos que la impregnan.
- Constante dieléctrica: es un valor que expresa la manera de polarizarse un material, cuando se le somete a un campo eléctrico. La constante dieléctrica del agua es igual a 80 unidades y el vacío tiene como valor la unidad.
- Isotropía: se define como isotropía la propiedad que presentan algunos cuerpos, de que una magnitud física, sea la misma en cualquier dirección.
- Anisotropía: se define como anisotropía la propiedad que presentan algunos cuerpos, de que una magnitud física, sea diferente en cualquier dirección.

1.3.1. Litoestratigrafía

1.3.1.1. Ordovícico

A partir del MAGNA 50 Hoja 884 (La Carolina), los materiales de procedencia más antigua son los pertenecientes al Ordovícico; los cuales se encuentran representados por alternancias de areniscas, cuarcitas y pizarras. Esta alternancia de materiales es definida por Henke (1926) como estratificación de Orthis. Anexo 3.

Las características de estos materiales son:

- Arcillas más o menos cuarcíticas.
- Pizarras arcillosas.

Estas intercalaciones se desarrollan a lo largo de una potencia de entre unos 150 a 170 m. (IGME, s.f.)

A techo de la formación de Orthis, encontramos un nivel de 8 a 12 m de potencia de Calizas Urbanas, que sirven de separación entre la serie de Orthis y las Pizarras Castellar.

La principal característica de este bloque de Calizas, es que presentan igual características litológicas que las que le suceden en la serie, con una coloración rojiza que es provocada por su alto contenido en Hierro.

1.3.1.2. Silúrico

En el Silúrico se puede encontrar un paquete cuarcítico con una potencia importante, que empezaron a depositarse en el Ordovícico, continuando hasta el Silúrico. Una de las características particulares de estas cuarcitas es su color ya que poseen tonalidades rojizas, debida a la presencia de hierro en su composición. La potencia es variable entre 6 y 30 m.

Seguidamente, encontramos un nivel de pizarras pertenecientes al Llandovery, denominadas Pizarras de Graptolites, las cuales se encuentran descansando sobre las Cuarcitas Castellar.

Son pizarras que se encuentran transformadas en pizarra de quiastolita, debido a su metamorfismo térmico producido por intrusiones graníticas que ocurrieron en el Carbonífero.

La potencia que puede tener este bloque pizarroso, ronda alrededor de 150 m.

1.3.1.3. Devónico

La conexión del Devónico con el Silúrico es por contacto normal.

La litología perteneciente al Devónico está formada por materiales arcillosos que poseen una cierta composición pizarrosa con coloraciones que pueden variar entre verdosas a rojizas. Estos materiales arcillosos se encuentran alternando con capas cuarcíticas de poco espesor (2 – 3 cm) y areniscas con tonalidades rojizas y un cierto contenido micáceo en su composición. (IGME, s.f.)

Dentro de esta descripción, se encuentran también unos lentejones cuarcíticos masivos de color gris blanquecino que tiene un grano fino y están bastante recrystalizados, a veces con textura brechoide. (IGME, s.f.)

1.3.1.4. Carbonífero

La posición del lugar de investigación se localiza sobre materiales del Carbonífero (359-299 Millones de años) constituido como se ha indicado anteriormente por una alternancia de pizarras, metaareniscas, metagrawackas y semiesquistos que presentan un ligero metamorfismo regional, la alternancia es más o menos rítmica con predominio de la fracción pizarrosa. (IGME, s.f.). Véase Anexo 4.

La intrusión de los granitos ocurrió en este periodo durante las últimas etapas del movimiento orogénico Hercínico, observándose en superficie en los afloramientos del Stock de Santa Elena, y en el batolito de Linares. (IGME, s.f.), no estando presentes en la zona de trabajo.

El conocimiento de las litologías aflorantes, es de gran importancia para el posterior análisis de los datos geofísicos obtenidos en campo.

1.3.1.5. Triásico

Una vez depositados los materiales del Carbonífero y siguiendo el hilo de los movimientos orogénicos producidos en la zona, ocurre la emersión de los materiales Carboníferos con el depósito de los materiales Triásicos. (IGME, s.f.)

La base del Triásico se encuentra representada por conglomerados de cantos silíceos sueltos y con una matriz de arena y arcilla. A muro de estos materiales, a veces se produce una manifestación tardía de mineralizaciones de barita y galena. Sobre los conglomerados de base se desarrolla una alternancia de arcillas y areniscas.

1.3.1.6. Mioceno

Constituido por calizas, margas con intercalaciones de arenas y limos arcillosos, que se depositan sobre los sedimentos Triásicos y en ocasiones directamente sobre el zócalo Paleozoico (542 y 252 millones de años), en zonas donde el Triásico fue desmantelado.

La serie miocénica comienza con un conglomerado que posee tonos rojizos y cantos cuarcíticos. Este depósito es poco potente, con espesores entre los 6 – 7 m. Posteriormente, se depositan calizas (poco desarrolladas y ausentes en la mayoría de las zonas), margas, sedimentos de características más lutíticas formadas por subarcosas y arcosas, con un cemento silíceo ferruginoso. La potencia del Mioceno, oscila entre los 40 – 50 m hasta más de 100 m en el centro de la cuenca.

1.3.2. Orogenia Hercínica

1.3.2.1. Tectónica de plegamiento

En la Hoja de La Carolina, se aprecian tres grupos bien diferenciados de estructuras mesoscópicas, los cuales son:

- Primera generación de pliegues: volcados convergencia Norte, apretados, algunos de ellos asimétricos, sin predominio de ninguna rama y algunos concéntricos. Originando pliegues cercanos a la horizontalidad (ONO-ESE) y pizarrosidad longitudinal (paralela a la superficie de los pliegues). Algunos pliegues poseen dirección NO-SE. (IGME, s.f.).
- Segunda generación de pliegues: estos pliegues son más abiertos y con dirección NNE-SSO, más acusados. También se describen pliegues transversos. (IGME, s.f.).
- Movimientos tardíos: al contrario de los dos anteriores, se originaron pliegues en V. Estos no siguen una directriz propia, sino que corresponde a una adaptación a la segunda generación debido a ser movimientos de menor energía. (IGME, s.f.).

Los plegamientos principales se corresponden a la Orogenia Hercínica en su fase Astúrica, cuya energía logró afectar a todos los materiales de la región, borrando indicios de algún otro movimiento previo a este.

1.3.2.2. Tectónica de fracturación

Se manifiesta por una red de fallas longitudinales, normales y oblicuas (siendo estas las más abundantes).

Tanto las fallas longitudinales como las normales son difíciles de identificar en campo. Las oblicuas constituyen dos grupos de fallas conjugadas de direcciones NNE – SSO, NE – SO, ENE – OSO e incluso E – O.

Aunque la fracturación se produjo durante la Orogenia Hercínica, fueron reactivadas en la orogenia Alpina.

Es la tectónica de fracturación la que controla las mineralizaciones en el Distrito Minero.

1.3.2.3. Mineralizaciones

La intrusión de materiales graníticos, originaron un metamorfismo térmico a los materiales adyacentes, mientras que en procesos hidrotermales posteriores ocurre la precipitación de disoluciones enriquecidas en plomo y otros minerales que circulaban a favor de fallas y fracturas. (IGME, s.f.)

Según la bibliografía consultada, los fluidos mineralizantes que posteriormente formaron los filones de La Carolina, tuvieron lugar en el Tadihercínico. Estos filones tienen como menas: galena, esfalerita, sulfuros de hierro (pirita, calcopirita, marcasita y pirrotita), sulfuros de plata, sulfosales, sulfuros y óxidos de cobre. (Rojas Hita, Hidalgo Estévez, & Kohfahl, 2019).

Por otro lado, la ganga que acompaña a estas mineralizaciones suele ser ankerita, barita, calcita, cuarzo, sílice amorfa, caolinita y fluorita (esta última en menores cantidades). (Rojas Hita, Hidalgo Estévez, & Kohfahl, 2019).

1.4. Tipología de los Yacimientos

La estructura de las mineralizaciones que aparecen en la zona es de tipo filoniana. Estos filones se encuentran encajados en las rocas paleozoicas y en ocasiones están recubiertos por materiales depositados con posterioridad, sedimentos del triás, mioceno y cuaternario.

A lo largo de la historia, los minerales que se han extraído en el Distrito Linares – La Carolina han sido muy variados (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010). Ordenándolos de mayor a menor importancia en la región tendríamos:

- Pb: en forma de sulfuros y antimoniuros, presente en minerales como: la galena, cerusita, anglesita y boulangerita.
- Ag: al igual que los anteriores, son sulfuros y antimoniuros entre los que se pueden mencionar la polibasita, pirargirita, argentita y freibergita.
- Zn: esfalerita.
- Cu: al igual que el Pb y Ag, que predominantemente consisten en sulfuros; sin embargo, también se encuentran sulfoantimoniuros, óxidos y carbonatos presentes en forma de covellina, calcosina, digenita, tetraedrita, cuprita, tenorita, forma nativa, azurita y malaquita.
- Cu – Fe: son sulfuros dobles en forma de calcopirita, bornita y cubanita.
- Ni – Co: la forma en la que se presentan en las mineralizaciones es asociados a los minerales de Cu y Fe como sales mixtas con azufre, arsénico y antimonio, tales como: niquelina, bravoita, ullmanita, linneita y lollingita.
- Fe: también son sulfuros, sulfoarseniuros, hidróxidos o sulfatos de génesis descendente, entre los cuales se encuentran: pirita, marcasita, pirrotina, mispikel, lepidocrocita, goethita y jarosita.
- Sn – W: representados por casiterita, wolframita y estannina.
- Sb: estibina.
- Bi: como mineral nativo, bismutina, emplectita y cosalita.
- Minerales no metálicos: se encuentran carbonatos de Ca, Mg y Fe como las ankeritas; además, se presentan calcitas, microcuarzo, calcedonia, baritina y fluorita.

- En el distrito minero Linares – La Carolina, según Luis Arboledas en su labor de caracterizar la disposición de dichas mineralizaciones, hace la distinción de dos tipos de filones según su enriquecimiento: filones cupríferos y filones plomíferos. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).
- Por una parte, los filones con mayor concentración en Cobre presentándose en forma de Sulfuros de Cobre (Calcosina y Calcopirita), se debe a la composición química de los fluidos hidrotermales. Estos filones siguen fracturas con orientación NNE-SSO, NE-SO, ENE-OSO y E-O. Los minerales que acompañan a la mineralización como rocas que forman las gangas son cuarzos, calcitas y clorita.
- Estas concentraciones de Cobre, por afinidad química, suelen estar acompañadas de Cobalto y Níquel, especialmente en donde se ha dado lugar a formación de piritas. Por otra parte, en lugares donde se favoreció la formación de calcopiritas suele estar presente el Estaño.
- Los filones de mayor importancia son los formados por Sulfuros de Plomo (Galena) de los cuales se obtiene dicho metal. Suelen encontrarse al borde septentrional del batolito y algunos de estos filones mineralizados penetran en el borde del mismo en las pizarras Paleozoicas. Las orientaciones son NE-SO, ENE-OSO y E-O, y el material que suele acompañar a la mineralización son ankeritas. Suelen venir acompañados de Plata isomorfa en la estructura cristalina de la galena (galena argentífera), en poca concentración.

1.5. Minería.

1.5.1. Minería romana en la zona de estudio.

Dentro del Municipio de La Carolina se pueden encontrar numerosos vestigios que se encuentran relacionados con la actividad minera dedicada a la extracción de plomo, plata y cobre. Véase Anexo 5.

La actividad minea se remonta a tiempos prehistóricos, donde los trabajos se limitaban a la talla o pulimento de los metales encontrados. Posteriormente, los cartagineses siguieron con las extracciones hasta la llegada de los romanos, que realizaron una intensa actividad minera, descubriendo y explotando los grandes yacimientos de la región. Estos trabajos, con altibajos, tuvieron continuidad a lo largo de los siglos hasta llegar a fechas contemporáneas del siglo XX. (IGME, s.f.)

1.5.1.1. Prehistoria y minería romana

Para llegar a estas conclusiones, a lo largo del tiempo, se han realizado numerosas investigaciones y comprobaciones, como las plasmadas en sus trabajos de investigación por Luis Arboledas Martínez que, mediante el estudio de la documentación ya existente, observación en campo y la utilización de métodos analíticos precisos como el análisis de isótopos estables de plomo, han logrado obtener las siguientes apreciaciones:

- Prehistoria reciente: cronológicamente, va desde la Edad del Cobre a la edad del Bronce. Aunque ha sido problemática la interpretación de dichos hallazgos debido a la superposición de diferentes explotaciones mineras, la presencia de utensilios de diferentes épocas en una misma localización, han permitido diferenciar rasgos relevantes de cada período.

Los hallazgos encontrados en estas localidades y emplazamientos se han realizado en labores mineras de superficie como: trincheras, calicatas y pequeños pozos que alcanzaban una profundidad de 2,5 a 10 m de profundidad, de los cuales se obtenían minerales de cobre y plata.

Francisco Contreras, relata en el libro “La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir: Desde sus orígenes hasta nuestros días” las técnicas empleadas en la época para la prospección y explotación de los metales. La prospección era realizada de manera visual y una vez que era localizada la mineralización, se construía una plataforma alrededor de un canal de salida para que por medio de este se pudiese acceder al mineral y de una manera más eficiente eliminar la ganga que lo acompañaba.

Se realizaba un calentamiento y enfriamiento brusco para conseguir fragmentar la roca en pequeños bloques, también se ayudaban de utensilios como mazas de piedra y cuernas de ciervo a forma de cuñas. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).

En esta época, los mineros eran capaces de separar el plomo de la plata mediante el proceso de copelación a la que se sometía la galena argentífera. La copelación era una práctica empleada, que mediante la fusión, se podía determinar la riqueza en plata de la galena argentífera. Estos procesos pirometalúrgicos, debían ser realizados en recipientes cerámicos, que se han encontrado junto a restos de hornos, crisoles, moldes y toberas cerámicas, así como restos del proceso metalúrgico tales como escorias, material parcialmente reducido, etc.

Si bien Arboledas describe la extracción de oro, este metal no se presenta en la paragénesis de estos yacimientos. Él describe que se realizaba mediante el bateo de arenas auríferas de cauces. También se describe que podría extraerse el mineral desde la roca, pero este método no fue realmente empleado hasta en época de los romanos, que en este distrito era utilizado para la extracción de la galena.

En la Figura 1.6., se indican diferentes explotaciones de plomo, plata y cobre, entre las que destacan las labores de: Arroyo de Valquemado, Cerro de Los Venados, Valquemado, Aliseda, Fresnillo, Humilladero y Navallasno en la cuenca del Jándula; minas de Salas de Galiarda, El Polígono, José Palacios y El Castillo en el valle del Rumblar. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).

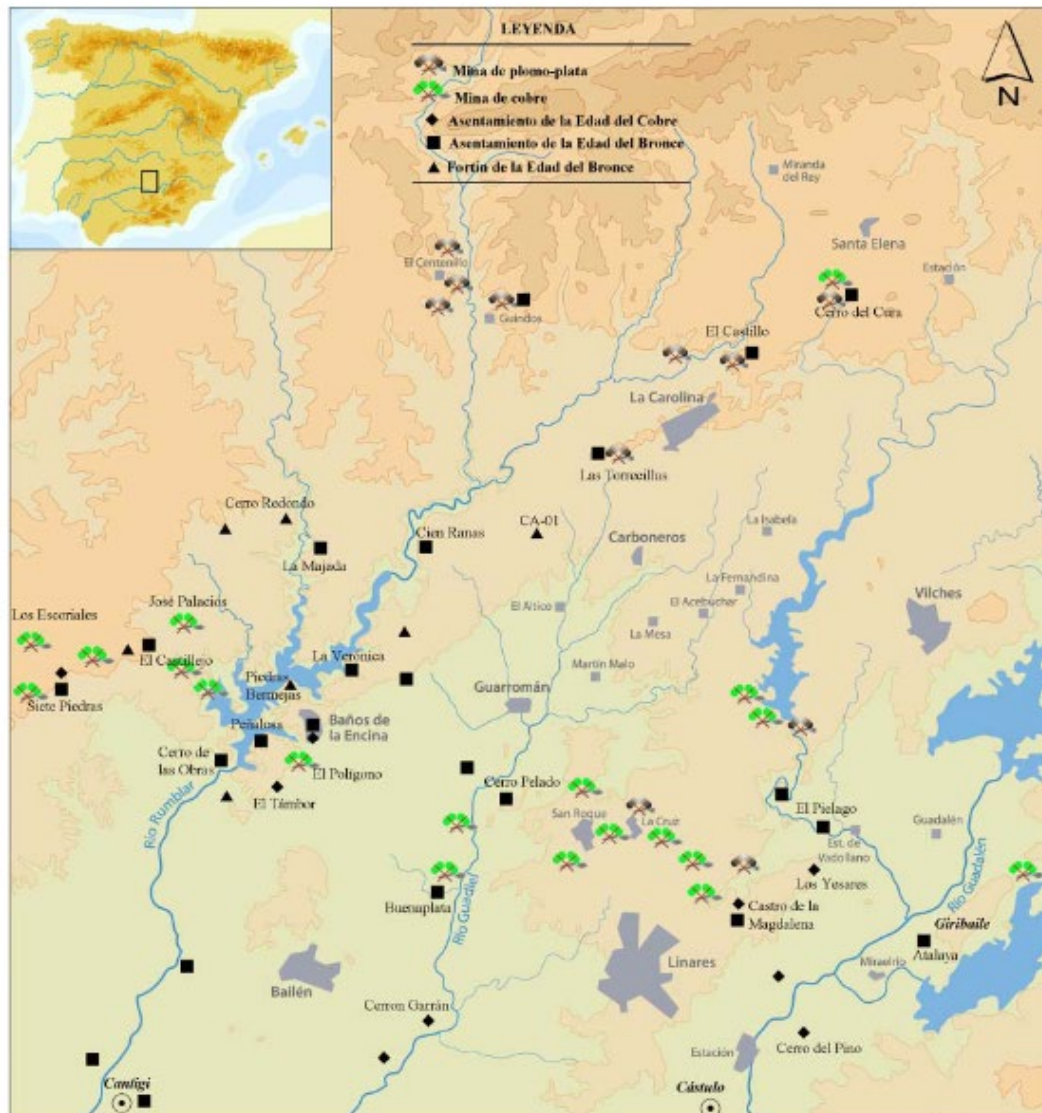


Figura. 1.6. Yacimientos de la Prehistoria reciente. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).

En esta figura se indican indicios mineros de las épocas:

- Minería Cartaginense: previamente a las actividades realizadas por los romanos, los Cartagineses en su necesidad de conseguir plata para financiar la lucha contra Roma por el control del Mediterráneo (II Guerra Púnica) intensificaron la explotación en el Sur de la Península.
- Minería Romana: La época en las que las explotaciones romanas tuvieron un mayor auge va comprendida entre finales del siglo II A.C hasta inicios del II D.C. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014). Ver Figura 1.7. Yacimientos romanos.

Vale la pena mencionar que son las mineralizaciones de Cobre, Plomo y Plata los principales metales objeto de la explotación, aunque se tiene constancia también de la extracción de minerales de Hierro, si bien estos eran considerados como desechos según se muestra en las escombreras estudiadas por Luis Arboleda (Figura 1.7.).

LEYENDA

- ◆ Poblado minero romano
- ▲ Fortín romano republicano-alto imperial
- Asentamiento rural / villa romana alto y bajo imperial
- † Necrópolis romana alto y bajo imperial
- Trazado de la vía romana Cástulo-Sisapo
- ⬢ Mina de plomo-plata
- ⬢ Mina de cobre
- ⬢ Fundición romana republicana-alto imperial
- ⬢ Poblado minero fortificado romano republicano-alto imperial

Figura. 1.7. Mapa de localización de yacimientos y minas romanas del distrito Linares – La Carolina. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).

Las técnicas que empleaban para la prospección eran sencillas, guiando sus labores en superficie por medio de la observación de colores característicos que presentaban los minerales como: azurita, malaquita, óxidos férricos y galena argentífera, además de la existencia o no de vegetación en la zona. Otra técnica consistía en guiarse por medio de varas de zahorí, asociado a las vetas mineralizadas con venas de agua.

Posterior a este reconocimiento, se realizaban calicatas o perforaciones para poder asegurar la existencia del mineral y comprobar la riqueza del mismo. Para poder obtener algunas aproximaciones de la potencia y dirección del filón, se excavaban pozos gemelos hasta encontrar el filón. (Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014).

Realizaban rigurosos análisis para la comprobación de las leyes minerales del todo uno que se pretendía explotar. Los minerales pertenecientes a los metales pasaban por un proceso de fundición para la verificación de su rentabilidad. En el Centenillo y en la fundición romana de Fuente Espí, se ha podido comprobar la existencia de copelas de piedra arenisca.(Arboledas Martínez, Contreras Cortés, & Moreno Onorato, 2014). Otro sistema de análisis era el de la piedra de toque, pudiendo determinar el contenido en Oro, Plata o Cobre frotando el mineral extraído con la piedra.

Los métodos de explotación empleados podían ser tanto a cielo abierto como subterráneos o bien, una mezcla entre ambos métodos. Para ello se ayudaban de las características geomorfológicas del yacimiento y su emplazamiento para decidir el tipo de método a emplear. Las características de los yacimientos facilitaron la obtención de los metales que pretendían obtener, ya que las concentraciones de plata y cobre suelen presentarse en las partes más superficiales de estos yacimientos filonianos.

Para la explotación a cielo abierto primero realizaban un seguimiento del mismo en toda su longitud realizando trincheras y rafas. Posteriormente se atacaba el yacimiento mediante labores subterráneas que consistían en la apertura de pozos y galerías de poca profundidad. Los pozos construidos por los romanos solían tener secciones rectangulares o cuadradas principalmente de uno a dos metros de lado, asimismo se han encontrado

pozos de sección circular con rampas o escaleras helicoidales y los ya mencionados pozos gemelos a pocos metros de distancia servían para la ventilación de la mina.

Los mayores problemas que se presentaban en las explotaciones subterráneas al profundizar en las mismas, eran debidos a la ventilación, drenaje e iluminación, ya que dichas explotaciones no serían rentables en su profundización, al tratarse de sistemas y técnicas con una considerable complejidad.

El arranque del mineral se realizaba con numerosas herramientas como podría ser el fuego y la cal, ayudados por herramientas de hierro, bronce, plomo y madera con las que se fabricaban palas, escaleras y recipientes, a la vez que se empleaban martillos de piedra con ranura central. El mineral extraído era llevado a superficie mediante poleas o tornos.

El emplazamiento de las fundiciones (*officinae*) romanas tenía su ubicación en talleres anejos donde el tratamiento del mineral consistía en una trituración previa, para después pasar al cribado, molienda y lavado para conseguir concentraciones del mineral. Estas primeras operaciones, según Arboledas, se realizaban a pie de mina para poder transportar el concentrado a las *officinae*. En la fundición se realizaban procesos de tostado, fusión y refino.

A continuación, se presentan las fundiciones romanas que tuvieron emplazamiento en el Distrito Minero de Linares – La Carolina. Tabla 1.1. Fundiciones romanas del Distrito Minero de Linares – La Carolina – Andújar.

Nº	Denominación	Elementos Metalúrgicos	Situación	Cronología	Minas próximas
1	Los Escoriales	Escorias de Cobre	Ladera	s. II a.C – I d.C	Los Escoriales
2	Salas de Galiarda	Escorias	Ladera	s. I y II a.C	Salas de Galiarda Pocicos del Diablo
3	Huerta del Gato	Escorias de Cobre	Valle del Arroyo Peregrina	s. I a.C – III d.C	Salas de Galiarda Pocicos del Diablo
4	Las Encebras	Escorias	Llano, valle de Las Encebras	Alto Medieval	Socavón de las Encebras

Tabla 1.1. Fundiciones romanas del Distrito Minero de Linares – La Carolina – Andújar.

1.5.2. Antiguas concesiones mineras de la zona de estudio. Mina de San Telmo.

1.5.2.1. Minería de Sierra Morena en Siglos XIX y XX

Las labores realizadas en los siglos XIX y XX provienen del conocimiento de explotaciones más antiguas de galena, fundamentalmente romanas. Hay que destacar que fue a partir de mediados del siglo XIX (época preindustrial), cuando las explotaciones ubicadas en Sierra Morena tuvieron un mayor auge, debido a varios hitos:

- 1) Instalación de las primeras bombas de vapor en la segunda mitad del siglo XIX que permitieron bombeos más efectivos, mecanización de pozos de extracción, etc.
- 2) Principio del siglo XX, con la llegada de:
 - a) La electricidad que vino a sustituir a las bombas de vapor, consiguiendo de nuevo mejores bombeos, sustitución de motores de extracción, etc.
 - b) Utilización del aire comprimido que permitió mejorar enormemente los rendimientos de perforación con martillos neumáticos.
 - c) La mejora de los explosivos, sustituyéndose la pólvora por explosivos gelatinosos (TNT), con mucha mayor capacidad

rompedora. Igualmente, los procesos de concentración mineral mediante procesos gravimétricos se vieron claramente mejorados con la llegada de la electricidad y la mecanización de las operaciones, procesos que vieron un avance muy significativo con la llegada de las técnicas de flotación en la década de los años 60 del siglo pasado.

Este auge de la minería en esta comarca, también se debe al agotamiento de plomo en las minas ubicadas en Almería, siendo las minas del distrito minero de Linares- La Carolina las que toman el relevo.

El gran crecimiento de la actividad minera en este distrito de Linares-La Carolina en el último tercio del siglo XIX y primer tercio del XX, lo llevó a ser el mayor productor de plomo. A partir de esa fecha, la actividad con más o menos altibajos, continuó hasta mediados de la década de los 70 del siglo XX cuando se produce la crisis mundial de los metales, con el cierre de todas las explotaciones a finales de los años 80 del siglo XX. (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, s.f.).

Es tanta la importancia que tuvo el Distrito Minero en la producción de plomo que fundiciones como la de “La Tortilla” ubicada en Linares, destacó como una de las más importantes en la producción de plomo a nivel mundial. Ver Figura 1.9



Figura. 1.8. Apeadero de El Centenillo en el ferrocarril de Linares a La Carolina, con la estación del cable. (García Sánchez-Berbel, 1993).



Figura. 1.9. Fundición La Tortilla de Linares en el siglo XX. (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, s.f.)

1.5.2.1. Las Torrecillas

Centrándonos en la zona de estudio, tenemos que destacar la presencia de la mina de Las Torrecillas.

Según Francisco Gutiérrez Guzmán, en su libro *Minería en Sierra Morena*, proporciona la siguiente caracterización del criadero explotado: “El criadero está constituido por una mineralización tardía diseminada a muro del triásico, en dos capas paralelas, formando un yacimiento estratiforme (strata bound) con una extensión superior a 1 km². La capa superior, de caliza dolomítica, presenta varias grietas y cavidades impregnadas de galena de gran dureza, se sitúa debajo de la tierra vegetal, aflorando en grandes extensiones. Esta se separa por unos bancos de arenisca y arcilla de la capa inferior, que estaba constituida por una arcilla ferruginosa deleznable con nódulos de galena hojosa de menor dureza.”. (Gutiérrez Guzmán, 2007).

Esta mina de origen romano fue explotada por minería subterránea mediante el método de cámaras y pilares, utilizado también en el siglo XIX y XX. En este sistema, se dejaban unos pilares más o menos gruesos distribuidos de forma irregular que servían de soporte. La capa mineralizada se iba excavando conformando las cámaras (Ver figura 1.10.).

Cabe destacar, la importancia desde el punto de vista arqueológico de esta mina, al ser la única que emplea este sistema de explotación en el distrito, lo que la hace muy interesante para su puesta en valor como mina visitable.

Actualmente, hay en vigor un permiso de investigación en la zona para evaluar las posibilidades mineras para explotación de barita asociado a este yacimiento tipo strata bound.



Figura. 1.10. Vista de una cámara y pilares de la Mina Las Torrecillas.

1.5.2.2. San Telmo

Es importante destacar que la mineralización que se explotaba en Las Torrecillas era muy poco profunda, de apenas unos 100 m (Gutiérrez Guzmán, 2007), caso contrario a la gran cantidad de filones explotados en el distrito, en los que se alcanzan una profundidad considerable.

A pesar de tener una historia que se puede remontar a tiempos de los romanos, como se mencionaba en acápite anteriores, la Concesión de San Telmo en tiempos modernos no representaba una fuerza económica importante en la zona; sin embargo, se puede concluir que ha sido una localización altamente ocupada y explotada. Se tiene constancia de, por lo menos, 37 concesiones mineras no coincidentes en el tiempo (Gutiérrez Guzmán, 2007).

Como interés particular, a efectos de análisis, se hará énfasis en la antigua mina de San Telmo, que es la explotación es la que se encuentra más próxima a la localización de estudio, y la más importante de las explotaciones aledañas a este paraje.

Las coordenadas de dicha mina son la siguientes:

- LONGITUD: 3°38'5,69"
- LATITUD: 38°15'37,43"
- X UTM: 444.453
- Y UTM: 4.234.898



Figura. 1.11. Mina San Telmo. (Eiffel Lab, 2013).

Su delimitación se encuentra entre las siguientes coordenadas, según el Histórico del BOJA, boletín 90 de 07/05/2008:

1. 444.589, 4.235.136
2. 444.641, 4.253.083
3. 444.574, 4.234.991
4. 444.522, 4.235.080

Las parcelas ocupadas por dicho emplazamiento son:

- Polígono 27, parcela 5
- Polígono 28, parcelas 50 a, 50 c y 9003

En el recinto se encuentra un pozo junto a un número de construcciones que fueron edificadas en pizarra y reforzada con ladrillos. Estas construcciones que se encuentran a día de hoy en pie, constan de una casa de máquinas de extracción, una chimenea y una caldera. (Junta de Andalucía, 2008).



Figura. 1.12. Planta de Mina San Telmo. Obtenido de Google Maps <https://maps.app.goo.gl/UQsrups3GHFFXeRr5>.

Al igual que el resto de minas de la zona, tuvieron gran influencia desde tiempos de los romanos, como ya se ha expuesto en líneas anteriores, comprobado por numerosos indicios y construcciones pertenecientes a esta época.

Pero se debe tomar en cuenta, que al igual que con el caso de Las Torrecillas, su gran apogeo fue en el siglo XIX y XX.

A continuación, se presenta la Tabla 1.2. de las concesiones mineras otorgadas en el paraje de Las Torrecillas correspondiente al período de mayor actividad.

MINAS DE LA REAL COMPAÑÍA ASTURIANA EN LA TORRECILLA

MINA	Fecha registro	Registrador	Situación	Tiempo trabajado
SAN RAFAEL *	26/10/1867	Andrés de Moya	Cerro de las Tortas	1867-1876
CÉSAR	06/04/1870	Gumersindo Palomo	Cerro de las Tortas	1870-1892
NOCHEBUENA	15/08/1872	Ángel Romero	La Torrecilla	1877-1904
SAN TELMO	15/06/1876	Adrián Vizcaíno	Cerro de las Tortas	1875-1904
MARÍA*	13/06/1876	Juan Colomer	La Torrecilla	1876-1888
LAS DELICIAS	09/02/1877	Enrique A. Haselden	Cerro de las Tortas	1877-1892
LA CAPA	14/03/1877	Enrique A. Haselden	La Torrecilla	1877-1892
LA DESPEDIDA	19/03/1877	Enrique A. Haselden	Arroyo del Socorro	1877-1892
LA DUDOSA	19/03/1877	Enrique A. Haselden	Cerro de las Tortas	1877-1896
LA BONDADOSA	04/04/1877	Real C. Asturiana	La Torrecilla	1877-1894
LA VISITA	27/12/1887	Real C. Asturiana	Cerro de las Tortas	1887-1892
TORRECILLA	13/11/1889	Real C. Asturiana	La Torrecilla	1889-1892
LUCRECIA	20/03/1900	Real C. Asturiana	Cerro de las Tortas	1900-1904
NAVIDAD	31/03/1900	Real C. Asturiana	Cerro de las Tortas	1900-1904

Tabla 1.2. Concesiones mineras (Gutiérrez Guzmán, 2007).

La Mina San Telmo llegó a producir en 1884, bajo la concesión minera otorgada a Enrique A. Haselden, unas 632,8 toneladas de galena y en el año 1885 una producción de 161,7 toneladas. (Gutiérrez Guzmán, 2007).

Posterior a la tutela de Haselden, adquiere la concesión minera la Real Compañía Asturiana (Gutiérrez Guzmán, 2007). Sin embargo, en este período resulta muy difícil dilucidar la cantidad de tonelaje que la mina llegó a producir, debido a que la Compañía poseía numerosas concesiones mineras en el paraje y, los datos que se tienen de la época, apuntan a que el tonelaje total era una suma de las múltiples concesiones que ostentaba.

Desde el año 1903, el grupo San Telmo no figura más en los informes de Estadística Minera, así como en las listas de producción, por lo que se presume que no tuvieron mayor actividad después de la fecha citada.

La Mina San Telmo tuvo una reapertura a mediados del siglo XX, entre 1951 y 1952, fechas en las que el precio del mineral estaba considerablemente alto y podía aprovecharse el que aún quedaba en la zona, algunas de estas toneladas fueron obtenidas de las propias escombreras. Extraoficialmente, se conoce que el cese de actividades en la mina se dio en 1956, información obtenida por estudio documental. (Gutiérrez Guzmán, 2007).

1.5.3. Descripción del sistema de explotación utilizado en el distrito. Época industrial.

Teniendo en cuenta una serie de parámetros básicos del yacimiento como son: geometría, distribución de leyes y las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, tanto a techo y a muro de la roca de caja, así como del propio mineral, se elegía el sistema de explotación adecuado para el mismo.

En la época moderna, los avances en el campo de la minería que se produjeron en la revolución industrial, fueron claves para conseguir altas producciones de mineral ayudándose de técnicas y maquinaria novedosa con el empleo del vapor (último tercio del siglo XIX y primer tercio del XX).

Un avance notorio para conseguir la explotación del yacimiento, fue la introducción de explosivos tales como la pólvora, la dinamita y gelatina en adecuado gramaje que, junto con la utilización de martillos neumáticos, permitió mayores avances en la perforación y en la producción, impensables con las antiguas técnicas manuales extremadamente laboriosas y precarias.

La localización de nuevos filones enriquecidos en plomo tuvo lugar en muy pocas minas, ya que en la mayoría de los casos se continuó explotando aquellos yacimientos que ya habían sido reconocidos y explotados con anterioridad desde la edad antigua (como se relató en epígrafes anteriores). Sin embargo, las investigaciones que se realizaban eran mucho más exhaustivas para determinar la posición del filón, mediante un reconocimiento longitudinal. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).

Para este reconocimiento, se realizaban labores mineras pequeñas como socavones, pocillos, calicatas y rafas; pudiendo determinar las dimensiones de los filones que podían llegar desde los centenares de metros hasta varios kilómetros.

Las labores mineras en los siglos XIX y XX se comenzaban con la apertura de un pozo maestro que, según Contreras Cortés, tenía unas dimensiones de 3 a 3,50 m de largo y de 2 a 2,5 m de ancho. Una vez excavado el pozo maestro se acondicionaba para la circulación del personal que trabajaba en la mina y para la salida de los materiales provenientes de esta, dividiéndolo en dos áreas, una de trabajo que albergaba dos jaulas

deslizadas por guiadera y otra de servicio en las que se encontraban las tuberías, como se muestra en la Figura 1.13.

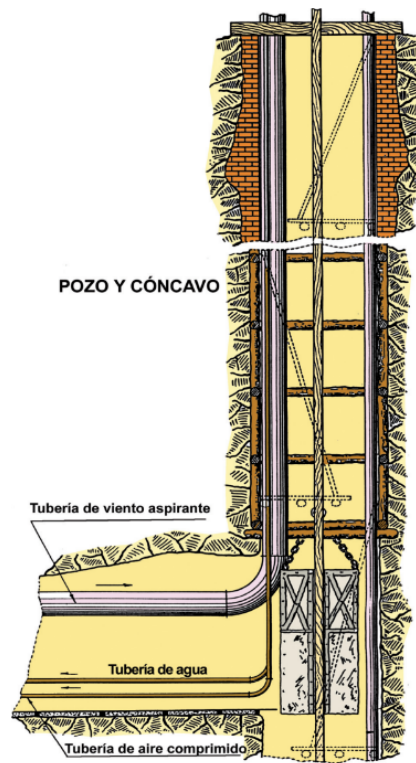


Figura. 1.13. Vista de un Pozo Maestro. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).

1.5.3.1. Método de cámara almacén

Este método es apropiado en aquellos yacimientos de forma filoniana y con hastiales lo suficientemente resistentes como para permitir la caída del mineral por gravedad. Se caracteriza porque el sostenimiento de los hastiales se realiza con el mismo mineral que es almacenado en la cámara, sacando únicamente un 40% del material arrancado (índice de esponjamiento) con la intención de dejar suficiente espacio para continuar con el ciclo productivo.

Una vez realizadas las labores de apertura del pozo maestro, se perforaban una serie de galerías a diferentes niveles para el reconocimiento del filón. La separación entre ellas no tenía una métrica definida, ya que podía variar entre los 20 y 30 m, las galerías en cada una de estas explotaciones se adaptaba a las condiciones de cada yacimiento.

En cuanto a la sección de las galerías se debían mantener reducidas, pero siempre adaptada a las operaciones que se tenían que realizar que, en épocas industriales, con la utilización de maquinaria neumática llegaron a alcanzar los 2 a 2,5 m de alto y de 2,5 a 3,5 m de ancho.

Estas labores de apertura de pozos y galerías podrían considerarse como labores preparatorias antes de comenzar con la explotación, como se muestra en la Figura 1.14.

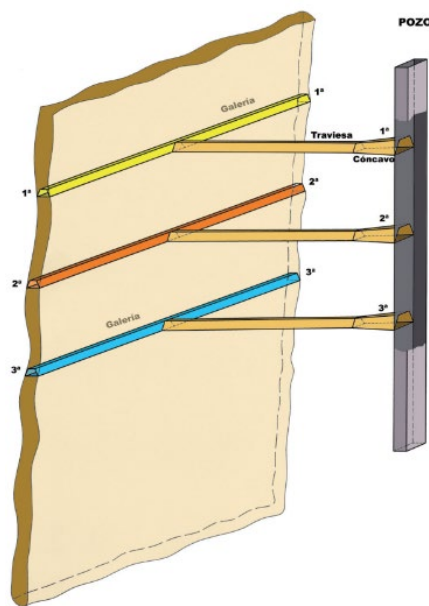


Figura. 1.14. Labores preparatorias a la explotación. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).

El macizo era explotado en su totalidad por realce y rebaje, limitado el bloque de explotación lateralmente a cada lado por chimeneas o calderillas verticales. Según describe:

“... Por la apertura de las calderillas que parten de las galerías generales, quedan aislados una serie de macizos de mineral que se procede a explotar, ya sean en labor de realce o en labor de rebaje. En la extracción por realce, se empezaba por la parte inferior del macizo, donde el minero va arrancando el mineral, formando una serie de escalones invertidos hasta la parte superior, echando tras de sí las tierras; que son recogidas y llevadas a los anchurones de los pozos, de donde son sacadas a la superficie. En la explotación por rebaje el minero va arrancando el mineral de arriba hacia abajo formando una serie de escalones derechos...”. (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010). Ver figuras 1.15. y 1.16.

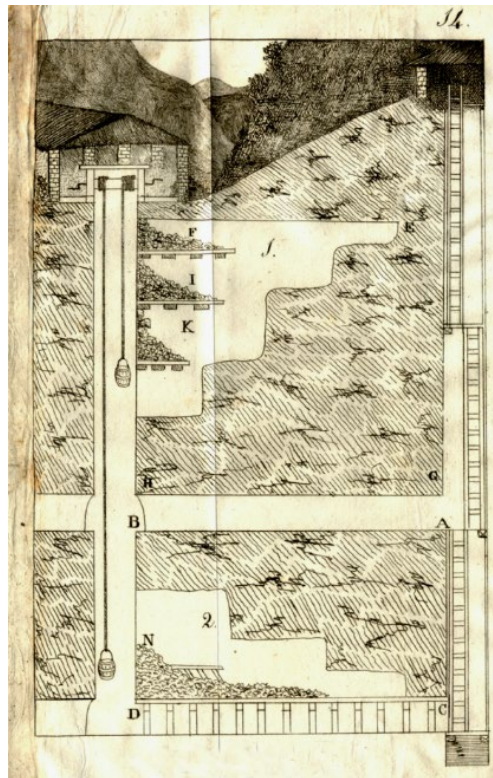


Figura. 1.15. Labores mineras a realce (macizo inferior) y rebaje (macizo superior). (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010)

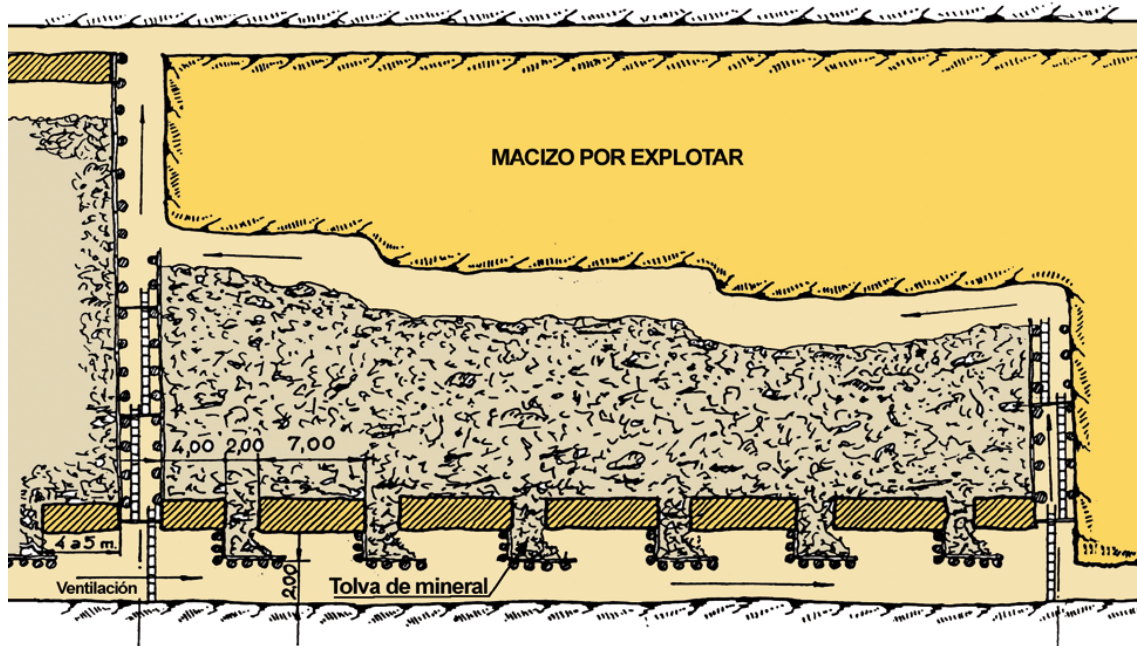


Figura. 1.16. Explotación de un realce por el sistema de macizos (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).

1.5.3.2. Método de corte y relleno de la minería filoniana

Este método de explotación era empleado comúnmente en las minas situadas en La Carolina. Consiste en un arranque de mineral en forma de rebanadas horizontales, similar al método de cámaras almacén, con la diferencia de que en este método se evacúa el mineral explotado y el hueco resultante se rellena con estériles procedentes de operaciones de excavación de pozos y avances de galerías (Figura 1.17).

El ciclo consiste en perforación, voladura, carga y relleno, sirviendo este último como método de sostenimiento de los hastiales de la cámara y como piso de trabajo para las operaciones de explotación por realce.

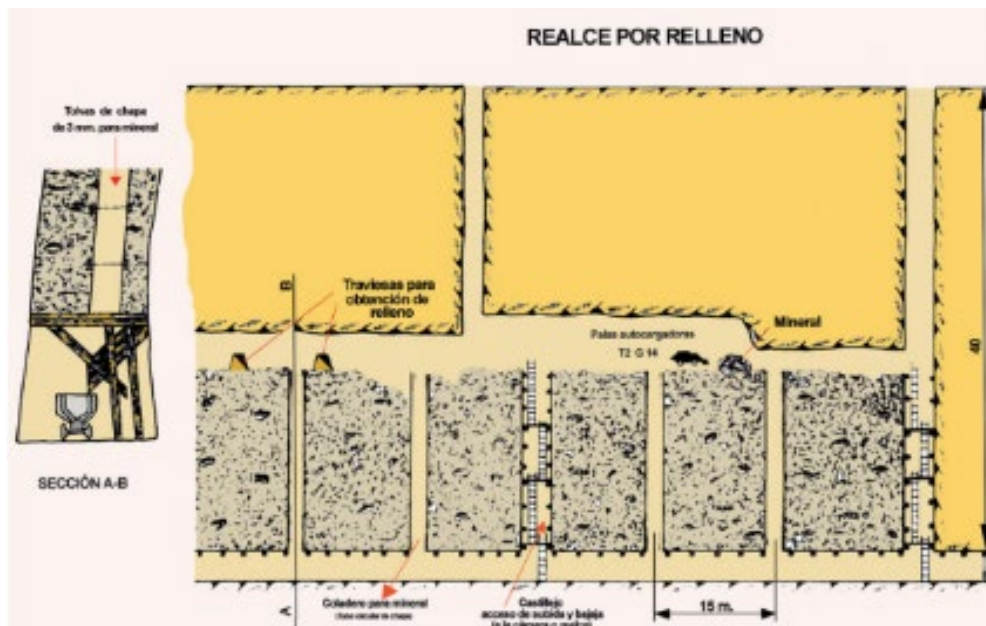


Figura. 1.17. Explotación de un realce por relleno (Contreras Cortés & Dueñas Molina, 2010).

Una vez realizada la perforación y la voladura, el todo uno explotado era evacuado por medio de coladeros que terminaban en unas tolvas, que posteriormente se cargaba en vagones.

1.5.3.3. Método de cámaras y pilares de las Torrecillas

A diferencia del anterior, el método de cámaras y pilares es apropiado cuando la mineralización se presenta horizontal o ligeramente buzante. Se caracteriza por un arranque parcial del mineral, dejando columnas (pilares) que sirven como sostenimiento del techo, evitando así el colapso de la cámara.

Fue posible su implementación en la zona por la resistencia del techo y del mineral; así como por el tipo de yacimiento en Las Torrecillas (strata bound) y la pendiente que tomaba la capa (horizontal o con ligero buzamiento).

1.6. Estudios geofísicos realizados en la zona.

Entre el material bibliográfico consultado se han encontrado diferentes artículos y estudios de investigación para la caracterización de esta zona en concreto o en el distrito minero de Linares-La Carolina. A continuación, se mencionan los principales antecedentes encontrados:

Martínez, J.; Mendoza, R.; Rey, J.; Sandoval, S.; Hidalgo, M.C. (2021) en un artículo publicado en *Minerals* bajo el nombre *Characterization of Tailings Dams by Electrical Geophysical Methods (ERT, IP): Federico Mine (La Carolina, Southeastern Spain)*. Con la utilización de los métodos de Tomografía Eléctrica (ERT) y Polarización Inducida (IP), analizan la efectividad de estos métodos para realizar una caracterización de los residuos mineros en cuestión. Con el método de Tomografía Eléctrica, se generaron un total de seis perfiles utilizando la configuración Wenner – Schlumberger, para obtener información de las características internas de los depósitos, definición de la geometría y disposición de la misma, al igual que las afecciones que pueden producirse en el entorno.

Rey, J; Martínez, J; Dueñas, J; Campos, D; Arias, F; Benavente, J (2010) en un artículo publicado en *Geogaceta* con el título *La tomografía eléctrica aplicada a la investigación del yacimiento arqueológico de Cástulo (Linares, Jaén). Resultados preliminares*. Con el empleo de Tomografía Eléctrica en un total de cinco perfiles con las configuraciones: Wenner, Wenner – Schlumberger y Dipolo – Dipolo, realizados en dos sectores de trabajo, con el objetivo de detectar restos de estructuras enterradas en esta ciudad Ibero - Romana. Obteniendo los mejores resultados en los primeros niveles de investigación con la configuración Dipolo – Dipolo.

Martínez, J; Rey, J; Hidalgo, M.C. ; Benavente, J (2012) en el artículo *Characterizing Abandoned Mining Dams by Geophysical (ERI) and Geochemical Methods: The Linares-La Carolina District (Southern Spain)* realizando un total de seis perfiles de resistividad con el uso de Tomografía Eléctrica (ERI) se pudo caracterizar e identificar la disposición, fracturas y el contacto entre los residuos mineros y el sustrato en los depósitos de “La Cañada”, “La Aquisgrana” y “La Cruz”, con ello se plantean soluciones para el control geoquímico de los residuos como fuente potencial en la contaminación tanto del suelo como del agua.

Martínez, J; Rey, J; Hidalgo M.C; Garrido, J; Rojas, D (2014) en su artículo *Influence of measurement conditions on the resolution of electrical resistivity imaging: The example of abandoned mining dams in the La Carolina District (Southern Spain)* ejecutaron, con la configuración Wenner – Schlumberger una campaña de Tomografía Eléctrica para la determinación de la estructura interna de los depósitos, contactos, variaciones y distribución de los materiales que lo componen, concluyendo que no hay medidas previas de adecuación e impermeabilización del área en la que se ubicaron estos depósitos de estériles, teniendo un riesgo de contaminación de suelos y aguas en los alrededores de la zona.

Galdón, J.M; Rey, J; Martínez, J; Hidalgo, M.C. (2017) con el título *Application of geophysical prospecting techniques to evaluate geological-mining heritage: The Sinapismo mine (La Carolina, Southern Spain)*. Se aborda, con la utilización de Tomografía Eléctrica (ERI) y GPR, la identificación y caracterización de las estructuras del macizo rocoso en el que se encuentra ubicado el socavón de “La Paloma”. Con el objetivo de poner en valor las antiguas explotaciones mineras de la zona como un recurso turístico y evaluar, a partir de esta información, la seguridad del acceso a este túnel.

González Díaz, G. M. (2023), Trabajo Fin de Grado en el que realiza un estudio integral de la presa de residuos mineros de “La Aquisgrana”, distrito minero de La Carolina (Jaén) en el que se realizó una comparación entre diferentes técnicas geofísicas, eléctricas y electromagnéticas, y un sondeo mecánico, con el objetivo de caracterizar los materiales depositados en la presa y obtener información entre el contacto que existe entre estos y el sustrato.

2. CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Técnicas geofísicas utilizadas en arqueología

En arqueología, es muy común el uso de diversas técnicas geofísicas para la investigación de estructuras enterradas, que son usadas de forma independiente o combinadas.

La importancia que tienen las técnicas geofísicas es significativa, ya que no sólo ayudan a la identificación de las estructuras enterradas, sino que también identifica las áreas más prometedoras, permitiendo optimizar los recursos disponibles para la investigación. Los datos preliminares obtenidos sobre la ubicación y extensión serán la base de partida para los trabajos de excavación posteriores.

Entre las técnicas geofísicas más comunes, se encuentran:

- Georradar (GPR): es la técnica más utilizada, emite ondas electromagnéticas midiendo las variaciones de las mismas en el subsuelo.
- Magnetometría: utilizada para detectar las variaciones en el campo magnético terrestre ocasionadas por estructuras enterradas.
- Tomografía eléctrica: mide la diferencia de resistividades en el terreno.
- Sonar de suelo acústico (GSSA): emite ondas acústicas para la detección de estructuras arqueológicas.
- Termografía infrarroja: detecta variaciones en la temperatura del suelo, especialmente donde se encuentran restos de construcciones.

2.1.1. Técnicas electromagnéticas. Georradar (GPR)

El Georradar, también llamado radar de penetración de suelos o sus siglas GPR (Ground Penetrating Radar) es el equipo más utilizado en arqueología y en otros campos como el de la ingeniería civil para la detección de estructuras que yacen en el subsuelo. Este aparato, descrito por Franck Audemard, basa su funcionamiento en las teorías de electromagnetismo de alta resolución que permite la obtención de imágenes del terreno a poca profundidad. (Audemard, Ollarves, & Díaz, 2006).

Las imágenes “radargramas” captadas, son generadas por medio de la reflexión que se produce en las ondas electromagnéticas emitidas debido a los cambios de las propiedades dieléctricas de los materiales.

2.1.1.1. Fundamentos y descripción del método

Según Martínez Sala, las ondas electromagnéticas propagadas por este aparato se miden desde los 10 MHz hasta los 2,5 GHz. (Martínez Sala, Mené Aparicio, & Rodríguez Abad, 2017).

Su funcionamiento, se debe básicamente a las diferencias de las propiedades físicas que poseen los materiales, concretamente se intenta medir la impedancia de los mismos. La propagación de estos impulsos electromagnéticos es de corta duración, situándose entre 1 y 20 ns.

La antena emisora transmite estos impulsos al terreno, al encontrarse con diversas estructuras con una impedancia determinada reflejan las ondas con tiempos de retardo diferentes, obteniendo de esta manera distintas interfaces que se recogerán por la antena receptora y que posteriormente serán registradas en una traza. (Martín Gutiérrez & Dorta Martín, 2006).

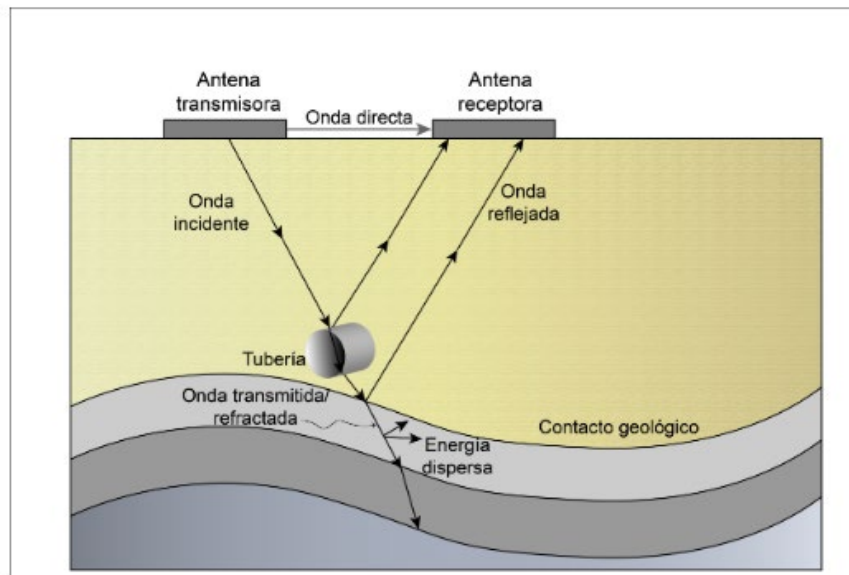


Figura. 2.1. Esquema del funcionamiento de un georradar.

Como se ha comentado, el conjunto de trazas obtenidas a lo largo del registro realizado por el aparato se le conoce como radargrama, que al asignarle escalas de colores según las respuestas captadas se obtendrán las amplitudes de energía recibida.

Las partes del equipo son:

- Unidad central: parte fundamental que controla los tiempos de envío de las señales electromagnéticas.
- Antenas: traductores electromagnéticos que transforman las señales eléctricas (baterías de litio) en ondas electromagnéticas de corta duración. También son las encargadas de captar la energía reflejada y enviarla a la unidad central.

Antes de trabajar con estos equipos, es importante tener en cuenta unas consideraciones previas para asegurarse de tener el equipo adecuado y que este cumplirá con los objetivos de la investigación.

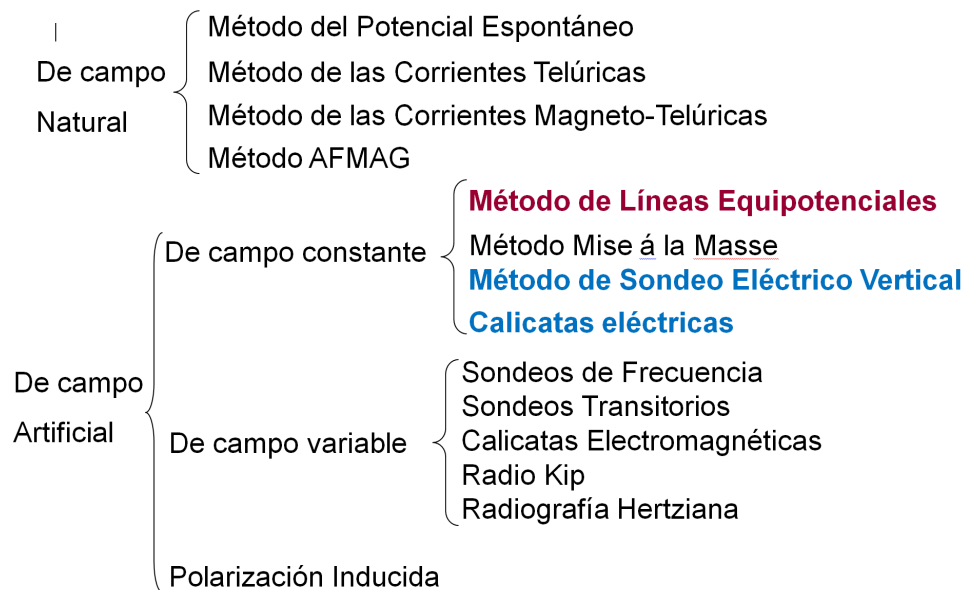
La primera consideración es determinar el objetivo que se quiere estudiar (naturaleza, tamaño, profundidad...) y la segunda y la más importante es la selección de la antena de trabajo, ya que según la frecuencia elegida se podrá tener una mejor o peor resolución, o simplemente no alcanzar el objetivo. En resumidas cuentas, cuanto mayor sea la profundidad objetivo, menor resolución se obtendrá.

Frecuencia (MHz)	Resolución	Profundidad (m)	Tipo de investigación
100	Media a baja	15-20	Campañas geológicas y geotécnicas
250	Intermedia	6-8	Detección de elementos enterrados
500	Media a alta	5-6	Detección de elementos enterrados, arqueología, vías
800	Alta	1-2	Campañas a detalle

Tabla 2.1. Tipos de antenas en relación con la frecuencia, resolución y profundidad. (Guía para el uso del equipo Georadar, s.f.).

2.2. Técnicas eléctricas

Los métodos de prospección geofísica eléctricos nos permiten determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo mediante medidas normalmente realizadas en la superficie, concretamente: a partir de la resistividad aparente medida se estima la resistividad real del subsuelo. Entre las más comunes se encuentran:



En este estudio se utilizarán técnicas de campo artificial de campo constante, concretamente fundamentados en los métodos de resistividad de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y las Calicatas Eléctricas (CE), que han evolucionado al método de la Tomografía Eléctrica.

- Sondeo eléctrico vertical (SEV): Se denomina **Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)** a las determinaciones de resistividad aparente efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre electrodos. Es un método adecuado para detectar cambios de resistividad en la vertical de un punto.
- Calicatas eléctricas: Las **Calicatas Eléctricas (CE)** estudian variaciones laterales de resistividad del suelo. Es un método adecuado para detectar contactos verticales o inclinados.

2.2.1. Fundamento del método de resistividades

En la Figura 2.2, se representa un dispositivo Wenner-Schlumberger dispuesto sobre el terreno:

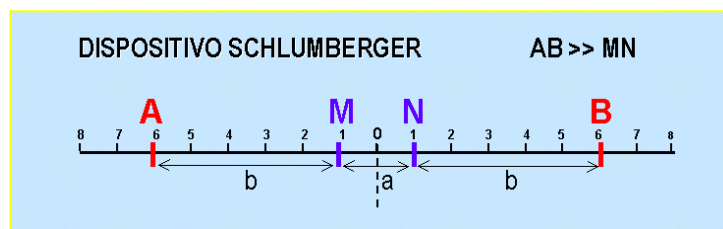
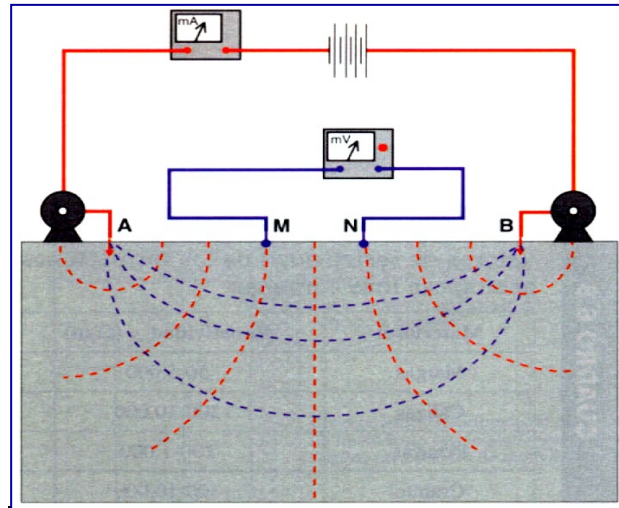


Figura. 2.2. Configuración electródica del dispositivo Wenner – Schlumberger.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

$$K = \pi \cdot \frac{AMAN}{MN}$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente

K = Constante geométrica del dispositivo.

V = Potencial de corriente

I = Intensidad de corriente

A-B = Electrodos de corriente

M-N = Electrodos de potencial

mV = milivoltímetro

mA = miliamperímetro

- 1º) Introducimos en el terreno corriente de intensidad I por los electrodos A y B.
- 2º) Medimos la diferencia de potencial entre los electrodos M y N.
- 3º) Calculamos la resistividad aparente de la capa de terreno afectada por el paso de la corriente.

2.3. Tomografía Eléctrica (ERT)

La tomografía eléctrica es un método de **resistividades multielectrónico** no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico.

Se basa en la modelización 2-D y 3-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas).

2.3.1. Fundamento Tomografía Eléctrica

Recapitulando lo expuesto en líneas anteriores, el método de Tomografía Eléctrica basa su funcionamiento y análisis a partir de otras técnicas de resistividades como son los SEV y CE. Presenta la gran ventaja de la capacidad de medición y procesamiento de una gran cantidad de información, gracias al desarrollo y mejora de la electrónica e informática, con el avance y desarrollo de nuevos ordenadores y softwares específicos, de los últimos años.

En este caso, se utiliza un gran número de electrodos que se conectan a un cable multi-núcleo y, mediante un resistivímetro y un conector electrónico, se hace posible la selección y recopilación automática de las medidas a través los electrodos dispuestos sobre en el terreno, según la configuración previamente elegida.

Los sistemas automáticos de adquisición de datos (resistivímetros multielectrónicos) (Griffiths et al. 1990), son capaces tomar muchos datos en 2D y 3D,

que posteriormente son tratados con el software apropiado (desarrollado por Geotomo, Loke and Barker), lo que han dado un gran impulso en la aplicación del método geoelectrico de resistividades para la resolución de modelos geológicos complejos.

2.3.2. Resistividad

Esta magnitud, denotada con la letra ρ , depende íntimamente de la naturaleza del material, proporcionando información acerca del mismo, pudiendo ser un material conductor o no conductor. (Cañizal, Fernández, & Miranda, s.f.).

La resistividad es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica de los materiales y se expresa en ohmios metro ($\Omega \cdot m$). La resistividad medida estará influenciada por la existencia de agua que ocupa el espacio entre los poros de la roca o el suelo, y por el grado de salinidad de la misma, dándose la relación de: a más salinidad, mayor conductividad. (Cañizal, Fernández, & Miranda, s.f.).

Los minerales metálicos en general presentan alta conductividad y baja resistividad, tales como: Calcopirita, Pirita, Magnetita, Galena, Pirrotina, otros.

2.3.3. Resistividad aparente

Representa la variable experimental de los resultados obtenidos de campo, a partir de la cual, mediante una inversión de los datos, se estimará el valor real de la resistividad.

La resistividad medida, no se corresponde con el valor de la resistividad real del terreno, debido a que el subsuelo se encuentra formado por distintos materiales y el campo eléctrico creado afectará a todas las litologías que se encuentren en el mismo; por lo que el valor obtenido será una media de los valores de cada una de las capas atravesadas.

Además, como se ha comentado anteriormente la resistividad medida puede variar según las condiciones del terreno (Serrano Ontiveros, 2003):

- Grado de saturación del terreno
- Temperatura
- Porosidad
- Salinidad de los fluidos
- Presencia de materiales arcillosos
- Tipo de roca

La resistividad es característica de cada material como se aprecia en la siguiente figura expresada en Ohmio x metro, (Orellana, 1982):

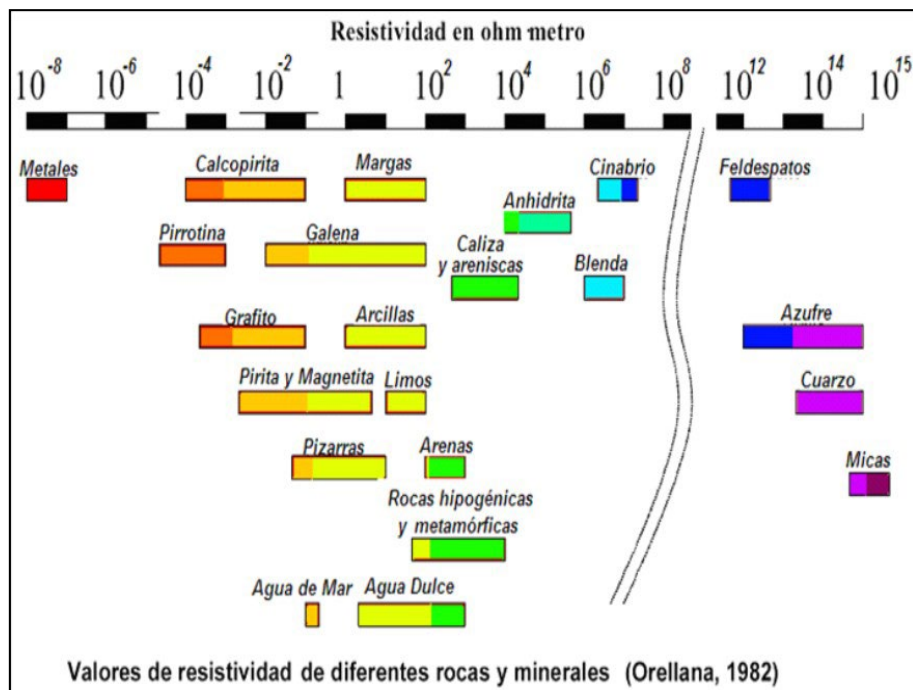


Tabla 2.2. Rangos típicos de resistividades para rocas y suelos.

2.3.4. Resistividad real

Para que los valores de resistividad aparente y real coincidan, el terreno debe ser homogéneo e isótropo. En este caso, si sobre el terreno disponemos un solo electrodo y el otro lo situamos en el infinito (muy distante), las líneas de corriente fluyen de forma radial y las potenciales asociadas se distribuyen de forma concéntrica al punto de carga (Figura 2.3.), siendo el valor de la resistividad medida coincidente con la real.

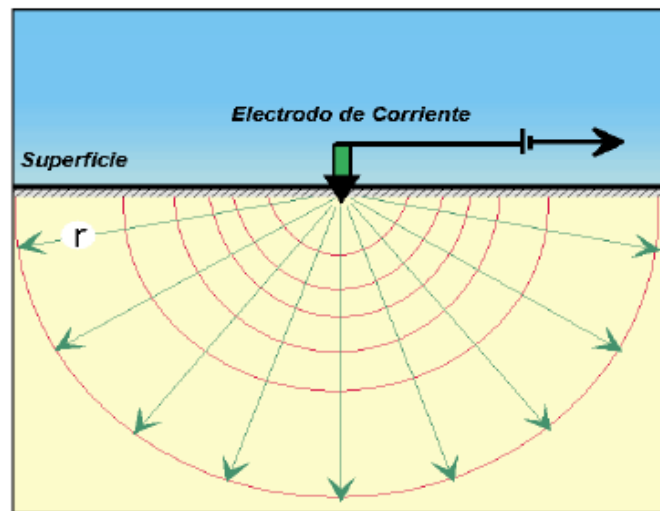


Figura. 2.3. Paso de la corriente y potenciales asociadas en un medio homogéneo.

2.3.5. Configuraciones electrónicas

Se describirán brevemente las configuraciones más utilizadas; sin embargo, cabe aclarar que la elección de una configuración u otra estará relacionada con el tipo de estructura que se pretende analizar, al igual que la profundidad proyectada.

2.3.5.1. Wenner

Esta configuración es una de las más utilizadas para los métodos de resistividades. Las separaciones de los electrodos son iguales entre sí (Ver figura 2.4.) y esta separación aumentará escalonadamente alejando cada uno de los cuatro electrodos con respecto a su centro y, en cada una de estas separaciones, se irá tomando una lectura. (Parasnis, 1971).

La resistividad aparente para esta configuración, viene dada por:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Donde el valor de 'a' es equivalente a la separación uniforme de los electrodos.

Para dicha configuración, es necesario utilizar separaciones intermedias con la finalidad de obtener curvas de resistividad aparente aceptables.

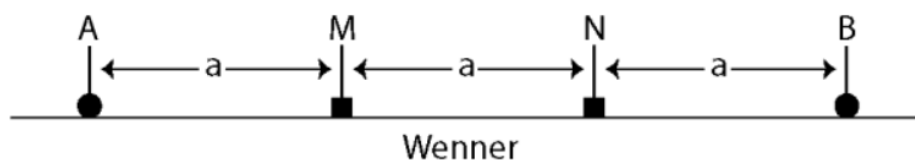


Figura. 2.4. Dispositivo Wenner. (Olona, Fernández, López, & Llana, 2016).

2.3.5.2. Schlumberger

Por el contrario, en la configuración Schlumberger los electrodos no llevan una separación uniforme, sino que los electrodos de potencial permanecen fijos en el centro de la línea AB; mientras que los electrodos de corriente, se irán alejando simétricamente a razón de 2L. Ver figura 2.5.

Si estos electrodos de corriente se encuentran lo suficientemente alejados de los electrodos de corriente, al menos 10 veces x 2L, la resistividad aparente puede ser calculada mediante la siguiente expresión: (Parasnis, 1971).

$$\rho_a = \frac{\pi}{2l} * \frac{(L^2 - x^2)^2}{L^2 + x^2} * \frac{\Delta V}{I}$$



Figura. 2.5. Dispositivo Schlumberger. (Olona, Fernández, López, & Llana, 2016).

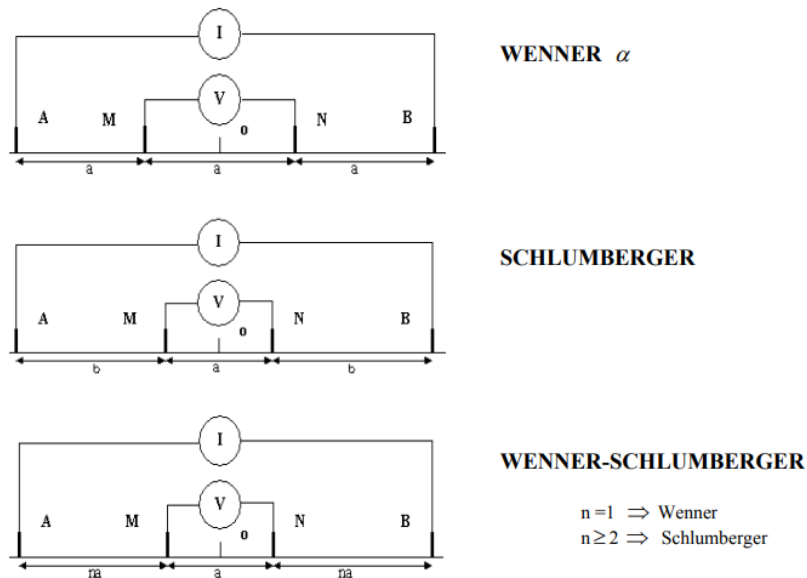


Figura. 2.6. Esquema de los dispositivos electródicos más habituales en los métodos de resistividad. (Serrano Ontiveros, 2003).

2.3.5.3. Dipolo – dipolo

En esta configuración se cambiará la posición de los electrodos de potencial y de corriente tal y como se indica en la figura (Ver Figura 2.7.), según Parasnis, la configuración será:

“El potencial medido se encontrará en el exterior del segmento determinado por los electrodos de potencial (MN), teniendo cada par una separación mutua constante (a). si la distancia entre los dos pares de electrodos es suficientemente grande, el flujo de corriente puede ser considerado como un dipolo eléctrico que, por definición, consiste en un polo eléctrico positivo y otro negativo cuya separación es pequeña comparada con la distancia al punto de observación” (Parasnis, 1971).

Siguiendo este mismo criterio, el autor define la siguiente expresión para la obtención de la resistividad aparente:

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a * \frac{\Delta V}{I}$$

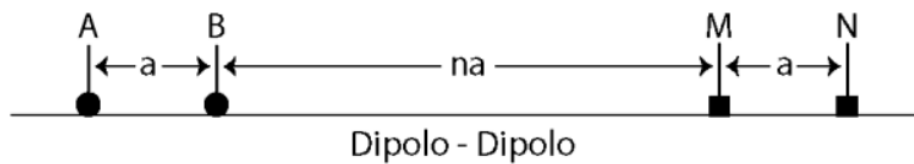


Figura. 2.7. Dispositivo dipolo-dipolo. (Olona, Fernández, López, & Llana, 2016).

El mismo J. Serrano explica que la profundidad a la que se llega en la investigación es un parámetro no tan certero y dependerá sobre todo de la posición asignada a los electrodos. (Serrano Ontiveros, 2003).

Sin embargo, se considera que la profundidad alcanzada para la configuración Wenner será a razón de $a/2$, mientras que para la configuración Wenner – Schlumberger, la obtención de la profundidad se ve aumentada en un 10 a un 15%, siendo aún mayor el alcance, con la configuración dipolo-dipolo.

Vale la pena subrayar que este parámetro puede ser obtenido mediante el software de interpretación que, de una manera más eficaz, permite representar la distribución lateral y su profundidad a lo largo del perfil.

2.3.6. Inversión de los datos

Como fue descrito en el apartado (2.3.4. Resistividad Real), la medida de datos en campo no representa la resistividad real de las estructuras sobre la que se le ha hecho pasar corriente, para poder realizar esta conversión de resistividades aparentes a resistividades reales, en Tomografía Eléctrica, se realiza un proceso de inversión.

La inversión consiste en un proceso iterativo con el que se pretende generar un modelo de resistividades aparentes que sean lo más similar posible a la pseudosección del perfil medido en campo. (Serrano Ontiveros, 2003).

Para poder realizar este proceso, es necesaria la utilización de un programa de inversión que permita realizar estas transformaciones y, además de esto, situará cada una de estas medidas en su profundidad real a lo largo del perfil. (Serrano Ontiveros, 2003).

2.3.7. Softwares aplicados a la técnica

2.3.7.1. RESECS

La recogida de datos se ha de realizar con el software DMT Resecs incorporado en el tomógrafo, este software permite realizar la medida y control de la toma de datos en tiempo real, una vez que todos los elementos descritos con anterioridad se encuentran conectados y preparados para la medida cómo se muestra en la siguiente figura. Véase Figura 2.8.

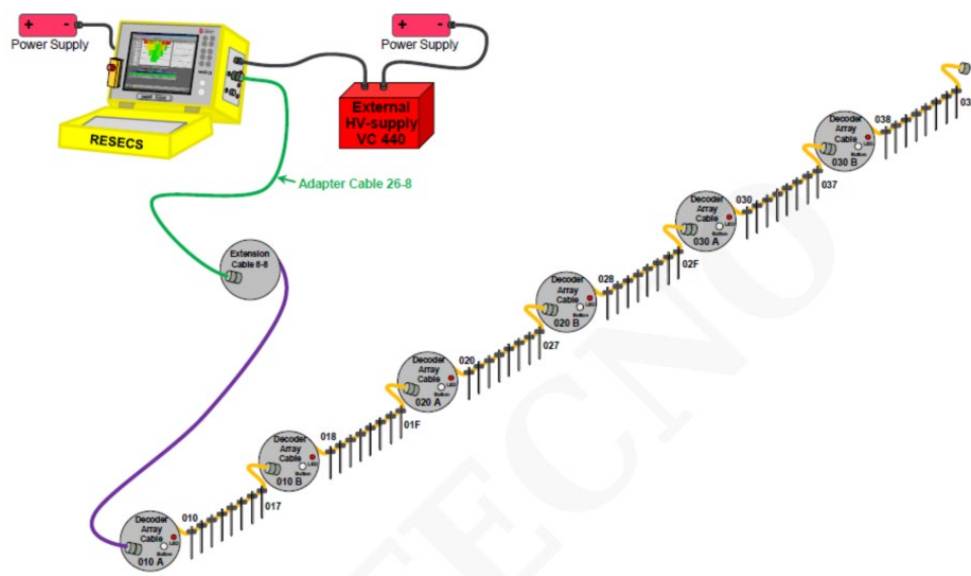


Figura. 2.8. Disposición de los elementos conectados del equipo de tomografía. (COTECNO, s.f.).

El software dispone de todas las configuraciones electrónicas de campo posibles. Una vez seleccionado el dispositivo, se configura la secuencia de medida, el tiempo de inyección, la intensidad de corriente, etc. El equipo DMT RESECS, permite la visualización de la medida, filtrando y corrigiendo los datos de campo en función del error.

A continuación, se describen los pasos fundamentales a seguir en la programación del equipo:

1º) Introducción de los parámetros de trabajo, tales como: la secuencia de medidas a tomar, configuración electrónica, espaciamiento “a” y “b” entre los electrodos y paso “delta”. Ver Figura 2.9. (Rey Arrans & Martínez López, 2012).

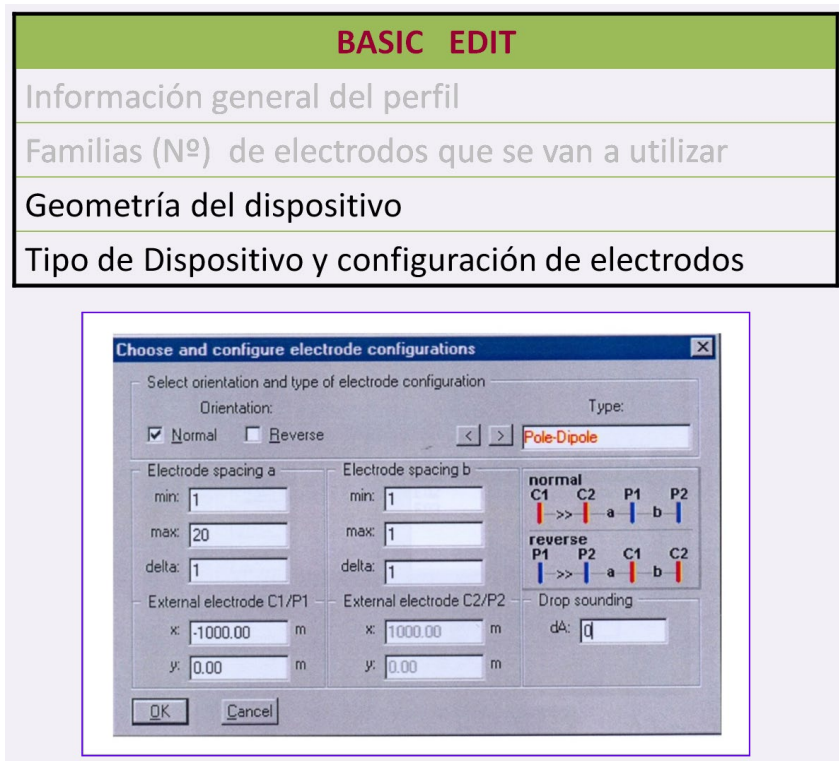


Figura. 2.9. Menú para escoger y configurar el dispositivo. (Rey Arrans & Martínez López, 2012).

2º) Configuración de los tiempos de inyección de corriente y voltaje (Figura 2.10.):

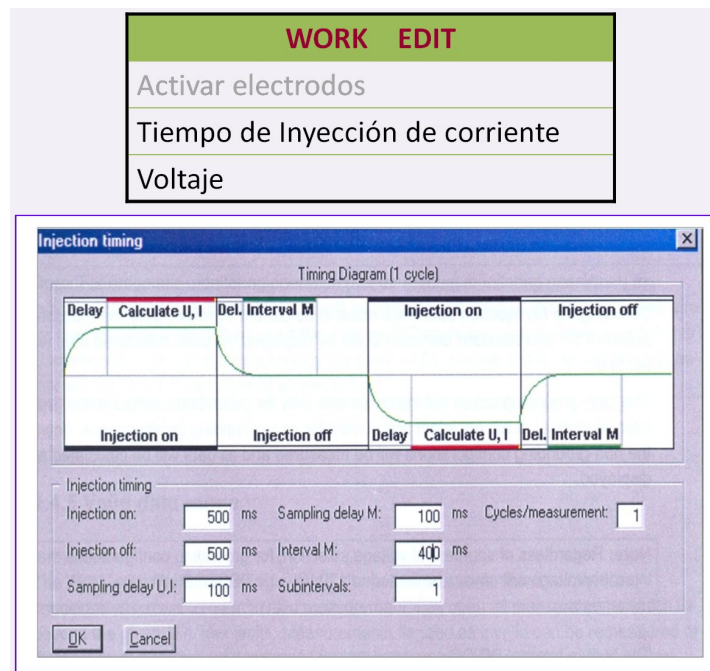


Figura. 2.10. Configuración de los tiempos de inyección de corriente y voltaje.

Los datos eléctricos que se están utilizando (inyección) y potenciales medidos, se pueden visualizar en el programa en sendas curvas de inyección de corriente y potencial medido. Una buena calidad en las curvas de inyección y potencial evidencian si los flujos eléctricos están transmitiéndose correctamente en el terreno y de forma paralela determinar la calidad de la medida tomada.

Las medidas de resistividad aparente se visualizan en la pantalla del ordenador en una pseudosección, mediante una escala de colores que reflejará el rango de resistividades aparentes. La escala, habitualmente logarítmica, es previamente seleccionada en función de los valores que se esperan obtener según la litología del terreno. El perfil mostrará los diferentes niveles medidos según el espaciado utilizado.

La representación obtenida de resistividades aparentes en el pseudo-perfil, reflejará de forma aproximada la distribución de las resistividades aparentes en el subsuelo. (Figura 2.11)

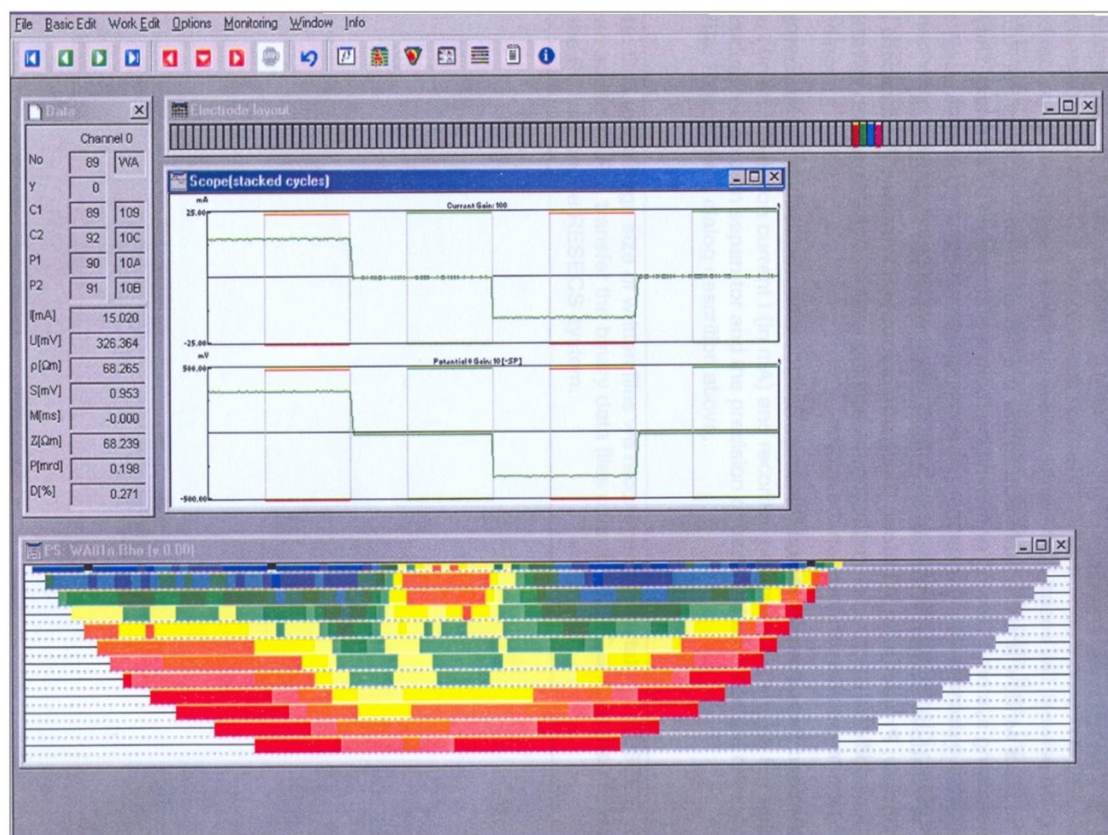


Figura. 2.11. Visualización de las curvas de inyección de corriente y potencial medido, y pseudo-sección de resistividades aparentes.

2.3.7.2. RES2DMOD

Es un programa gratuito de modelado directo en 2D que calcula la pseudosección a partir de las resistividades aparentes, para un modelo definido por el usuario. Permite al usuario la creación de un modelo con el cual pueda representar las resistividades aparentes que espera encontrarse en campo.

Está orientado a la enseñanza sobre el uso de imágenes eléctricas en 2D. También, puede resultar útil para seleccionar el arreglo adecuado para diferentes situaciones geológicas. (Goelectrical Imaging, 1999).

Utiliza el método de diferencias finitas o el de elementos finitos para dividir el área elegida en una serie de bloques mediante una malla rectangular, lo que requiere que el usuario proporcione los valores de las resistividades de los bloques de la malla utilizando un archivo de datos de entrada. (Goelectrical Imaging, 1999). Tal como se muestra en la Figura 2.12. que se presenta a continuación:

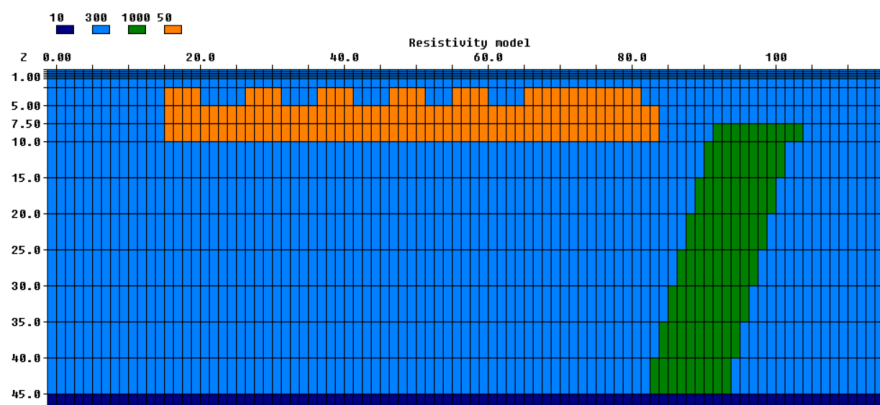


Figura. 2.12. Ejemplo de un modelo de bloques creado con el software RES2DMOD.

Este programa que puede utilizarse en campañas de investigación, tiene la bondad de poder elegir aquella configuración electródica que se plantea usar en campo, pudiendo cambiar de una configuración a otra dentro de la misma ventana de comandos del programa, así como se muestra en la Figura 2.13.

Choose array type

Please select one of the following arrays by clicking the appropriate button.

☐ Wenner Alpha ☐ Pole-Pole
☐ Wenner Beta ☐ Gradient
☐ Wenner Gamma ☐ Equatorial Dipole-Dipole

Number of 'a' spacings

☐ Inline dipole-dipole ☐ Multiple Gradient
☒ Wenner-Schlumberger ☐ Forward Pole-Dipole
☐ Pole-dipole ☐ Reverse Pole-Dipole
☐ Offset Pole-dipole

Number of 'a' spacings

Number of 'n' values

Use maximum geometric factor? ☐ Yes ☒ No

Maximum geometric factor

Limit maximum depth of investigation? ☐ Yes ☒ No

Maximum depth of investigation as ratio of line length.

Use only odd n values (D-D,P-DP,W-S)? ☐ Yes ☒ No

OK Cancel

Figura. 2.13. Ventana del programa RES2DMOD en la que permite al usuario realizar cambios en la configuración eléctrica.

Al ser un modelo teórico, no representará fielmente los inconvenientes que se pueden encontrar en el momento de las medidas en campo, por ello, el programa permite al usuario la opción de adicionar a la pseudosección un porcentaje ruido en función de las condiciones o circunstancias esperables en el momento de la toma de datos. En la Figura 2.14. se muestra la ventana del programa en la que se puede configurar el ruido del modelo.

Choose noise level

Do you want to add noise to the data?

☐ No ☒ Yes

Please enter the random noise level as a percentage (usually 0 to 10).

Select type of noise to add.

☒ Apparent resistivity
☐ Voltage dependent

Save noise values in output file?

☒ No, do not save
☐ Yes, save noise values

OK Cancel

Figura. 2.14. Ventana del programa RES2DMOD que permite configurar el ruido.

2.3.7.3. *PROSYS II*

El software PROSYS, desarrollado por (IRIS INSTRUMENTS, 2021) permite a los usuarios transferir, editar, procesar y exportar datos obtenidos en campo de resistividad y cargabilidad de los diferentes resistivímetros y receptores comerciales.

Las funciones principales de este programa son:

- La descarga de datos.
- Permite la presentación numérica y gráfica de parámetros en bruto, la resistividad y la cargabilidad, entre otros. (IRIS INSTRUMENTS, 2021).
- Realiza el procesamiento de filtrado de valores umbral, aplicación de un promedio móvil o mediano, rechazo de un nodo, rechazo de cuadripolos de relleno, creación de archivos por lotes con un filtrado específico que se puede aplicar a un conjunto de archivos, etc. (IRIS INSTRUMENTS, 2021).
- Introducir cotas topográficas, permitiendo modificar las coordenadas de los puntos adicionados.
- Permite al usuario obtener gráficas de las secciones de resistividad y cargabilidad aparentes. (IRIS INSTRUMENTS, 2021). Como se representa en la Figura 2.15. obtenida del manual de utilización del programa.
- El exportar a varios formatos para su utilización en otros softwares, como el RES2DINV y RES3DINV para la interpretación de los datos y, por último, la visualización de esos archivos exportados. (IRIS INSTRUMENTS, 2021).

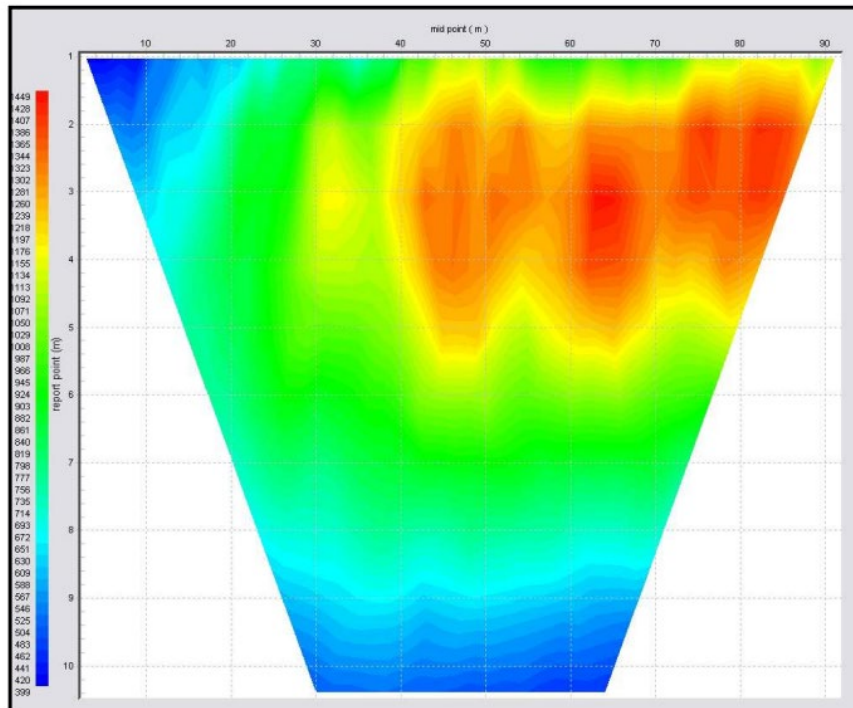


Figura. 2.15. Gráfica de resistividad aparente obtenida del manual del software PROSYS II. (IRIS INSTRUMENTS, 2021).

La diferencia fundamental entre el Software PROSYS II y el PROSYS III radica en la incorporación de la gestión de datos que permite al usuario la adquisición de un modelo 3D, a diferencia del primero (PROSYS II) que no posee esta capacidad.

2.3.7.4. RES2DINV

Los datos de resistividad aparente medidos en el campo con el software RESECS se guardan en tres archivos exportados con extensiones: .sem; .rem; .uai.

Estos archivos de campo son importados al programa RES2DINV, que es el software de diseño e interpretación para poder obtener la inversión de los datos recogidos en campo. Este software fue diseñado en 1994 por el director de Geotomo, Meng Heng Loke, con la intención de proporcionar una herramienta capaz de procesar una gran cantidad de datos en la que los parámetros del modelo se ajustarían automáticamente para facilitar al interpretador la obtención de un resultado de los modelos geológicos complejos. (Geotomo Software, 2024).

Con el avance tecnológico de los equipos de medida e interpretación de datos en tomografía, se ha podido llegar a la obtención de perfiles bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) (RES3DINV) que son los que se utilizarán para cumplir con los objetivos del presente estudio.

El modelo bidimensional obtenido del resultado de la inversión, se realiza a partir de la división de la región del subsuelo en una determinada cantidad de bloques a los cuales el programa determinará su resistividad, produciendo de esta manera una pseudosección que tenga consonancia con las medidas reales proporcionadas por las labores en campo. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).

2.3.7.4.1. Parámetros de estudio

Eliminar puntos con datos malos

Esta opción permite al usuario observar los valores de los datos de resistividad aparente en perfiles para cada nivel. El propósito de dicha herramienta de edición es la de eliminar los puntos con valores de resistividad claramente erróneos, que se corresponden en principio con valores de resistividad aparente muy altos o demasiado pequeños en comparación con los puntos cercanos. Estos errores podrían ser el resultado de fallos en la conexión de los electrodos, deficiente transmisión de la corriente al terreno o por el contrario máxima transmisividad de la corriente al encontrarse el terreno excesivamente mojado. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).

Para usar esta herramienta, sobre la pantalla donde se visualizan los puntos tomados, se seleccionan los puntos con datos que se consideran incorrectos los que presentan valores muy altos o muy bajos. Se posiciona el cursor del ratón sobre ellos, se hace clic en el botón izquierdo del ratón y el color de ese punto cambiará de negro a rojo, con lo que el dato será eliminado, como se muestra en la Figura 2.16.

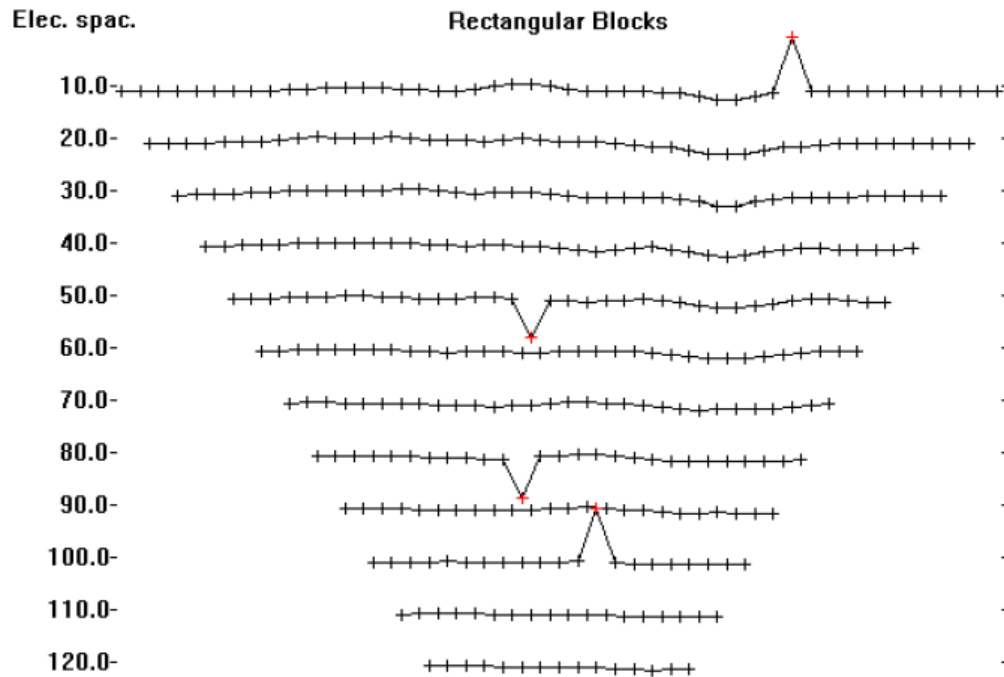


Figura. 2.16. Ejemplo de un conjunto de datos con puntos erróneos. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).

% RMS error

El error cuadrático medio (RMS) es un parámetro utilizado para medir la diferencia que tienen los datos calculados con la medida obtenida de resistividad aparente en campo. El error expresa la calidad del dato medido. El error variará en función del número de iteraciones que realice el programa en la inversión para el cálculo de la resistividad real, siendo el valor óptimo aquel, que tras realizar varias iteraciones, no varíe significativamente el RMS.

Siendo este uno de los parámetros más sensibles del programa, es aconsejable que este valor se encuentre dentro de los rangos del 2 al 5% que el interpretador ajustará en función de la calidad de las lecturas tomadas.

En la Figura 2.17. se muestra una ventana del programa en la cual se elegirá el límite de convergencia y el valor del RMS; el primero ayuda a disminuir el cambio que pudiese existir en el RMS entre dos iteraciones según el ruido que pudiesen tener las medidas y el segundo ayudará a detener al programa cuando el RMS calculado tenga un valor inferior al % de error de convergencia introducido.

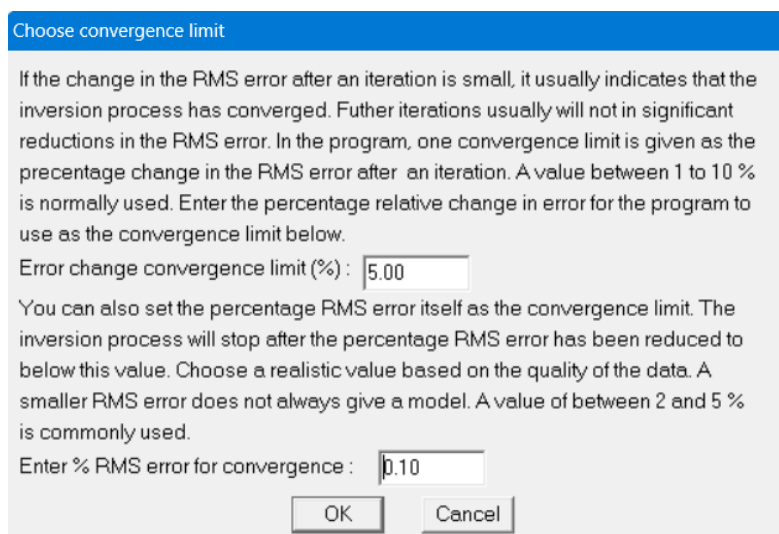


Figura. 2.17. Ventana de ajustes del RES2DINV para seleccionar el valor de RMS y límite de convergencia.

Número de iteraciones

El número de iteraciones es fundamental para obtener un modelo con un RMS adecuado para la calidad de las medidas y que este represente en mayor o menor medida, un reflejo de las anomalías presentes en el subsuelo.

El programa recomienda que el número de iteraciones se encuentre en torno a 5, en función del modelo matemático utilizado, debido a que usualmente la convergencia se alcanzará entre las iteraciones 4 y 6 del cálculo.

Usualmente, no es necesario realizar más de 10 iteraciones para que el programa alcance la convergencia del modelo; sin embargo, de ser necesario, el programa permite añadir un mayor número de iteraciones para cumplir con el criterio mencionado en el apartado anterior.

En la Figura 2.18. se presenta la ventana en la que se seleccionará el número de iteraciones que realizará el programa.

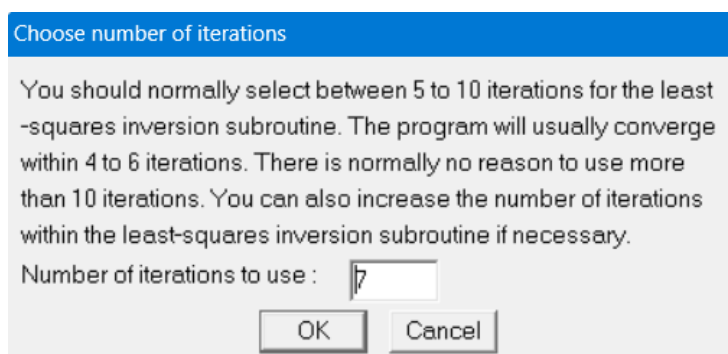


Figura. 2.18. Ventana del RES2DINV para seleccionar el número de iteraciones que realizará el programa.

Topografía del área de estudio

La información topográfica, se puede introducir de dos formas:

- en el archivo de campo con extensión .rem.
- con el programa PROSYS, en la opción topography.

Además, dentro del software existe la posibilidad de realizar la interpretación adicionando la topografía del lugar a la malla creada por el programa para la realización de la inversión.

La topografía tiene una importancia fundamental tanto en la toma de datos como en la resolución del modelo, ya que los cambios de cota topográfica en cada punto (orografía del terreno) influyen directamente en las medidas tomadas por el dispositivo, con variaciones en los valores resistividad.

Para tomar en cuenta este aspecto, se dispone de la herramienta “Distorted finite-element grid with uniform distortion” que intenta utilizar una malla a partir de elementos finitos para que la superficie se asemeje a la topografía del terreno. Con esta herramienta se pueden obtener mejores resultados en la interpretación, ya que tiene en cuenta los cambios de pendiente y de cota y, cómo estos cambios pueden afectar a los datos medidos en campo. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).

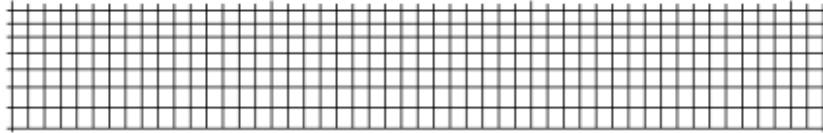
Otra herramienta que permite la corrección de la interpretación por topografía es la “Distorted finite-element grid with damped distortion” a diferencia de la anterior, esta herramienta es utilizada cuando la amplitud de la curvatura de una región es menor que el valor (profundidad) de la capa más profunda del modelo. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).

Por último, la “S-C transformation with distorted finite-element grid” proporciona un modelo que podría verse más natural en comparación con los dos anteriores, utiliza el método de transformación de Schwarz-Christoffel para calcular la distorsión en las capas más superficiales del terreno. No es recomendable su utilización en casos que el terreno tenga picos de variación de cota cuando no se tienen suficientes datos topográficos del terreno. (GEOTOMO SOFTWARE, 2010).

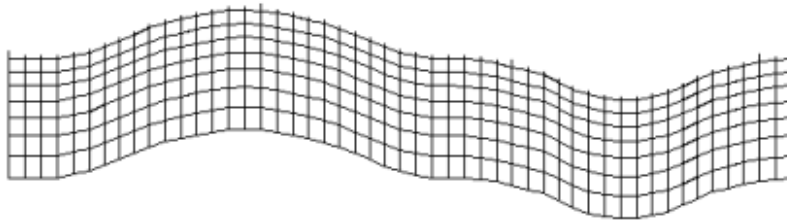
En la Figura 2.19., tomada del manual de utilización del RES2DINV, se puede apreciar la diferencia que cada una de estas herramientas en la distorsión de la malla siendo (a) la malla sin la introducción de la topografía, (b) el modelo distorsionado

uniformemente, (c) distorsión de la malla con una amortiguación moderada, (d) la distorsión de la malla con una alta amortiguación, donde vemos una considerable resolución de la profundidad y por último (e) malla con el método Schwarz-Christoffel.

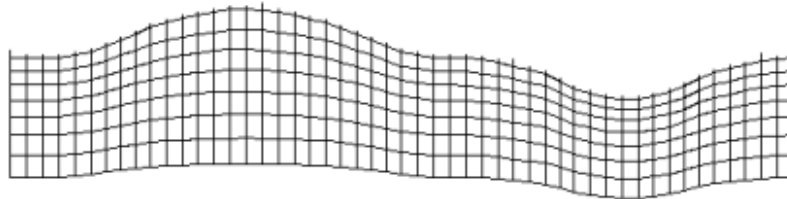
a). Arrangement of model blocks without topography



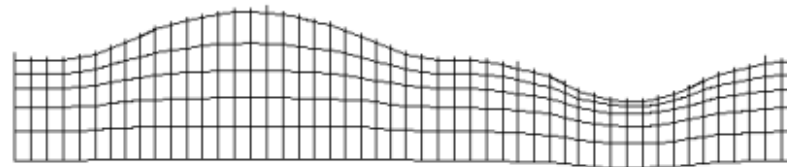
b). Arrangement of model blocks with a uniformly distorted grid



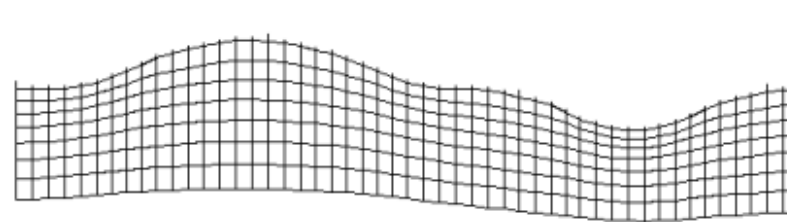
c). Arrangement of model blocks with a moderately damped distorted grid



d). Arrangement of model blocks with a highly damped distorted grid



e). Arrangement of model blocks with the inverse Schwartz-Christoffel transformation



*Figura. 2.19. Herramientas utilizadas para la distorsión de la malla del terreno con respecto a la topografía.
(GEOTOMO SOFTWARE, 2010).*

2.3.7.4.2. Obtención de la inversión

Tras finalizar la introducción de los parámetros más relevantes, se conseguirá la pseudosección del modelo interpretado con el resultado de la inversión, accediendo a la pestaña del programa “Inversion Methods and Settings” en la que aparecerá la opción de obtener la inversión, a partir de mínimos cuadrados o elementos finitos. Figura 2.20.

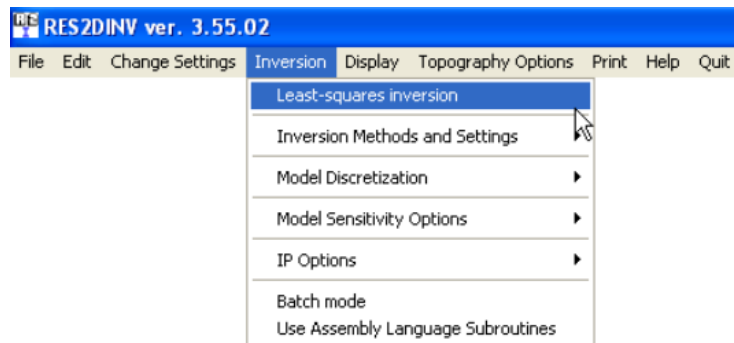


Figura. 2.20. Secuencia para obtener el resultado de la inversión por mínimos cuadrados en RES2DINV.

Aparecerá por pantalla el análisis realizado por el programa, representando tres gráficos distintos. Figura 2.21.

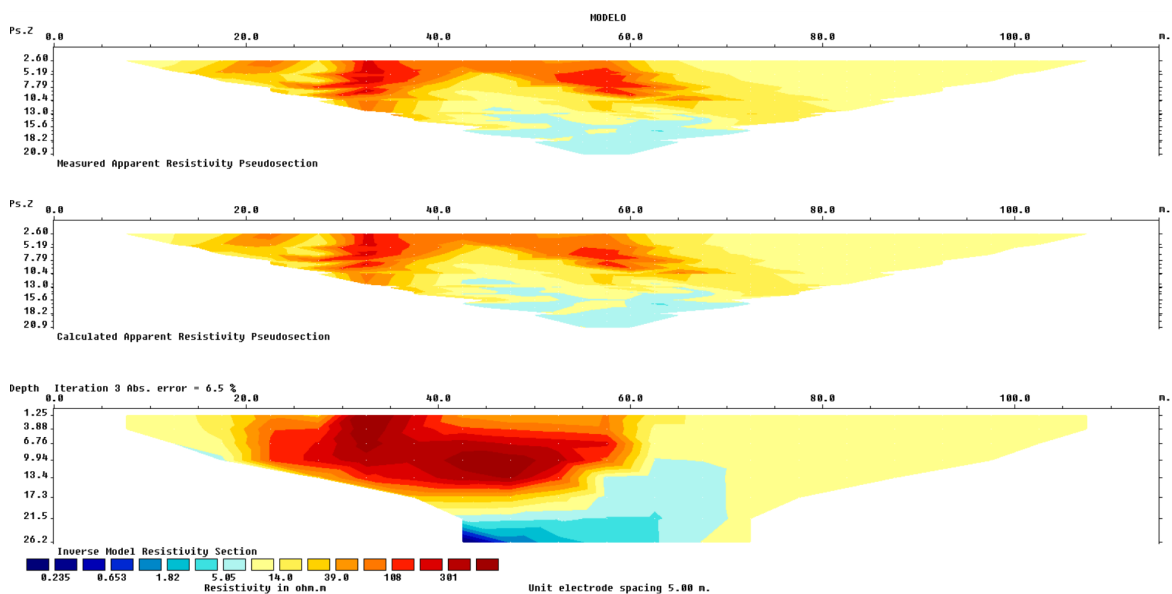


Figura. 2.21. Ejemplo de un perfil realizado en RES2DINV a partir de un modelo teórico.

En la Figura 2.21. el modelo se corresponde con una estructura horizontal medida con el método Wenner – Schlumberger, en donde los tres gráficos representados se corresponden con:

- a) Imagen inferior: es el modelo de las resistividades aparentes de campo tomadas.
- b) Imagen central: en función de este modelo teórico, el programa calcula el modelo de resistividad aparente que se le asocia.
- c) Imagen superior: en función de este modelo de resistividad aparente estimado el programa calcula el modelo teórico de resistividad real que le correspondería. Si este modelo diverge en función del RMS resultante, el proceso se repite el número de iteraciones necesarias hasta su convergencia.

2.3.7.5. *RES3DINV*

A diferencia del software RES2DINV, en este se puede realizar la inversión de forma tridimensional (3D) para datos obtenidos con Tomografía Eléctrica (ERT) e IP. Ofrece la posibilidad de realizar un trabajo sencillo desde la importación de datos hasta el proceso de inversión. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

Permite la visualización de secciones de resistividad tanto verticales como horizontales, al igual que la posibilidad de exportar los datos de los archivos .dat a softwares de visualización como lo pueden ser: ParaView, Slice-Dicer, Voxler, entre otros. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

Una de las ventajas que se obtiene del trabajo con este software es la posibilidad de ajustar los diversos parámetros y filtros que posee el programa a los datos que tenga el usuario. Emplea el método de Gauss-Newton para el cálculo de la matriz jacobiana después de cada iteración. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

Los parámetros de estudio, son similares a los que utiliza la versión 2D, como lo pueden ser el error RMS, el número de iteraciones a realizar, la adición de topografía a los datos de resistividad para una interpretación más precisa, que permite eliminar los errores anteriormente mencionados, entre otros. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

Al seleccionar en la ventana de herramientas de “Display” aparecerán una serie de opciones que permitirán al usuario representar gráficamente el resultado de la inversión, como se puede observar en la Figura 2.22. tomada del Manual de utilización del software RES3DINV.

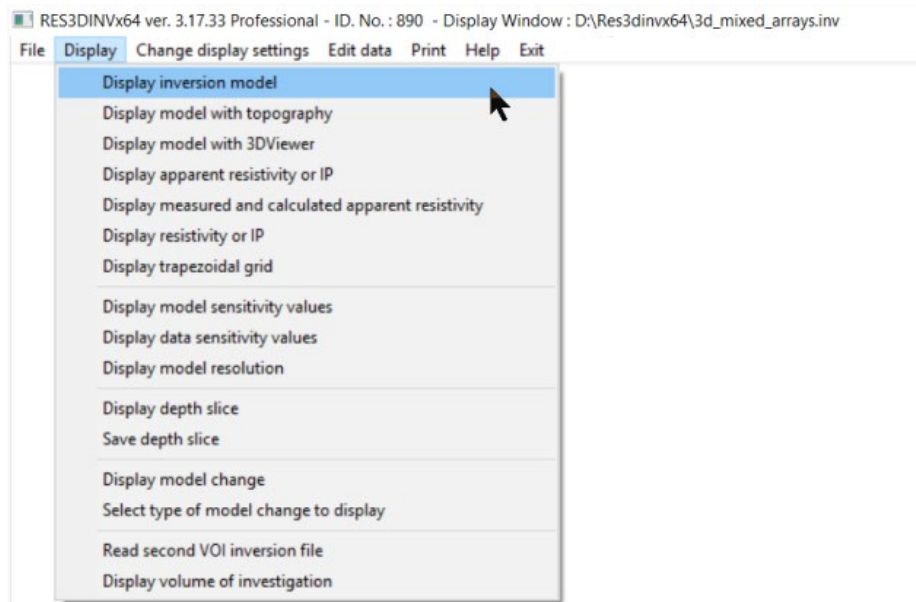


Figura. 2.22. Menú de Display en programa RES3DINV. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

La representación de los diversos perfiles que da como resultado el programa se puede configurar en una ventana emergente que se presenta en la Figura 2.23. en donde pueden observarse los resultados de la inversión en las siguientes direcciones:

- Secciones horizontales.
- Secciones verticales:
 - XZ
 - YZ

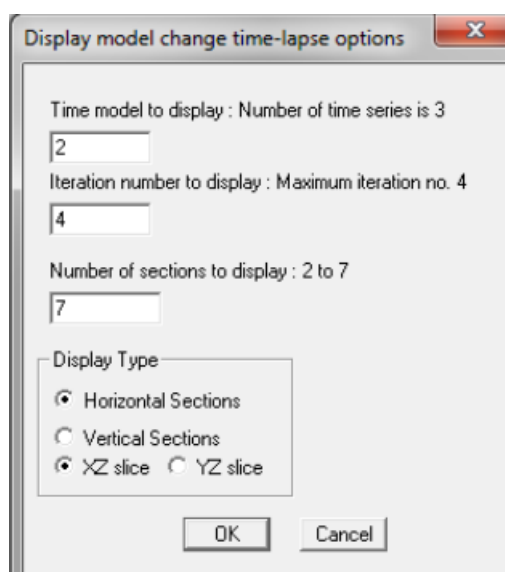


Figura. 2.23. Ventana "Mostrar cambio en el modelo" en el software RES3DINV. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

El resultado de la inversión se obtiene automáticamente en función de la configuración electródica de los perfiles medidos en campo, realizando el número de iteraciones necesario para poder llegar a ese resultado y el error RMS asociado. En la Figura 2.24 se aprecia un modelo de inversión para un conjunto de datos obtenidos del vertedero de Ekeboda del manual de utilización del RES3DINV.

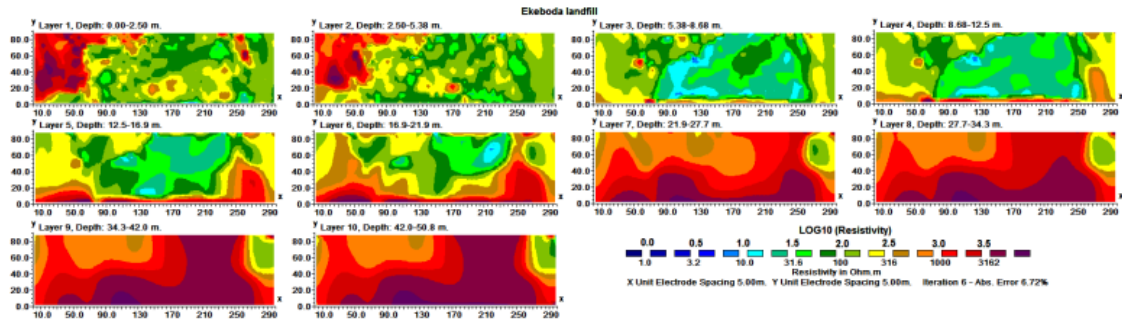


Figura. 2.24. Resultado del modelo de inversión del vertedero de Ekeboda. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

2.3.7.6. *Software GOLDEN*

2.3.7.6.1. *Surfer*

Surfer es un programa gráfico que se basa en el mapeo de cuadrículas regulares a partir de datos XYZ que se encuentran irregularmente espaciados. Igualmente, permite la importación de cuadrículas desde otro tipo de fuentes. Estas cuadrículas se utilizan para generar distintos tipos de mapa como, por ejemplo: mapas de relieve, de contorno, superficies 3D, etc. (GOLDEN SOFTWARE, 2019).

Se puede introducir la información desde archivos previamente existentes, los cuales pueden ser: imágenes, archivos en formato vectorial o en formato de coordenadas (X, Y, Z), con los se realizará la representación gráfica, tanto para los puntos e imágenes, como para a partir de ellos la creación de los mapas. En la Figura 2.25. se muestra la relación existente entre los diversos archivos de entrada y las representaciones que se pueden obtener de ellos. (GOLDEN SOFTWARE, 2019).

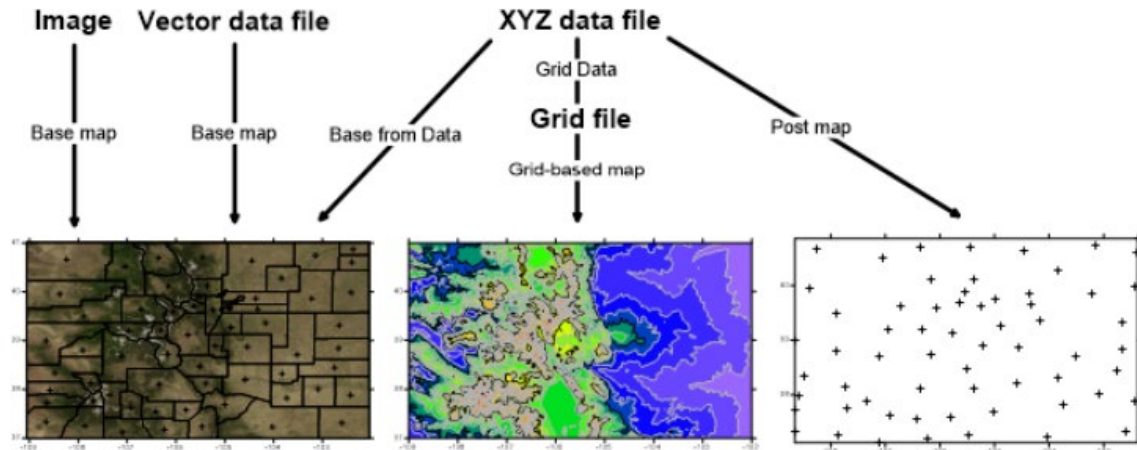


Figura. 2.25. Ilustración de la relación entre diferentes archivos de datos y diferentes tipos de mapas.

Una vez representado en mapa, aparecerá una nueva pestaña que indicará el gráfico obtenido a partir de los datos, esta representación gráfica puede ser ajustada por el usuario según lo que se pretenda obtener de la información. A continuación, se presenta una ventana del programa (Figura 2.26.), indicando las principales herramientas de trabajo. (GOLDEN SOFTWARE, 2019)

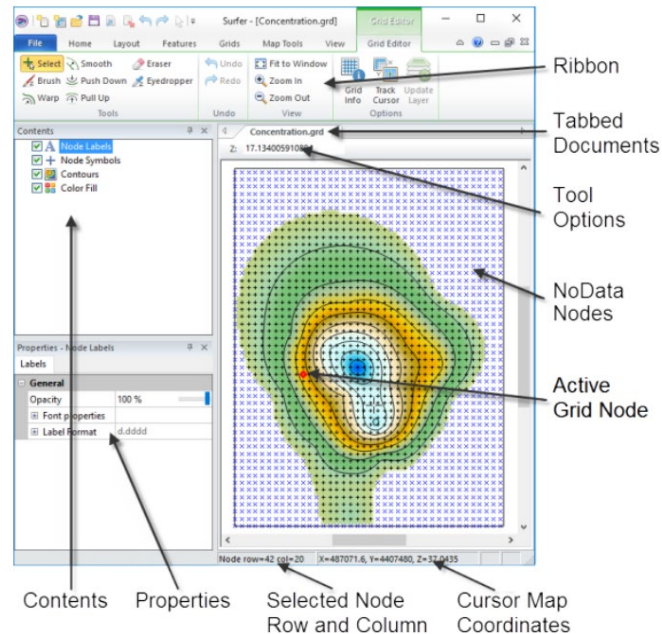


Figura. 2.26. Editor de cuadrícula de Surfer con las ventanas de Contenidos y Propiedades a la izquierda y la ventana del editor de cuadrícula a la derecha.

2.3.7.6.2. Voxler

Voxler es un software de visualización tridimensional que se enfoca principalmente en el renderizado volumétrico y la exhibición de datos en 3D; igualmente, este programa puede trabajar con cuadrículas 2D incluyendo: archivos DEM, imágenes y datos de puntos dispersos. Voxler ha sido diseñado para manejar datos XYZC, donde C representa una variable en cada ubicación de X, Y y Z.

Para crear un modelo 3D, lo primero que se necesita realizar es la introducción de los datos de trabajo al software; ya que una ventaja del programa es que admite una variedad considerable de fuentes en las que se pueden guardar los datos. Una vez adjuntos, se puede visualizar lo recién añadido o bien, realizar ajustes en ellos.

Algunas de las capacidades que posee, incluyen:

- Gráficos de isosuperficies: estos permiten ampliar las funciones de trazado de contornos, al igual que permite representar superficies de valores constantes de forma tridimensional como es representado en la Figura 2.27., tomada de la guía para el usuario de la casa Golden Software.

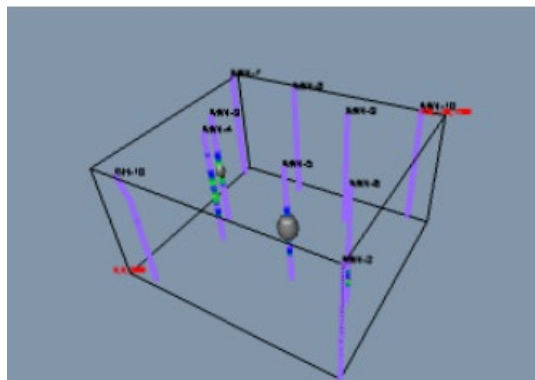


Figura. 2.27. Representación de una isosuperficie en la ventana de resultados.

- Modelos tridimensionales: en esta opción, se le asigna un color y un nivel de transparencia a cada elemento que se encuentra en la rejilla tridimensional.
- Diagramas de dispersión: en estos diagramas se muestran modelos de datos puntuales en un volumen espacial en donde, opcionalmente, se

pueden asignar colores para la representación de los valores de dichos datos. A continuación, se muestra un ejemplo Figura 2.28 tomado de la guía de usuario del programa, realizando esta representación.

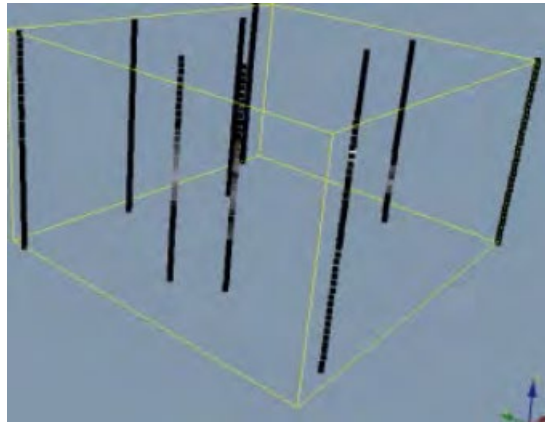


Figura. 2.28. Ejemplo de diagrama de dispersión luego de añadir la caja que marcan los límites de los datos.

- Campos de altura (Heightfields): permite realizar una visualización de una sección tridimensional de la malla, esta se ajusta a una escala y va en dirección perpendicular a la sección de la malla según el valor de la componente de los datos, especificando en la importación de datos la malla y el factor de escala de campos de altura. Esta representación se muestra en el resultado con una gama de colores que representen estas variaciones. Figura 2.29.

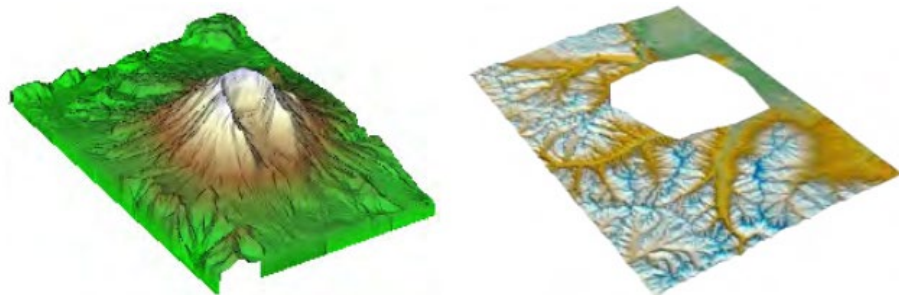


Figura. 2.29. Ejemplo de resultado posterior al uso de Heightfields tomado de la guía para el usuario de Voxler.

- Gráficos con planos de corte: es posible realizar varios planos de corte que posean diversos ángulos de inclinación, según sea el objetivo que se desea representar.

3. CAPITULO III: TRABAJO DE CAMPO

Referido al capítulo de antecedentes, la ubicación de la Mina de San Telmo tiene una importancia fundamental en la historia de la minería del Distrito Minero de La Carolina. Si bien es cierto que, actualmente es posible obtener información valiosa acerca de ciertos asentamientos mineros que se remontan siglos atrás, en el estudio bibliográfico realizado para la elaboración del presente escrito, no se ha encontrado evidencia de estudios realizados de esta índole en la localización de estudio.

Las implicaciones prácticas que involucra este TFG, sentarán las bases para futuras investigaciones tanto en el área de estudio como en otras similares. De este modo, servirá para la implementación de los equipos y programas a utilizar para la resolución de este tipo de trabajos. Se pretende obtener una representación tridimensional de las estructuras estudiadas a partir de perfiles bidimensionales.

En resumen, en el presente TFG aborda un tema de investigación no explorado con anterioridad en la zona de trabajo, ofreciendo técnicas y métodos alternativos que contribuyan al avance en la detección de estructuras enterradas utilizando técnicas eléctricas.

3.1. Descripción del equipo utilizado

Para la realización de la toma de medidas en campo con tomografía eléctrica, se dispuso de los siguientes equipos:

- Electrodos: picas de acero inoxidable clavadas en el terreno, dispuestas a una longitud determinada equidistante. Cada uno de estos electrodos se encuentra conectado a la caja de conexión. Figura 3.1.

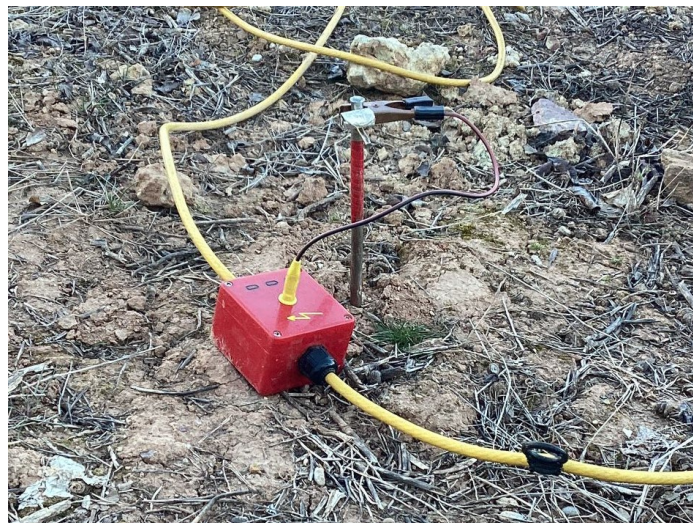


Figura. 3.1. Detalle de electrodo conectado al cable y caja de conexión.

- Conectores: cables que permiten la conexión de los electrodos con el cable del dispositivo. Estos cables de cobre llevan una clavija que se introduce en la caja de conexión y una pinza en el otro extremo para poder establecer la conexión con el electrodo. Figura 3.1.
- Cable del dispositivo: son cables de tipo sísmico con una longitud considerable, que a cierta distancia llevan una caja numerada según su familia para conectar los electrodos. Las familias dependerán del número de cables necesarios para cubrir la extensión del terreno que se quiere estudiar, en nuestro caso hasta la familia 7. Figura 3.2.



Figura. 3.2. Familia de cable 2.

- Unidad central: consta de un resistivímetro que se encarga de ejecutar la toma de medidas, la verificación del estado de las conexiones y el almacenamiento de los datos obtenidos de forma automática. (Serrano Ontiveros, 2003). Figura 3.3.



Figura. 3.3. Tomógrafo. DMT. Resecs.

- Ordenador: incorporado dentro del resistivímetro, dispone del software necesario (RESECS) para la adquisición de los datos de campo. Permite el procesamiento y visualización de los datos obtenidos.
- Convertidor: equipo que transmite la energía al terreno, con conmutador para mayor o menor requerimiento. Figura 3.4.



Figura. 3.4. Convertidor.

- Batería: fuente de alimentación encargada de transmitir la energía al sistema. (Serrano Ontiveros, 2003). Figura 3.5.



Figura. 3.5. Batería y cargador.

3.2. *Trabajos de campo.*

La planificación del trabajo de campo y la toma de datos, se realizó en 4 fases:

- Fase de prueba del equipo y adaptación de una configuración 2D a 3D (Día 1).
- Fase de reconocimiento del emplazamiento a estudiar. (Día 2)
- Fase de toma de datos en zona sur del área de trabajo (Día 3).
- Fase de toma de datos de la zona norte del área de trabajo (Día 4).

Día 1: adaptación del equipo de una configuración 2D a 3D

En esta se realizó un reconocimiento previo de los componentes del equipo y la función de cada uno de ellos. Esta fase fue realizada en las inmediaciones del Campus Científico Tecnológico de Linares.

Previamente, se realizó una propuesta en el gabinete en la que se planificó la campaña a realizar. Para dicha campaña se debía tomar en cuenta que el tomógrafo no proporcionará los datos para su posterior interpretación en 3D, sino que habrá que configurar una disposición específica de los electrodos que permitan obtener las medidas en distintas direcciones y no sólo en una.

Para ello, se propone la siguiente estructura en forma de Zigzag Figura 3.6. tomada del Manual de RES3DINV, utilizando un dispositivo electródico en el que comúnmente se posicionan los electrodos en una malla cuadrada con el mismo espaciamiento entre los electrodos con dirección x y los de la dirección y. (López Hidalgo, Heng Loke, Fanton, & Cara, 2006).

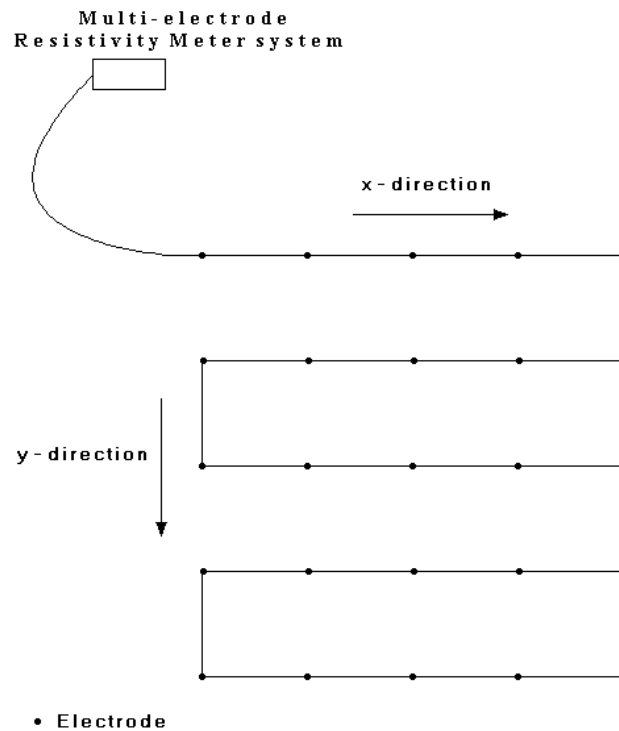


Figura. 3.6. Configuración de electrodos en forma de Zigzag. (GEOTOMO SOFTWARE, 2020).

También, se debe tener en cuenta las configuraciones electródicas a utilizar, en este caso Wenner – Schlumberger y Dipolo – Dipolo, y la geometría que tomará la malla sobre la que se han dispuesto los electrodos.

- Wenner-Schlumberger (Figura 3.7.):

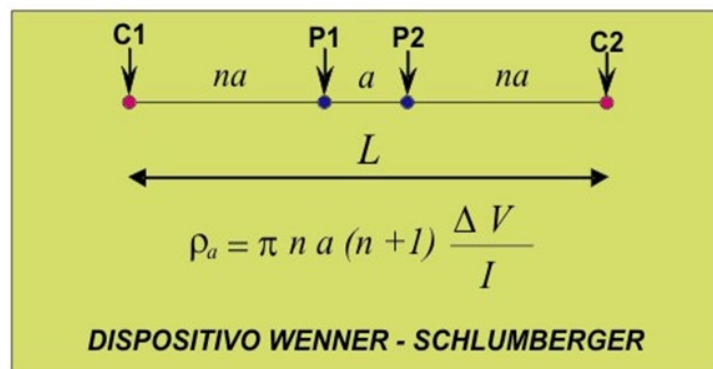


Figura. 3.7. Dispositivo Wenner-Schlumberger.

Con el espaciamiento “a” previamente definido en la ventana de configuración electródica, se comenzará utilizando los primeros cuatro electrodos, comportándose el electrodo 1 (C1) y 4 (C2) como electrodos de corriente y el electrodo 2 (P1) y el electrodo 3 (P2) como electrodos de potencial. Tras tomar esta medida, se pasará a la siguiente con los siguientes cuatro electrodos 2, 3, 4 y 5 para obtener su valor correspondiente y así sucesivamente hasta el final del perfil.

Tras completar el primer nivel, se procede a realizar otra secuencia, ahora con un espaciamiento de 2 veces “a” correspondiendo a los electrodos 1, 3, 5, 7; luego se seguirá con el conjunto de electrodos 2, 4, 6, 8 y de esta forma hasta completar el segundo nivel. Este proceso se extenderá a espaciados de 3, 4, 5 y 6 veces el valor de “a”. (Rey Arrans & Martínez López, 2012). En la Figura 3.8. se representa una secuencia de medidas tipo.

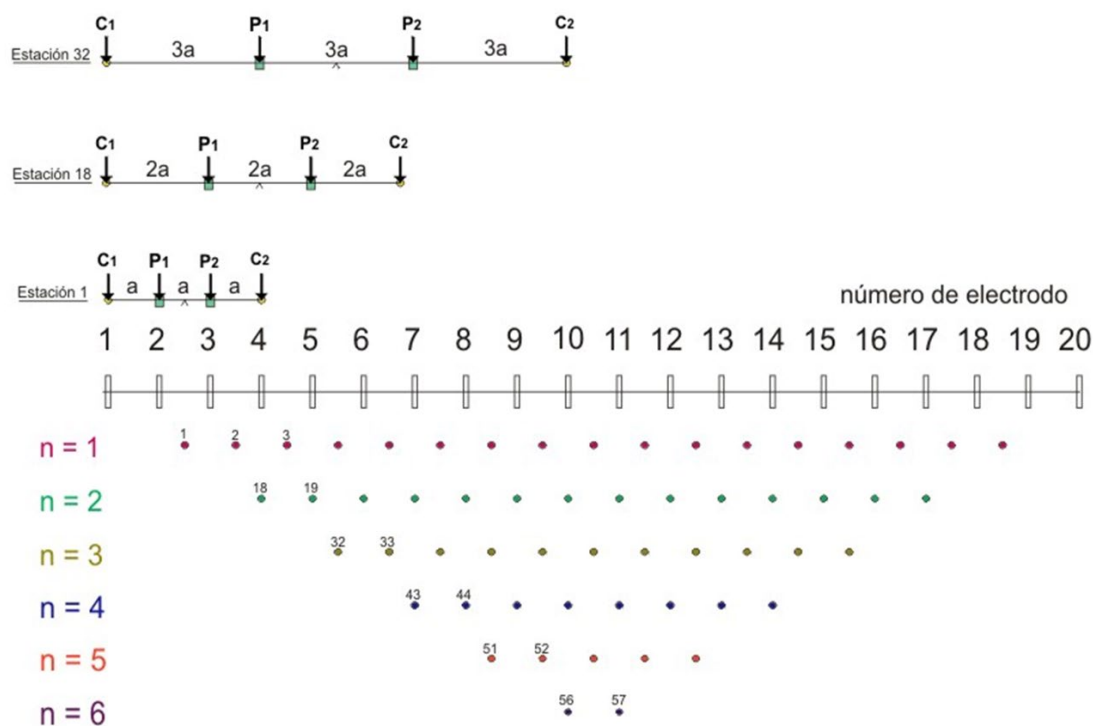


Figura. 3.8. Secuencia de medidas para construir una pseudosección (Rey Arrans & Martínez López, 2012).

- Dipolo – Dipolo (Figura 3.9.):

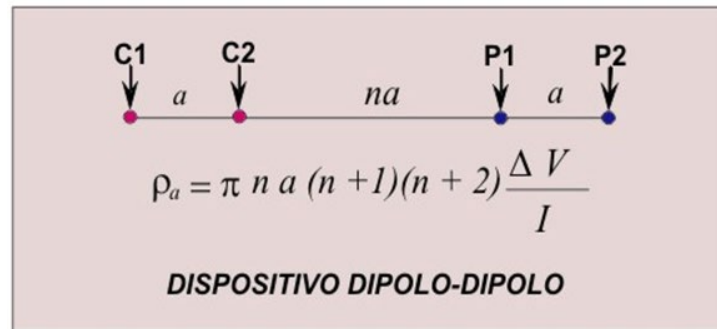


Figura. 3.9. Dispositivo Dipolo-Dipolo.

Se inicia con un espaciado de "1a" entre los electrodos C1-C2 y P1-P2. La primera serie de mediciones se realiza con un valor de 1 para "n" (que indica la proporción de la distancia entre los electrodos C1-P1 con respecto al dipolo C1-C2). Luego, se continúa con "n" igual a 2 hasta que la distancia del dipolo C1-C2 alcance "1a". En este punto, cuando "n" es igual a 2, la distancia entre el electrodo C1 y el P1 es el doble del espacio entre el dipolo C1-C2. Para mediciones posteriores, el valor de "n" se incrementará gradualmente hasta aproximadamente 6, momento a partir del cual la precisión de las mediciones de potencial se dificulta debido a su bajo valor. (Rey Arrans & Martínez López, 2012).

Para ambos casos la geometría del campo es la que se muestra en la Figura 3.10.

```

Fieldgeometry info
min      :      X =      0.00 m   Y =      0.00 m   Z =      0.00 m
max      :      X =     21.00 m   Y =      9.00 m   Z =      0.00 m
delta    :      X =      3.00 m   Y =      3.00 m   Z =      0.00 m
max Grd  :      X =       7       Y =       3       Z =       0

```

Figura. 3.10. Geometría del campo. Día 1.

La configuración de los electrodos adoptada para el dispositivo Wenner – Schlumberger se muestran a continuación:

```
Schlumberger01[normal]
  min a : 1  max a : 3  delta a : 1
  min b : 1  max b : 1  delta b : 1
  dA : 0
  prio : 0
```

Figura. 3.11. Configuración eléctrica Wenner – Schlumberger.

Por otra parte, la configuración eléctrica adoptada para el dispositivo Dipolo – Dipolo fue la siguiente:

```
Dipole-Dipole01[normal]
  min a : 1  max a : 5  delta a : 1
  min b : 1  max b : 1  delta b : 1
  dA : 0
  prio : 0
```

Figura. 3.12. Configuración eléctrica Dipolo – Dipolo.

Ya en campo, los electrodos fueron clavados en el suelo a la distancia planteada. Seguidamente, se realizó la conexión de los electrodos con el cable Figura 3.13. Los cables siguen un código numérico para su correcta disposición, empezando por la familia con la notación 000.



Figura. 3.13. Conexión entre electrodos y el cable.

Una vez realizada la conexión, se procedió a regar los electrodos para humedecer la zona y de esta forma facilitar el paso de la corriente al terreno.

Sobre una mesa se colocó el resistivímetro haciendo las conexiones del mismo con el cable y la fuente de energía (batería) cerrando de esta forma el circuito. Además, se conectó el convertidor y la seta de seguridad Figura 3.14.



Figura. 3.14. Conexión de los componentes al ordenador.

Una vez encendido el ordenador, y configurado el software se procedió a la introducción de corriente al terreno para medir la resistividad aparente del mismo. Dichas resistividades se pueden observar en la pantalla de manera gráfica en formato de celdas que toman un determinado color según una escala logarítmica previamente seleccionada. Cada medida corresponde a la posición de los electrodos y la configuración electrónica elegida, formando un triángulo invertido, mostrando menor número de celdas conforme se profundiza en el terreno. Ver Figura (3.15. y 3.16.).



Figura. 3.15. Introducción de parámetros al software.



Figura. 3.16. Vista de la pantalla del ordenador en donde se muestran de manera gráfica las resistividades aparentes.

3.3. *Día 2: Fase de reconocimiento del emplazamiento y representación en RES2DMOD*

Es importante que antes de realizar la toma de medidas de datos en campo, estudiar el terreno sobre el que se dispondrá el dispositivo, observar y tener presentes los posibles obstáculos y aquellas estructuras que puedan provocar ruidos en las medidas.

Además, antes de realizar cualquier campaña debemos preguntarnos:

- ¿Qué BUSCAMOS?
- ¿Dónde CREEMOS QUE ESTÁ?
- ¿Qué FORMA Y TAMAÑO TIENE?
- ¿Qué RESPUESTA GEOFÍSICA CREEMOS QUE TIENE?
- ¿Qué MATERIALES LO ENVUELVEN?
- ¿Cuál es el MODELO GEOLÓGICO?
- ¿Qué PRESUPUESTO TENEMOS?

Con todo ello decidir (Figura 3.17) el método más apropiado para la estructura que se pretende analizar y seleccionar el dispositivo que permita obtener una mejor resolución de la misma.



Figura. 3.17. Planteamiento del método y dispositivo.

Gracias a la colaboración de D. Pedro Moya, presidente de (ADMICA), nos puso en contacto con los propietarios de la finca en donde se encuentra el emplazamiento de estudio para que nos autorizaran y facilitaran el acceso. Concretada la visita, se realizó el desplazamiento hasta el lugar para plantear la estrategia del trabajo de campo que se iba a realizar.

Se efectuó un reconocimiento de los muros que afloran y una estimación de la posible profundidad de los mismos.

Dicho esto, una vez observadas las características del terreno y en función de las de las dimensiones medidas de los muros aflorantes, se trabajó con el software RES2DMOD, para obtener una recreación de la pseudosección de resistividades aparentes que pensamos podrían encontrarse una vez que se realizaran las medidas y la inversión del modelo teórico.

La configuración de malla de bloques del modelo (Figura 3.18.) propone un perfil de 16 electrodos, con un espaciado entre los mismos de 1 m. Aunque sea posible el determinar a partir de los datos supuestos la profundidad máxima que podría alcanzar el dispositivo, el valor mínimo que nos pide el programa para su correcto funcionamiento es de 9 filas verticales.

Al conocer de antemano que la zona de estudio se encuentra ubicada sobre una litología pizarrosa y dar por supuesto los tipos de materiales constructivos utilizados por los romanos para el levantamiento de muros, se presume la existencia de 3 tipos de resistividades diferentes, que podrían ser:

- 200 Ωm : material circundante que envuelve a los muros.
- 250 Ωm : variaciones en la litología, entre otras observaciones realizadas, como la presencia de vegetación y puestos de cazadores.
- 1.000 Ωm : resistividad de los muros.

```

Model name - MODELO TFG
Number of electrodes is 16.
Number of apparent resistivity levels is 7.
No water layer
Electrode spacing is 1.0.
No remote electrodes.
Model grid depths specified in model file.
Number of model resistivity values is 3.
The number of nodes per electrode spacing is 2.
200.00 250.00 1000.00
Number of grid rows in model is 9.
Depth values for model row grid lines are :-
1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00
Depth grid lines extended to 15 lines.
Depth grid lines extended to 15 lines.
Schlumberger array
Number of levels changed from 7 to 6.
Reading of data file is complete.

```

Figura. 3.18. Configuración de la malla del modelo realizado en RES2DMOD.

Junto a estos parámetros, la edición del modelo incluye la profundidad hipotética con la que los muros penetran en el terreno. Esta profundidad, debido a las dimensiones que poseen en superficie, se estima que podrían rondar los 2 m, la anchura de los muros se conoce que es 40 – 50 cm, por lo que se ha sobredimensionado a 2 m que podrían ser los que se presenten en las anomalías captadas por el equipo. Ver Figura 3.19.

Por último, pero no menos importante, se ha propuesto una pequeña anomalía en los primeros metros en la región superior derecha del modelo como vegetación y otras 2 simbolizando cambios no importantes de litología y ruido. Ver Figura 3.19.

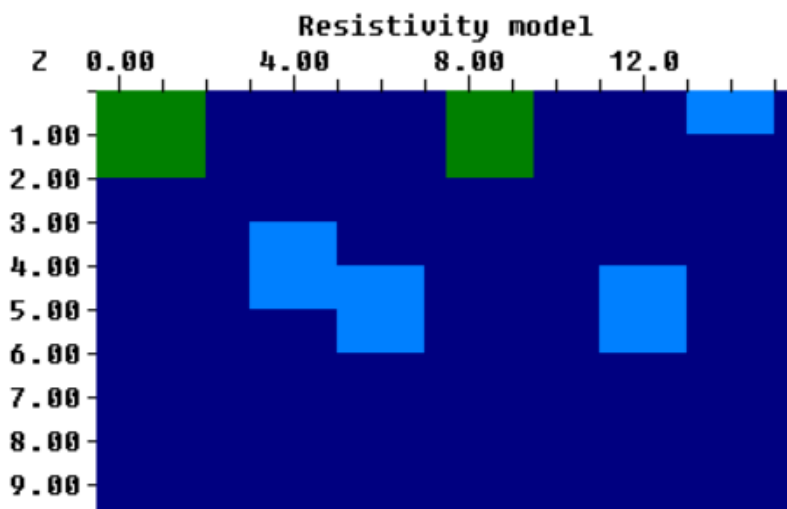
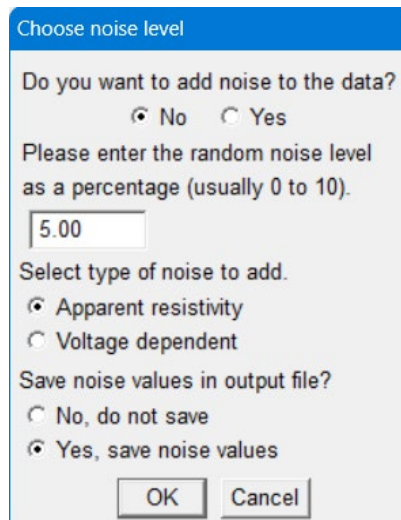


Figura. 3.19. Modelo teórico del perfil para obtención de la pseudosección en RES2DMOD.

Este modelo permitirá cambiar las configuraciones electrónicas dentro del programa para obtener las posibles mejoras en los resultados de las pseudosecciones tanto para una configuración Wenner – Schlumberger, como para Dipolo – Dipolo.

En ambos casos, manualmente se han introducido algunos valores para simbolizar elementos que puedan perturbar las medidas. Es importante que al guardar el modelo se indique un porcentaje de ruido introducido en el modelo, en este caso un 5%, ya que permitirá simular las condiciones bajo las cuales se trabajará en campo, tal como se muestra en la Figura 3.20.



Choose noise level

Do you want to add noise to the data?

☒ No ☐ Yes

Please enter the random noise level as a percentage (usually 0 to 10).

5.00

Select type of noise to add.

☒ Apparent resistivity
☐ Voltage dependent

Save noise values in output file?

☐ No, do not save
☒ Yes, save noise values

OK Cancel

Figura. 3.20. Elección de porcentaje de ruido al modelo creado.

Finalizado estos procesos, los resultados de los modelos de las pseudosecciones para los dispositivos Wenner – Schlumberger (a) y Dipolo – Dipolo (b) se muestran en la Figura 3.21.

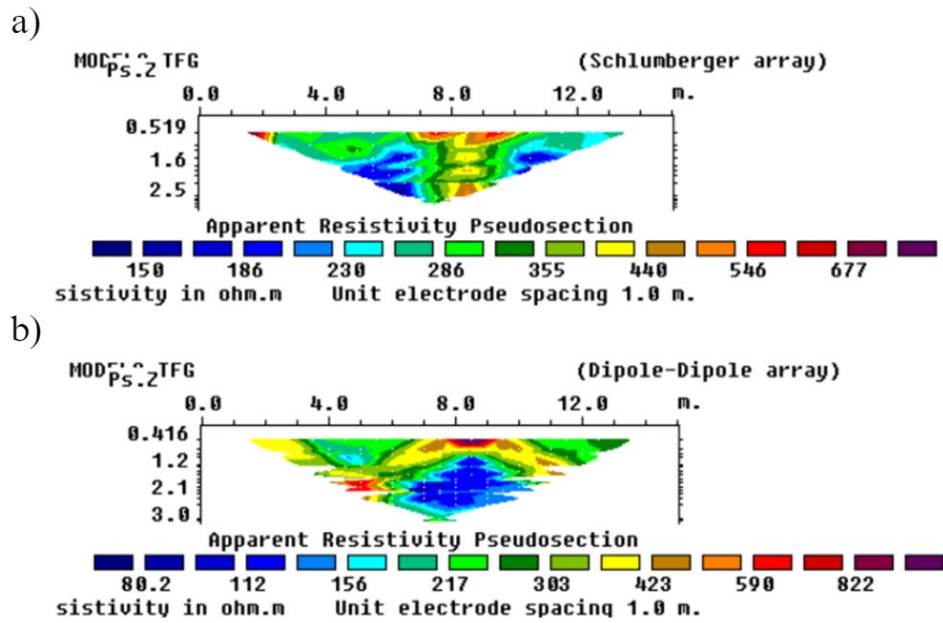


Figura. 3.21. a) Pseudosección para dispositivo Wenner – Schlumberger. b) Pseudosección para dispositivo Dipolo – Dipolo. Obtenido del modelo teórico creado en RES2DMOD.

En base a esta modelización se propone la configuración electródica que se va a utilizar tanto en el dispositivo Wenner-Schlumberger como Dipolo-Dipolo, que se describe en el siguiente punto.

3.4. *Día 3 y 4: Campaña de campo en el área de estudio*

3.4.1. *Planificación de la campaña*

Para poder cubrir mejor la zona, dado el desconocimiento de las direcciones y el avance longitudinal del muro, se decidió abarcar una la superficie de estudio hasta donde ya no son perceptibles.

Previamente a la toma de medidas, con cinta métrica y estacas, se ha realizado una malla para delimitar la zona de trabajo y cómo guía para la disposición de los electrodos. En la Figura 3.22. se muestra la malla que se ha diseñado, estableciendo un paralelogramo de 15 x 15 metros con un espaciado entre electrodos de 1m.

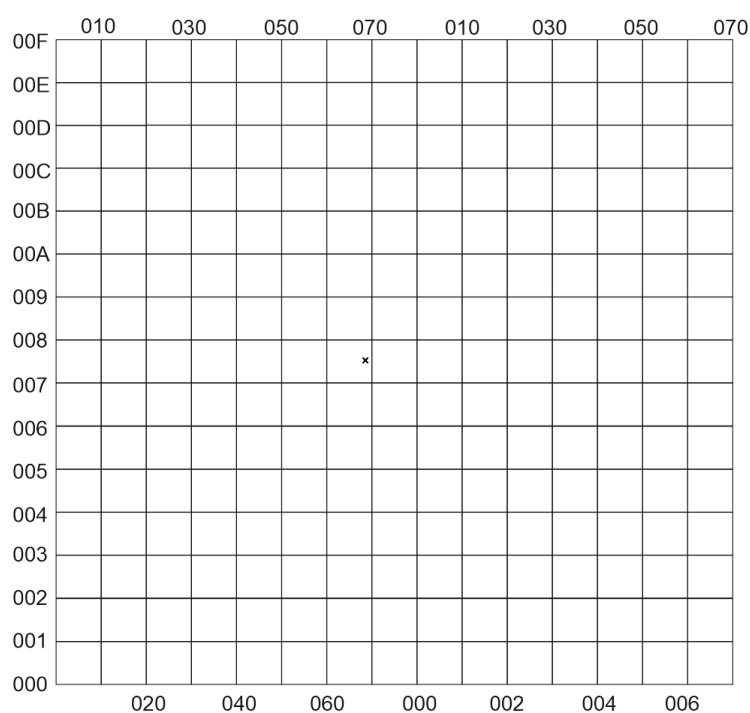


Figura. 3.22. Cuadrícula.

Dada la extensión total del área a cubrir y el número de familias de electrodos disponibles (7 familias de cables, 128 electrodos), se optó por realizar las medidas en dos fases, dividiendo la superficie a investigar en dos cuadrículas iguales, siendo la primera campaña la correspondiente a la región sur. Ver Figura 3.23. Anexo 7 y 8.

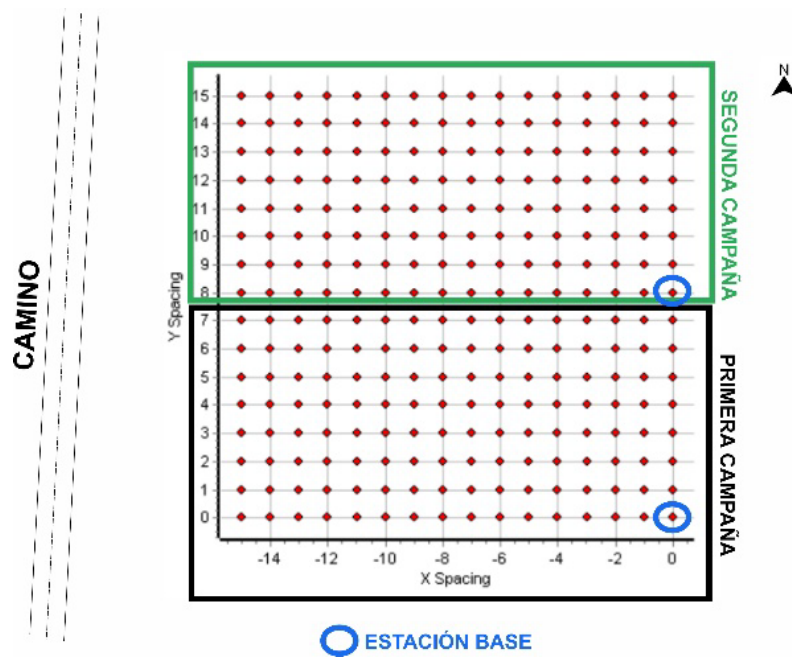


Figura. 3.23. División del área de trabajo en dos campañas.

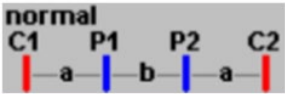
En gabinete, además de la realización de la malla sobre la que se dispondrían los electrodos se determinó que, en esta cuadrícula, se dispondrían 7 perfiles encadenados con un AB de 15 m y un total de 128 electrodos. El voltaje de inyección será de 24 Voltios con un tiempo de inyección de 256 ms y de retardo de 128 ms a un intervalo de 128 ms.

En base al modelo obtenido con RES2DMOD, se definió la configuración a utilizar en los dispositivos Wenner – Schlumberger y Dipolo – Dipolo, igual para ambos casos con la geometría del campo es la que se muestra en la Figura 3.24.

Fiel Geometry		
Inline	Crossline 1	Crossline 2
Min X.... 0	Min Y.... 0	Min Y.... 8
Max X.... 15 m	Max Y... 7	Max..... 15
Delta X: 1 m	Delta Y: 1 m	Delta Y: 1 m

Figura. 3.24. Geometría del campo para días 3 y 4.

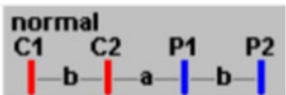
Para el dispositivo Wenner – Schlumberger, la configuración de los electrodos que se introducirá en el tomógrafo será la que se presenta a continuación:



Wenner-Schlumberger			
Dipolo de corriente (a)		Dipolo de potencial (b)	Profundidad (m)
min	max		
1	7	1	2 m
1	6	2	2 m

Tabla 3.1. Configuración electródica Wenner-Schlumberger.

Por otro lado, con el dispositivo Dipolo – Dipolo se optó por la siguiente configuración a introducir en el tomógrafo:



Dipolo-dipolo			
Dipolo de corriente (a)		Dipolo de potencial (b)	Profundidad (m)
min	max		
1	13	1	2
1	11	2	2

Tabla 3.2. Configuración electródica dipolo-dipolo.

3.4.2. Montaje del dispositivo

Para el montaje del dispositivo, en base al estaquillado previamente realizado, con la cinta métrica se han ido posicionando y clavando los electrodos (espaciado de 1 metro) en base al esquema diseñado. Ver Figura 3.25.



Figura. 3.25. Colocación de cinta métrica para medir la distancia entre estacas.



Figura. 3.26. Tensión de cinta métrica para comprobación de alineación de los electrodos.

Se elaboró un esquema aproximado del muro aflorante, determinando las zonas de mayor interés para el estudio de sus valores, destacándose 3 zonas (Ver Figura 3.27.):

- Muro A: región Sur-Este del paralelogramo.
- Muro B: región Sur-Oeste del paralelogramo.
- Muro C: región central del paralelogramo.

Así mismo, fue registrado el código de la caja de cada electrodo localizado en alguna de las regiones de interés del muro para el estudio de dichos valores. Ver Figura 3.27.

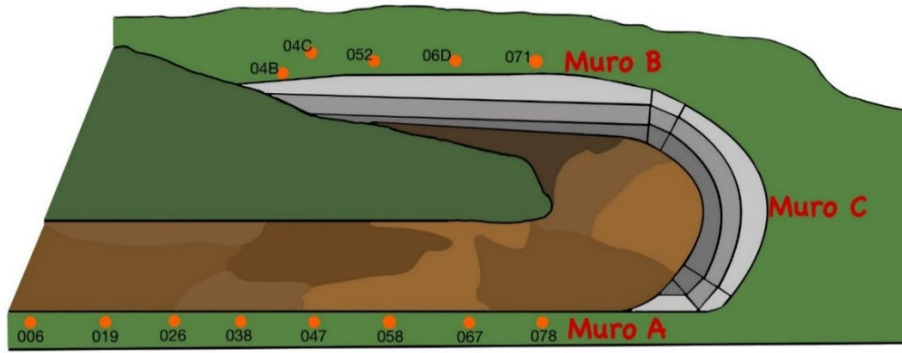


Figura. 3.27. Esquema de regiones de interés y electrodos ubicados en los muros.

Una vez colocados los electrodos, se realizó el mismo procedimiento de instalación del cableado explicado en el Día 1 en la puesta a punto realizada en la EPSL, conectando los cables a modo de Zigzag y ubicando la estación de base en el punto 0. Las direcciones tomadas para la campaña se pueden apreciar en el esquema de la Figura 3.28.

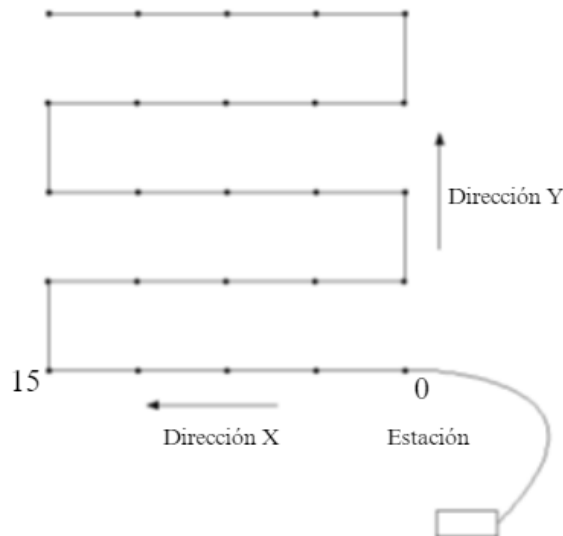


Figura. 3.28. Esquema de instalación del dispositivo y ubicación de la estación base.

Para el día 3 (de medidas en el campo), el resultado de la ubicación de los electrodos y la conexión de los mismos con el cable se puede apreciar en a) Figura 3.29., en la que se han distribuido de tal manera que la malla proyectada pudiese abarcar la zona donde se encuentran emplazados los muros y las posibles prolongaciones que estos tengan en el subsuelo en todas las direcciones. Se ha observado que, durante el montaje, a pocos metros de donde se localizan los muros, se encontraban ciertos desniveles en el terreno,

los cuales se deben a puestos de caza según la información facilitadas por el propietario del terreno.

Tras la colocación de los electrodos, los cables y la conexión al equipo de medida, se procedió a realizar las medidas según las configuraciones proyectadas. Véase b) Figura 3.29.



Figura. 3.29. a) Distribución y conexión de electrodos en el terreno de estudio para el día 3. b) Introducción de parámetros de estudio en el tomógrafo para el día 3.

Las particularidades del día 4 (segundo día de medidas de campo), en cuanto al posicionamiento de los electrodos son:

- Se prosigue las medidas realizando un Roll-Along para cubrir la zona norte. En esta zona se debía tener especial precaución con la vegetación existente, ya que estas pueden afectar algunas medidas y entorpecer la colocación de los electrodos. Por tal motivo, se procedió a realizar un desbroce del monte bajo que cubre el área de trabajo.
- Posicionamiento de la estación 0 en la misma ubicación dentro del área de medida que la del día 3, para darle unidad al proyecto en el momento de la interpretación de los datos.

Como ya se ha indicado, se seguirán utilizando los parámetros de medida y configuraciones electrónicas según lo descrito en el apartado 3.4.1. El posicionamiento de los electrodos en el día 4 se muestra en a) Figura 3.30. y la adquisición de los datos realizada por el tomógrafo se observa en b) Figura 3.30.



Figura. 3.30. a) Distribución y conexión de electrodos en el terreno de estudio para el día 4. b) Introducción de parámetros de estudio en el tomógrafo para el día 4.

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PROSYS III

Una vez obtenidos los datos desde el programa RESECS II, se realizará el tratamiento de los mismos en el software PROSYS III. La primera acción será exportar los archivos de RESECS II y comenzar con la corrección de las medidas para poder representarlas gráficamente.

Al obtener la tabla en la que aparece la posición de cada uno de los electrodos y realizar su representación dentro de una malla, se tuvo que realizar un cambio en las coordenadas x de los datos, debido a que no coincide la disposición de los nodos con la malla planteada al inicio de la campaña. Por tal razón, se realizó un cambio en negativo de las coordenadas x, que van desde 0 (estación inicial) hasta -15. Ver Figura 4.1.

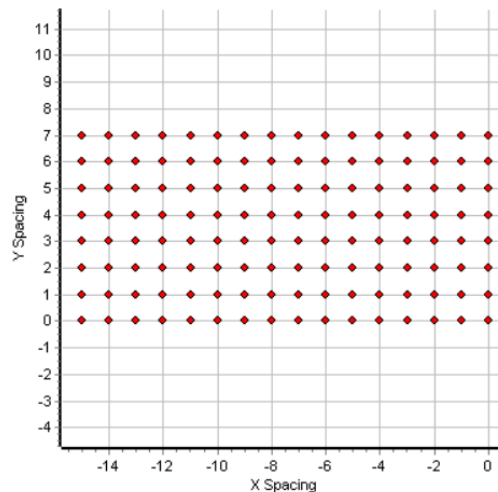


Figura. 4.1. Cambio en negativo de coordenadas x.

Seguidamente, hay que destacar otro cambio relevante realizado con las medidas de campo, que fue la trasposición de coordenadas x en las filas pares dado que estas aparecían con las coordenadas modificadas, como se indica en la Figura 4.2. Esta alteración en las medidas podría provocar un cambio drástico en la representación gráfica, dado que aquellas anomalías que se presenten a la izquierda de la malla, serían representadas al lado derecho en las gráficas.

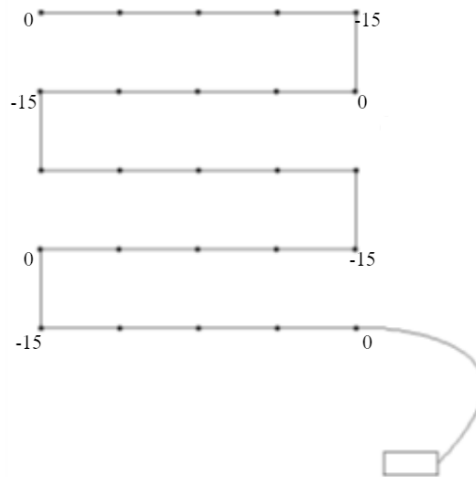


Figura. 4.2. Representación de las coordenadas x que el equipo ha medido en campo.

Una vez realizada esta corrección, se añadirán las cotas topográficas obtenidas del MDT025 del Instituto Geográfico Nacional y la posterior orientación en el espacio a partir de estas cotas topográficas añadidas. Ver Figura 4.3.

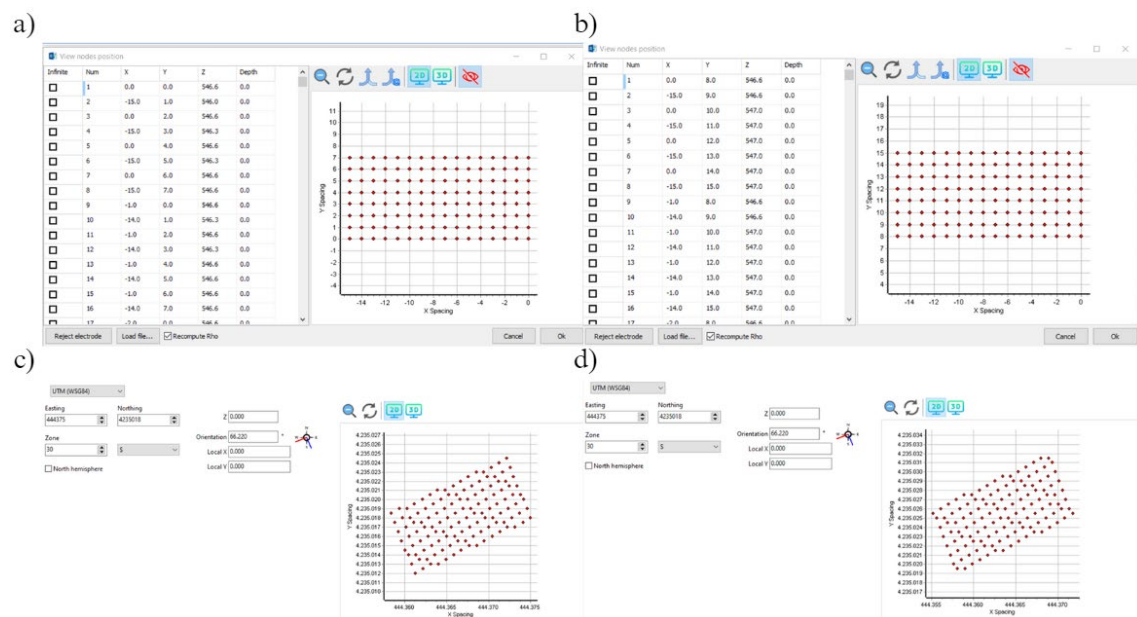


Figura. 4.3. a) adición de cotas topográficas de región sur. b) adición de cotas topográficas en región norte. c) orientación de medidas región sur. d) orientación de medidas región norte.

Ya corregidos y orientados los datos, se unirán los archivos para cada configuración, para obtener dos archivos finales; uno para la configuración Wenner – Schlumberger y otro para Dipolo – Dipolo. Seguidamente, se realizará un filtrado de los datos realizando una revisión de aquellos valores que se encuentren fuera de la media de valores de resistividad más próximos a este.

El filtrado permitió detectar las medidas erróneas, eliminando aquellos valores con resistividades negativas y resistividades con valores demasiado altos. Tras el filtrado, se pasó de tener 2.511 datos en la configuración Dipolo – Dipolo a 2.023 datos, mientras que el dispositivo Wenner – Schlumberger se ha pasado de tener 1.427 datos a 1.274. Igualmente, se hizo un filtrado de los valores de mA, mV, distancias, entre otros, como se muestra en la Figura 4.4.

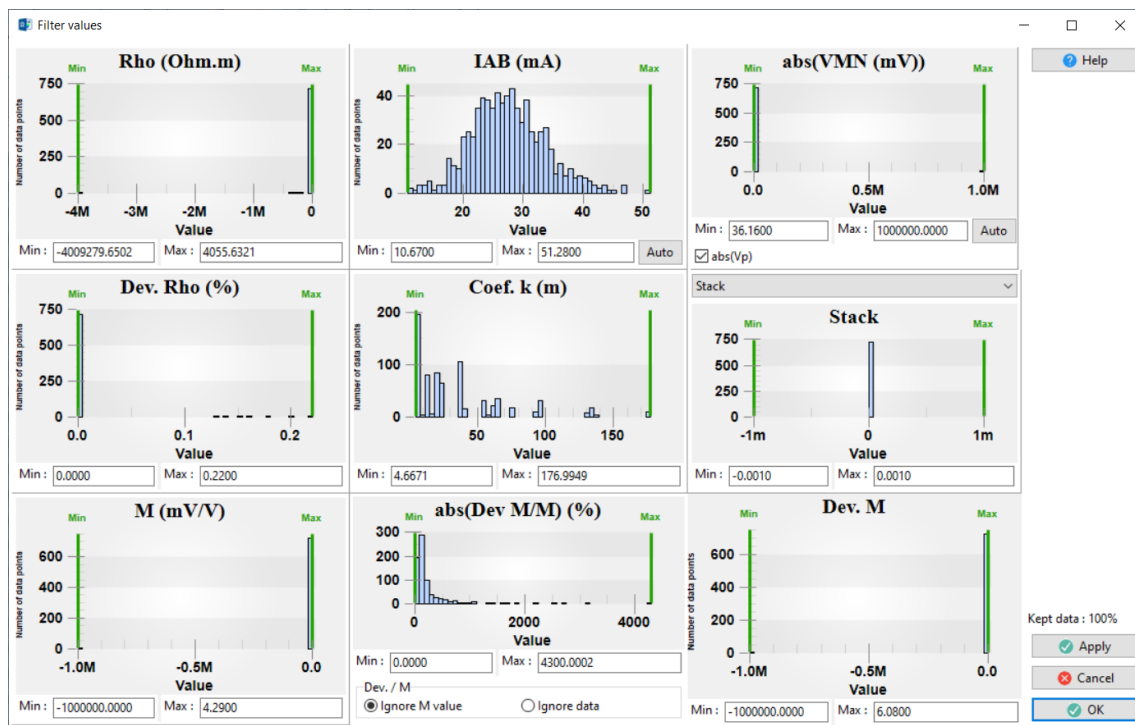


Figura. 4.4. Panel para revisión y realización del filtrado de datos.

Siguiendo con el procedimiento, ya filtrados los datos se exportará a un archivo con la extensión .dat, para que dichos datos puedan ser utilizados por los softwares RES2DINV y RES3DINV.

4.2. Comparativa de datos obtenidos en RES2DMOD y RES2DINV para el perfil 6 y 7.

Los resultados obtenidos a partir del modelo teórico obtenido de la inversión realizada en RES2DINV a partir de lo creado en RES2DMOD, muestran para cada una de las configuraciones electrónicas a) Wenner – Schlumberger y b) Dipolo – Dipolo. Ver Figura 4.5.

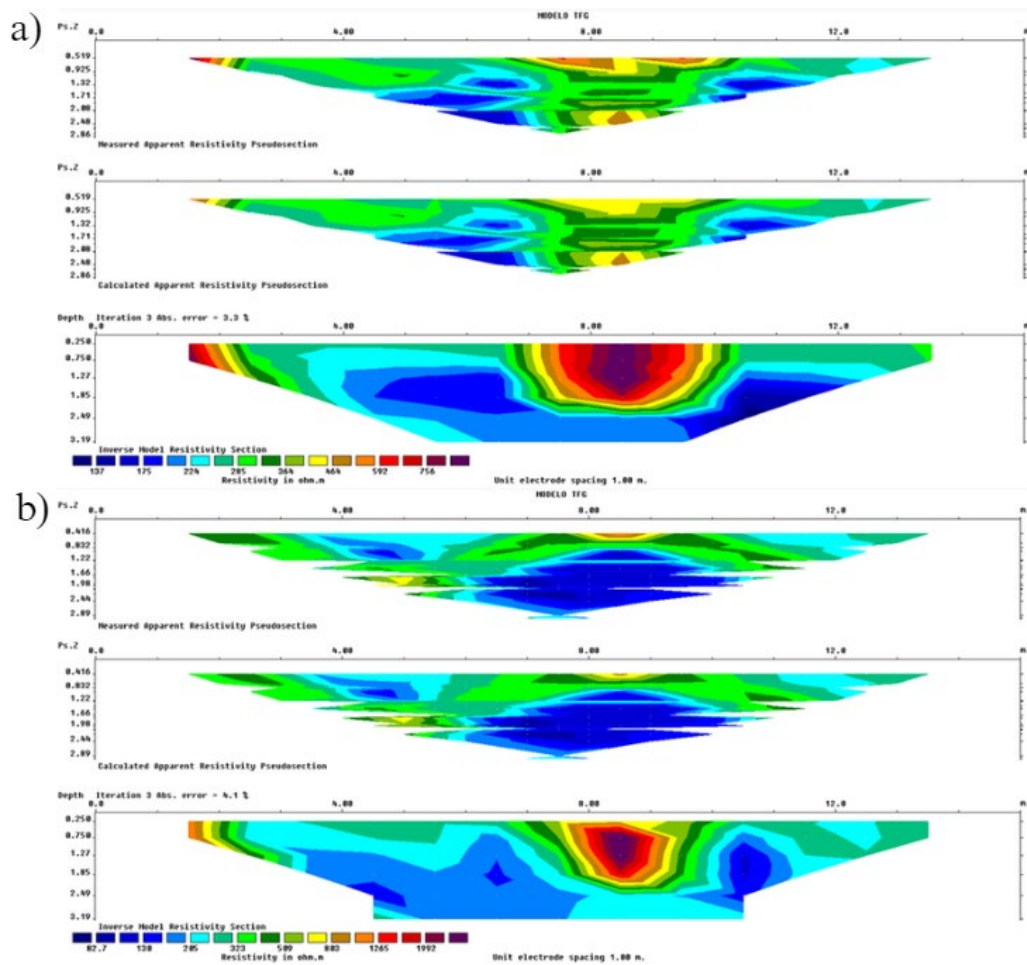


Figura. 4.5. a) Resultado de la inversión con el dispositivo Wenner – Schlumberger. b) Resultado de la inversión con el dispositivo Dipolo – Dipolo. Obtenido del software RES2DINV a partir del modelo teórico creado en el programa RES2DMOD.

Se obtuvo como resultado con el software Surfer la resistividad real del perfil de campo 7 para los datos de campo y los datos teóricos (RES2DMOD).

Para el dispositivo Wenner – Schlumberger, se aprecia que los datos teóricos se encuentran bastante sobredimensionados en comparación con la anomalía real, teniendo una menor profundidad en el eje Z y menor anchura en el eje X. Un dato interesante por comentar es la anomalía que se presenta en el límite izquierdo del perfil, en el modelo teórico no se presenta con tanta amplitud, mientras que en real se ve una mayor proporción de una resistividad de 1.000 Ωm . Ver Figura 4.6.

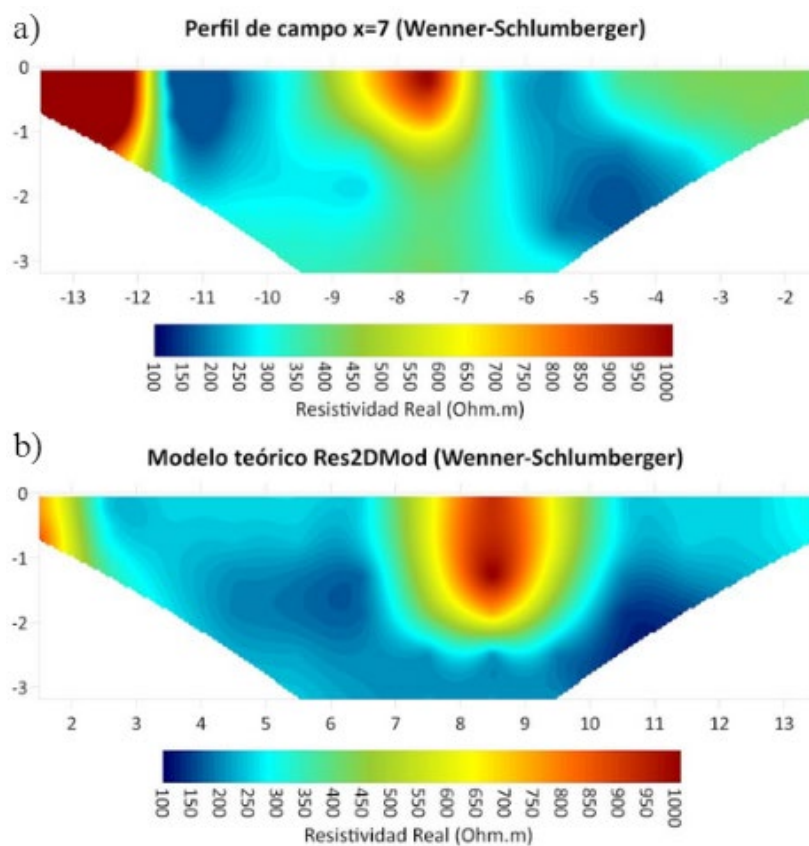


Figura. 4.6. a) Resistividad real del perfil 7 de los datos de campo con el dispositivo Wenner – Schlumberger. b) Resistividad real del modelo teórico del perfil 7 con el dispositivo Wenner – Schlumberger.

Por otro lado, con el dispositivo Dipolo – Dipolo, la anomalía coincide en gran medida con la planteada en el estudio teórico, con una diferencia considerable en la profundidad en el eje Z, siendo mayor la del modelo teórico a la que realmente se presenta en campo. Nuevamente, existe mayor presencia de la anomalía que se encuentra en el límite izquierdo del perfil que, a diferencia del modelo teórico, abarca una gran amplitud en el eje X. Ver Figura 4.7.

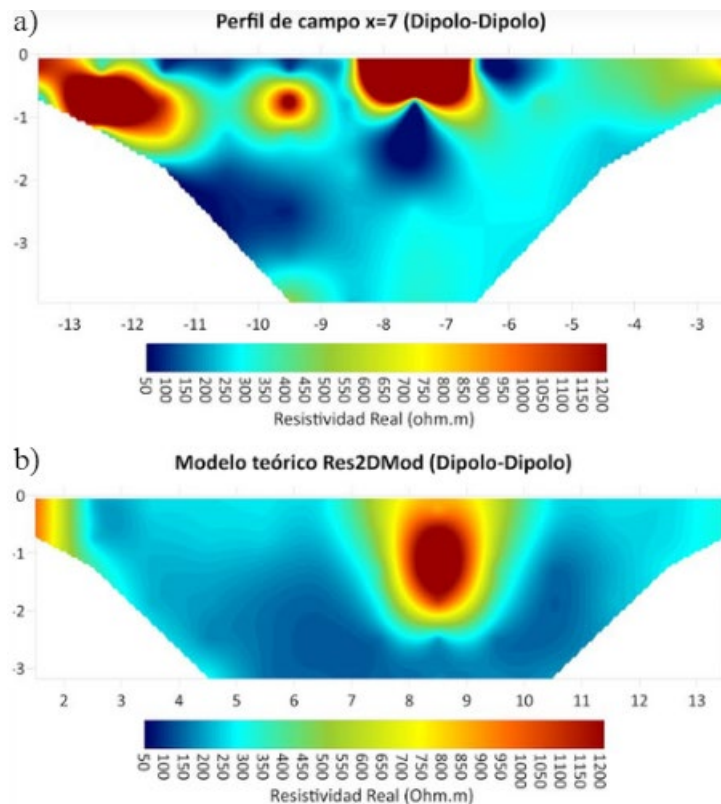


Figura. 4.7. a) Resistividad real del perfil 7 de los datos de campo con el dispositivo Dipolo – Dipolo. b) Resistividad real del modelo teórico del perfil 7 con el dispositivo Dipolo – Dipolo.

4.3. Inversión de datos en RES3DINV

Al importar los datos obtenidos de PROSYS III, se calculará directamente la inversión, debido a que los filtros y demás correcciones ya se han realizado en el proceso de corrección de datos.

4.3.1. Configuración Wenner-Schlumberger

Se empezará el análisis de la configuración eléctrica Wenner – Schlumberger con los perfiles obtenidos de las coordenadas (X, Y). El resultado obtenido con el proceso de inversión, se ha ejecutado en un total de 5 iteraciones, definiéndose en un total de 6 perfiles con un error del 4,65%.

Los valores anómalos de resistividad, se aprecian únicamente en 3 de los 6 perfiles, por tanto, el análisis de su amplitud y medida, será realizado con ellos. Estos perfiles son: 0 a 0,50 m (Layer 1), 0,50 a 1,08 m (Layer 2) y 1,08 a 1,74 m (Layer 3). Ver Figura 4.8.

Se observa que los valores más resistivos, tanto para las coordenadas X como para las coordenadas Y, se encuentran entre los siguientes rangos:

- De -15 a -11,5 m y de -9 a -6,7 m para el eje X.
- De 1,5 a 8 m en el eje Y.

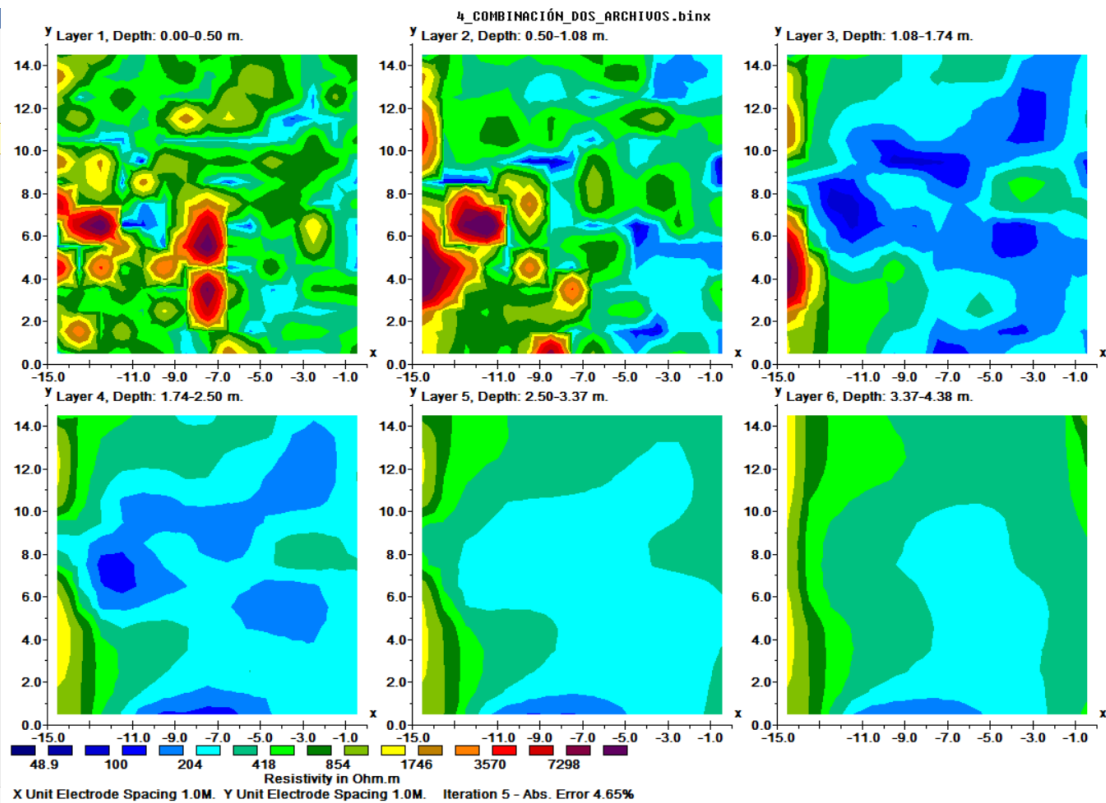


Figura. 4.8. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Wenner - Schlumberger de los perfiles con coordenadas (X, Y).

Los siguientes resultados obtenidos para esta configuración, son los correspondientes a los perfiles con coordenadas (X, Z), en los cuales se pueden evidenciar que las resistividades anómalas de mayores valores van desde el perfil 1 hasta el 8, cumpliéndose los rangos aportados de las coordenadas en X y una profundidad máxima en Z de 1,5 m. Ver Figura 4.9.

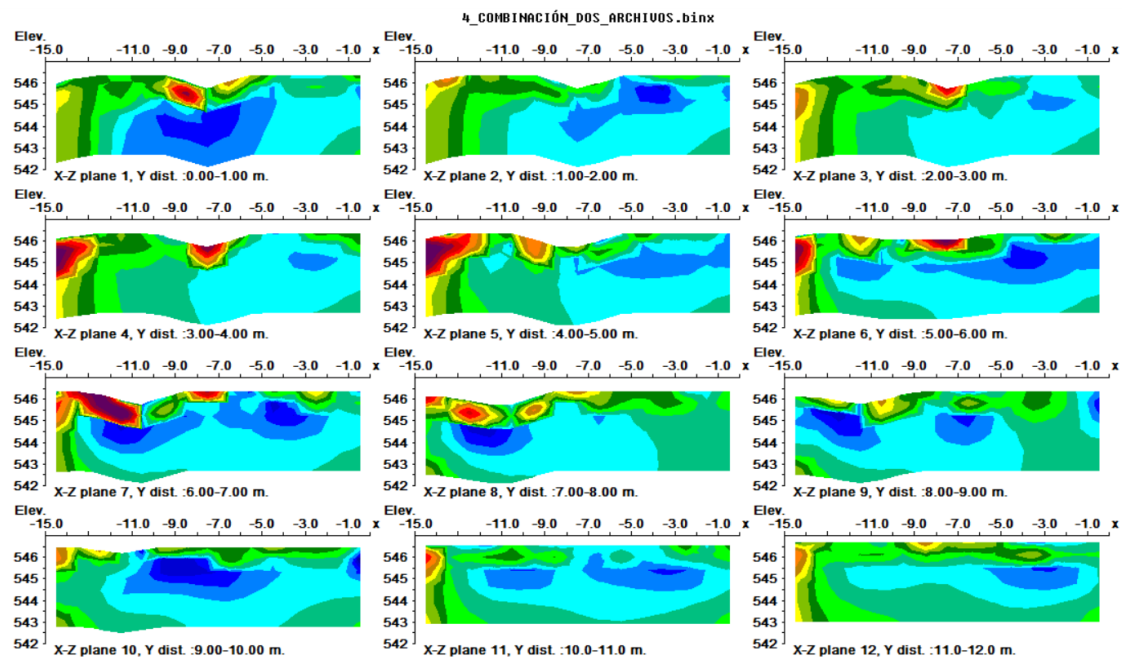


Figura. 4.9. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Wenner – Schlumberger de los perfiles con coordenadas (X, Z).

Por último, la representación de los perfiles para las coordenadas (Y, Z) las anomalías se perciben desde los perfiles 1 hasta el 8. En amplitud concuerdan con lo expuesto en las coordenadas (X, Y) y la profundidad en Z alcanza, al igual que el anterior, los 1,5 m. Ver Figura 4.10.

Una observación importante a comentar es con respecto al perfil 5, en el que se observa un bajo contraste entre la resistividad del terreno y la del muro, por lo cual, podemos concluir una de las dos opciones siguientes:

- a) No hay continuidad del muro en la representación del perfil 5, que va de -11 a -10 en la coordenada X.
- b) Existe un fallo en las medidas realizadas con respecto a este perfil.

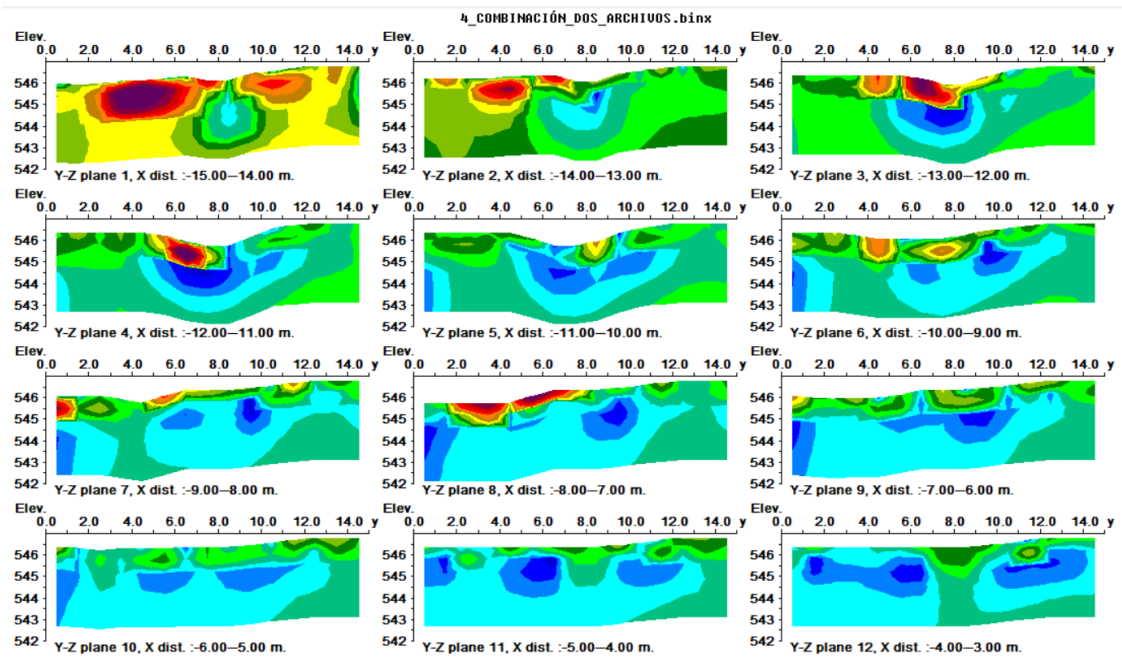


Figura. 4.10. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (Y, Z).

4.3.2. Configuración Dipolo – Dipolo

Para las coordenadas (X, Y) en el dispositivo Dipolo – Dipolo, se muestran los resultados en la Figura 4.11. El cálculo de las resistividades reales se ha realizado con 2 iteraciones, en un total de 7 perfiles y un error del 15,6%, obteniendo las mayores resistividades en los perfiles que van de 0 a 0,4 m (Layer 1) y de 0,4 m a 0,86 m (Layer 2). No se aprecian en los demás perfiles variaciones importantes en la resistividad.

Los perfiles en los que se evidencian anomalías claras son en los perfiles 1 (con mayor intensidad) y el perfil 2.

Estos valores máximos con una resistividad aproximada de $3.057 \Omega\text{m}$ se encuentran ubicados entre:

- De -8,6 y -6,7 metros en el eje X.
- De 1,5 y 8 metros en el eje Y.

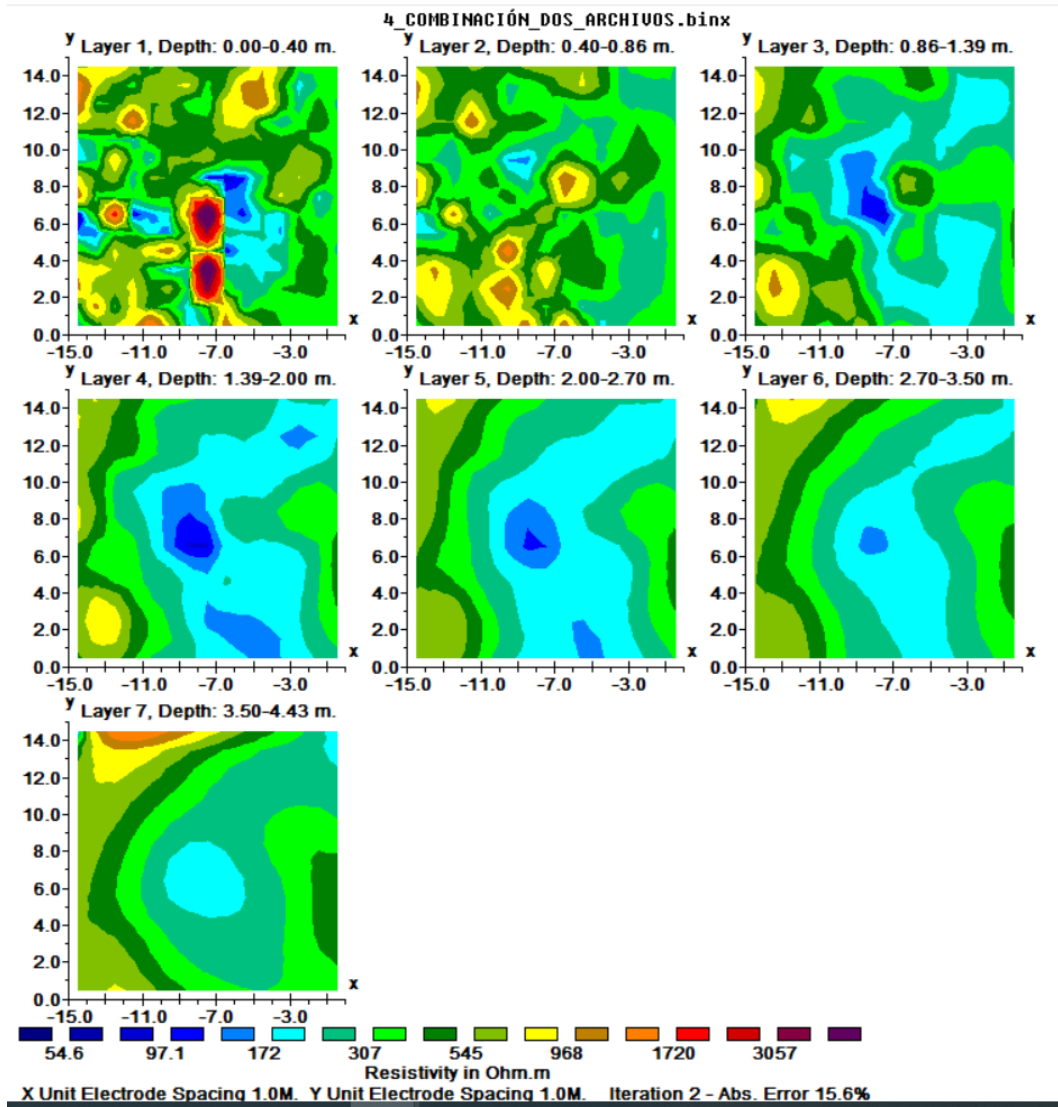


Figura. 4.11. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (X, Y).

Con respecto a los perfiles con coordenadas (X, Z), las alteraciones se presentan en los perfiles que van del perfil 1 hasta el 7. Las resistividades con mayores valores concuerdan con el rango comentado para los perfiles (X, Y) y la profundidad que llegan a alcanzar es de 1,5 m desde la superficie. Ver Figura 4.12.

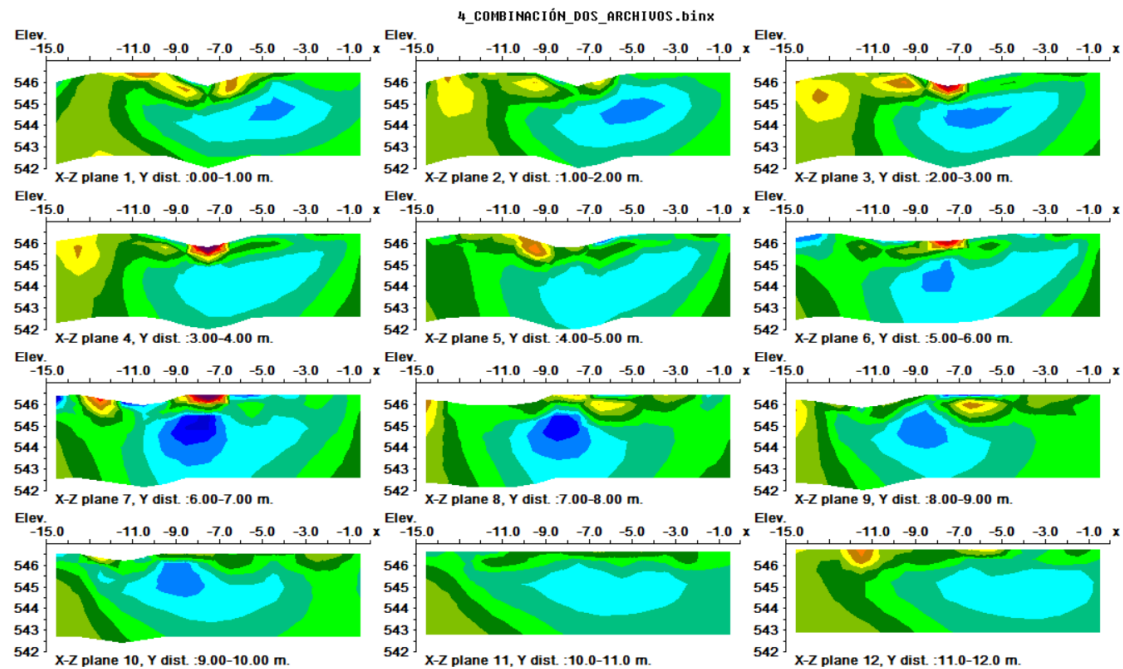


Figura. 4.12. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (X, Z).

El resultado obtenido para las coordenadas (Y, Z) muestran anomalías entre los perfiles 1 hasta el 6. Sin embargo, es en el perfil 8 en donde se encuentran las mayores resistividades registradas por el equipo. Nuevamente, la amplitud en el eje Y concuerda con lo analizado en el perfil (X, Y) con una Z máxima en profundidad de 1,5 m. Ver Figura 4.13.

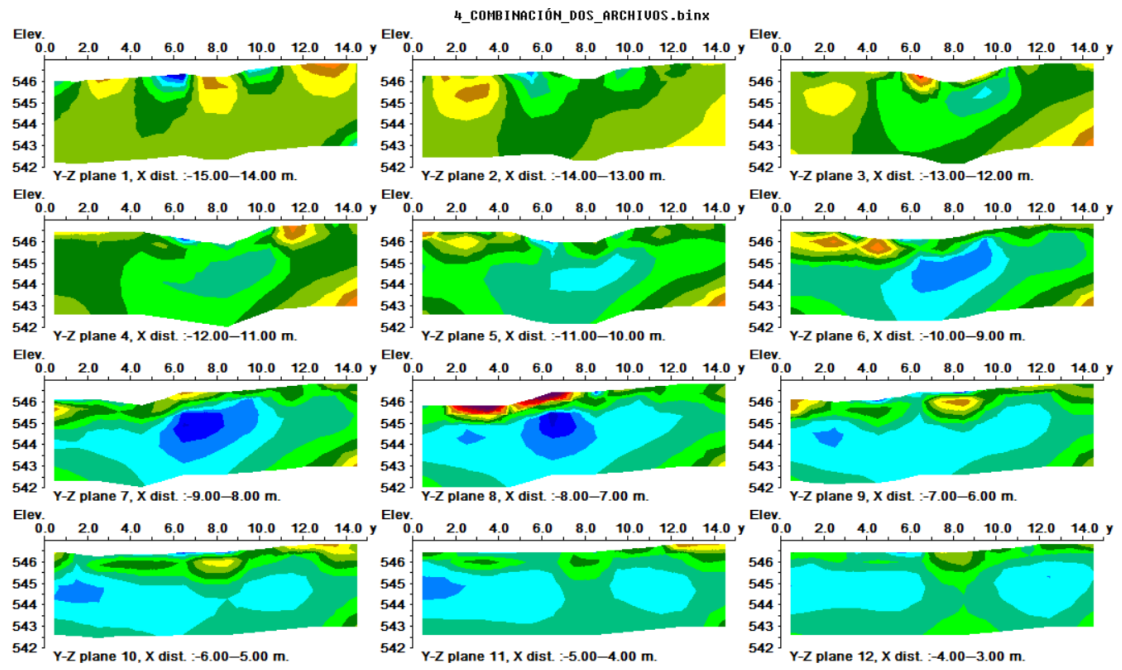


Figura. 4.13. Resultados de inversión con el software RES3DINV para el dispositivo Dipolo – Dipolo de los perfiles con coordenadas (Y, Z).

4.4. Representación del bloque 3D en el software Voxler

Desde el programa RES3DINV se exportarán los resultados obtenidos para poder utilizarlos en Voxler. Las acciones dentro del programa se iniciarán computando un total de 4 archivos con la extensión .dat. Con estos cuatro archivos, que se analizarán a continuación, se pretende comparar los datos en bruto y su representación logarítmica.

La base logarítmica se aplicó a los datos obtenidos del dispositivo Wenner – Schlumberger y Dipolo – Dipolo, para que el análisis de los mismos pueda proporcionar estimaciones más precisas y realistas acerca de las propiedades en el subsuelo, apreciándose las anomalías geofísicas de una manera más eficaz.

4.4.1. Dispositivo Wenner – Schlumberger

4.4.1.1. Resultados en 3D a partir de datos obtenidos en RES3DINV

Tras computar el primer archivo, la primera representación se obtiene con la gráfica “Isosurface” con isovalores a partir de $1.900 \Omega\text{m}$.

En esta capa, se puede observar el comportamiento de las anomalías comentadas en el punto 4.3. del presente documento, siendo Figura 4.14. la representación en alzado. Se confirma que los muros llegan a profundizar en Z un máximo de 2 m con respecto a la superficie. Existe también una anomalía que profundiza más en el terreno con estos valores altos de resistividad, pero se presume que esto sea debido al desnivel del terreno y la proximidad que tienen con el límite izquierdo de la imagen, lo que puede ser una falsa anomalía interpretada erróneamente por el programa.

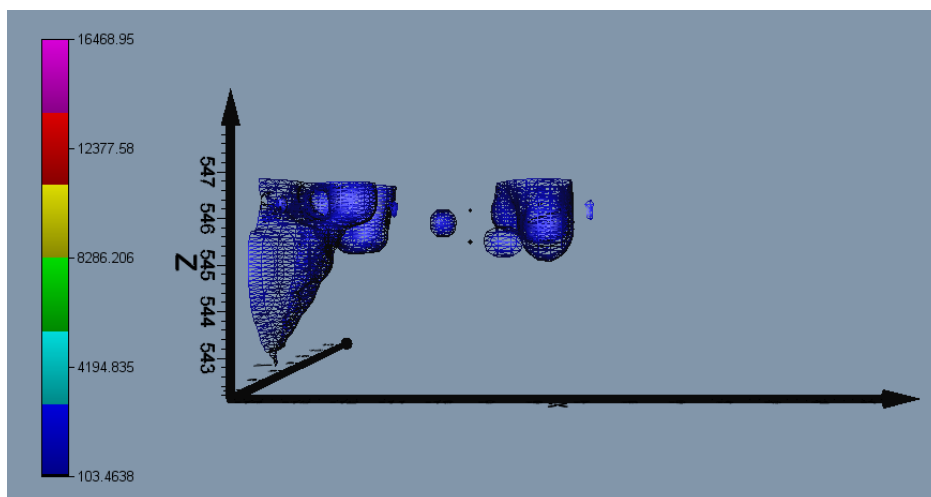


Figura. 4.14. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger.

Por otro lado, en Figura 4.15. se representa la vista en planta del resultado, en donde se diferencian dos sectores. A la derecha se observa una masa importante que va de los -7 m a los -9 m y a la izquierda otra que va de -12,8 m a -15 m en el eje X. La longitud de estos cuerpos en el eje Y se extiende desde los 2 m hasta los 7 m, lo que permite confirmar que los resultados obtenidos en el punto 4.3. de este documento, se aproximan a lo representado en este apartado, con una diferencia de 1 m entre ellos.

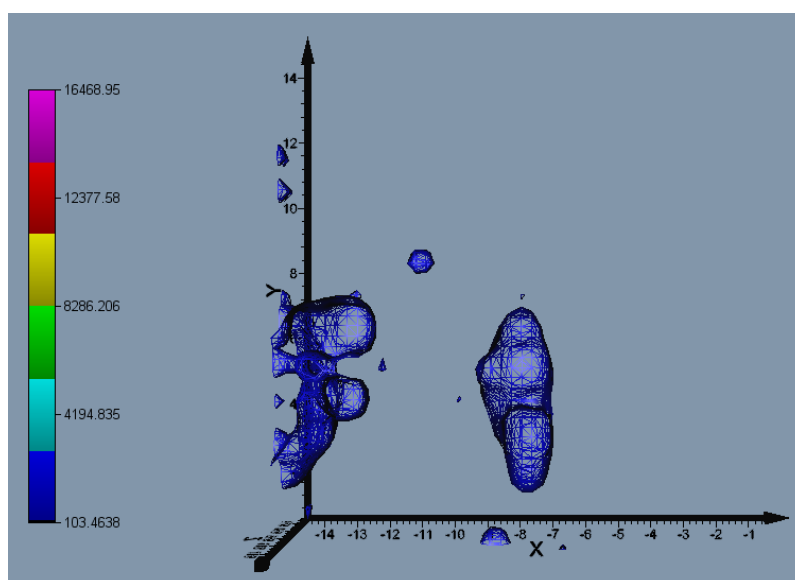


Figura. 4.15. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger.

Finalmente, para esta representación gráfica de isosurface, en la Figura 4.16. se observa una vista del perfil izquierdo tras realizar una corrección de valores que se consideran erróneos.

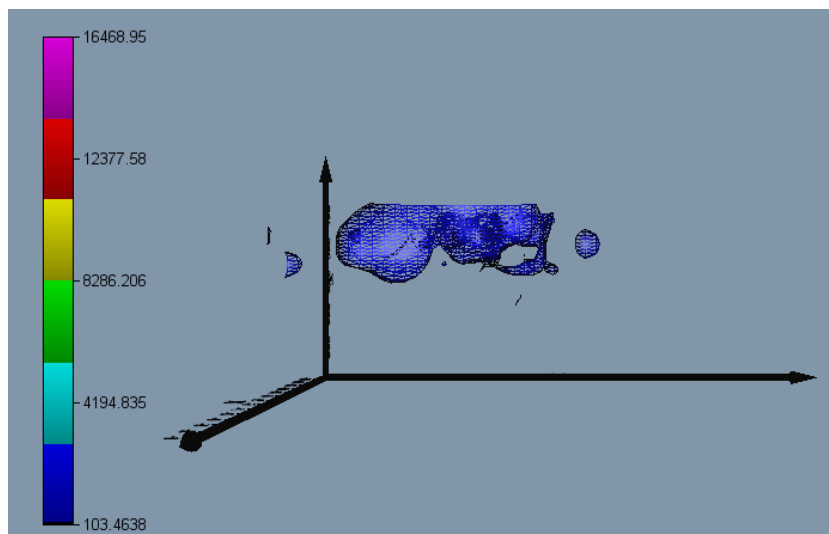


Figura. 4.16. Vista perfil izquierdo del resultado 3D con gráfica "Isosurface" para dispositivo Wenner – Schlumberger.

Otro método gráfico utilizado en esta interpretación ha sido el de mapas de contorno. En este caso, la ventaja que tiene esta representación gráfica es la de poder analizar mediante distintos planos de corte las zonas en las que la anomalía es perceptible y en las que deja de presentarse por completo.

La representación gráfica se refiere al corte axial (XY) que profundizará en los distintos niveles de Z. En la Figura 4.17. se muestran 3 planos de corte axial (XY) en donde:

- a) Las mayores resistividades se registran en la cota 546,1 m.
- b) La anomalía muestra su mínimo perceptible a partir de la cota 545 m.
- c) En la cota 544,8 m la anomalía principal que abarca la longitud -7 m a -9 m en el eje X ha dejado de apreciarse, aunque todavía se muestra en el área limítrofe.

Todos los planos axiales de la Figura 4.17 se han realizado con un total de 9 niveles para apreciar de esta manera valores que podrían no ser tomados en cuenta con un número inferior de capas.

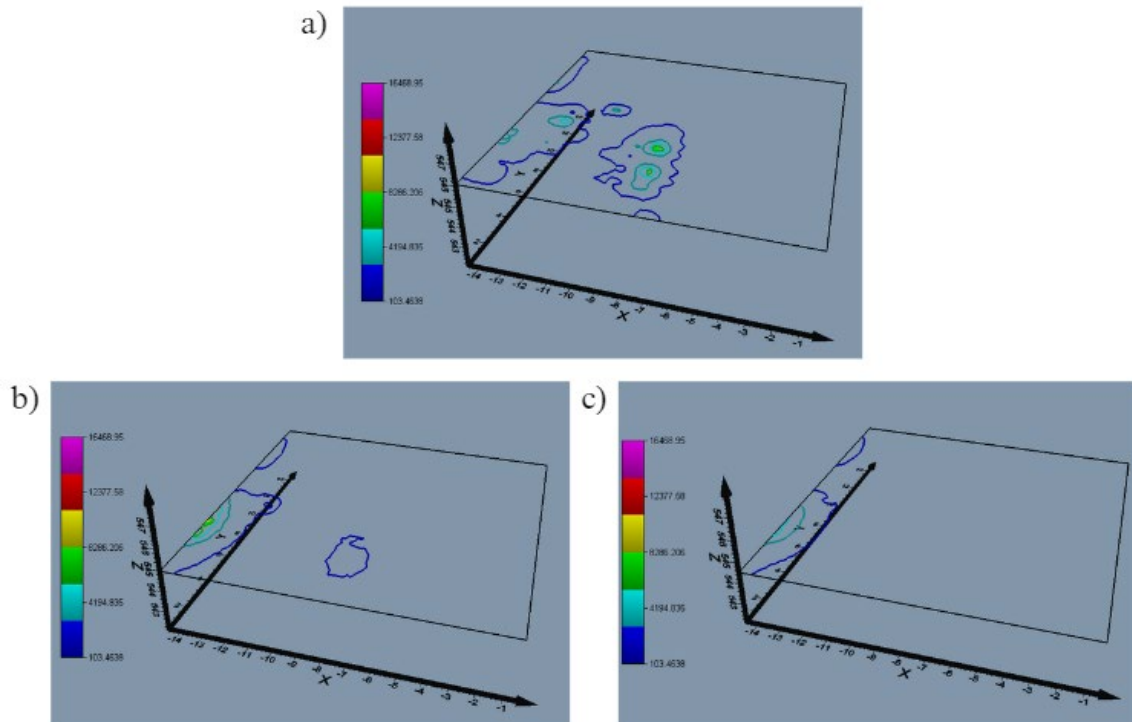


Figura. 4.17. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546,1. b) Plano de corte en cota 545. c) Plano de corte en cota 544,8.

4.4.1.2. Resultados en 3D a partir de datos en base logarítmica

Debido a la mejora considerable de los datos al ser tratados en una base logarítmica, se ha podido aplicar adicionalmente un gráfico 3D en el que se muestra, en un poliedro de base cuadrada del conjunto de los datos obtenidos. Dicho gráfico es el correspondiente a “Facerender” en el software Voxler. Figura 4.18.

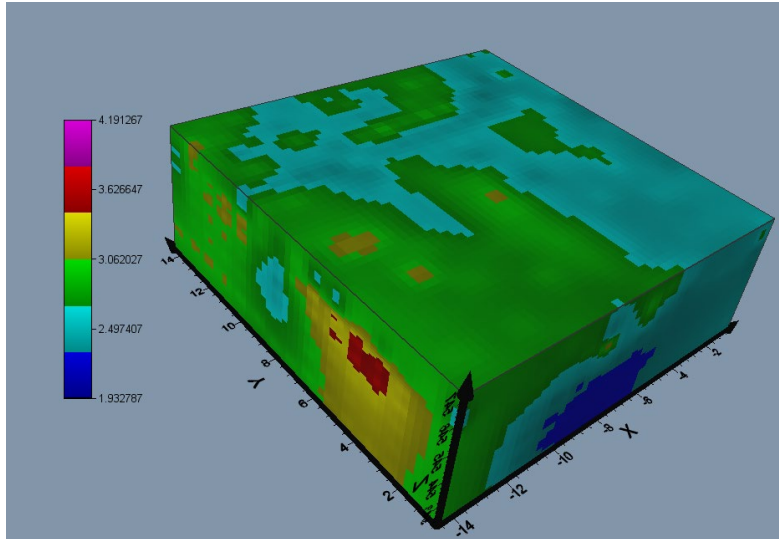


Figura. 4.18. Resultado del gráfico Facerender del software Voxler para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.

La representación con la gráfica “Isosurface” se ha realizado con isovalores de 2,9 Ω m. En este caso se ha realizado la corrección de los errores computacionales del programa y de desniveles del terreno; aunque no ha sido posible la eliminación total de dichos cuerpos (falsas anomalías) por poseer resistividades muy parecidas a la de los cuerpos objeto de estudio, aun así, se han obtenido resultados positivos con estos datos.

La vista en alzado que se muestra en la Figura 4.19. denota, al igual que la anterior, que la cota máxima que se alcanza en profundidad se encuentra en 545 m.

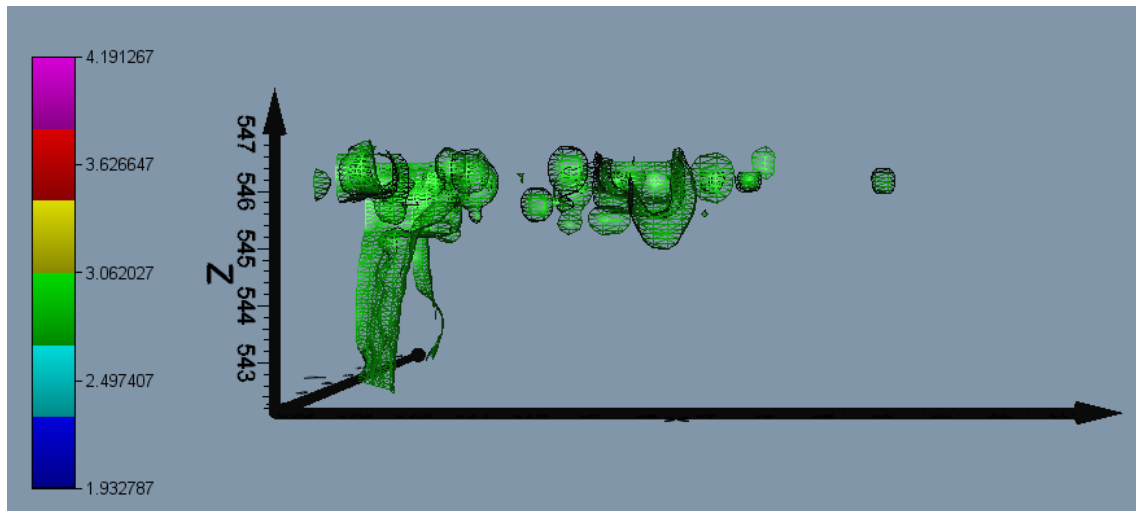


Figura. 4.19. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.

En la vista en planta del resultado para la base logarítmica del dispositivo Wenner - Schlumberger, también se diferencian dos sectores, a la derecha un cuerpo que va de los -7 m a los -9,5 m y a la izquierda otro que va de -11,9 m a -15 m en el eje X. La longitud máxima de los cuerpos en el eje Y se extiende desde los 1,2 m hasta los 8 m, lo que contrastándolo con los resultados obtenidos en el punto 4.3. de este documento, resultan similares entre ellos.

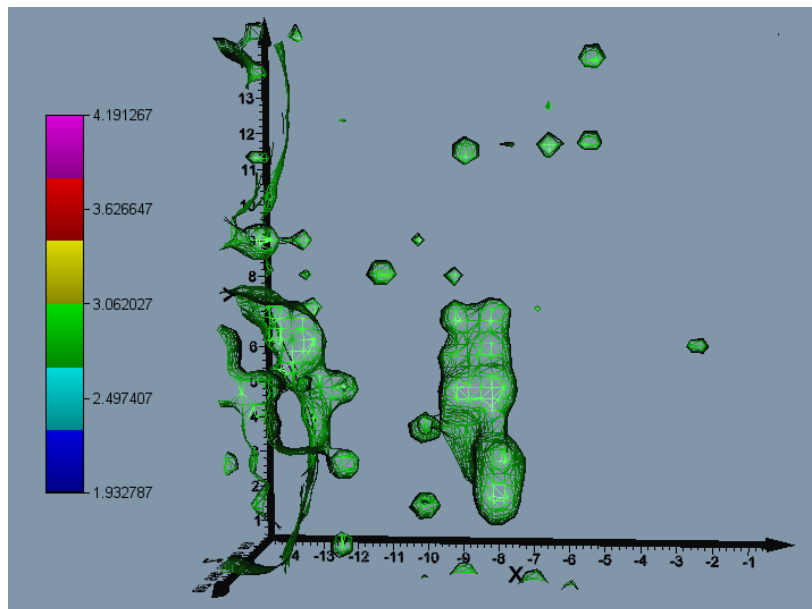


Figura. 4.20. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.

Para completar la definición de la representación 3D con isosurface en este dispositivo, en la Figura 4.21. se plasma la vista del perfil izquierdo de los muros.

A diferencia del perfil del apartado anterior, se pueden apreciar algunas variaciones importantes por la presencia de pequeños puntos con resistividades similares a las del cuerpo de estudio; sin embargo, a causa de su discontinuidad en el espacio se puede argumentar que dichos puntos se deben a ruidos causados por agentes externos en la región norte.

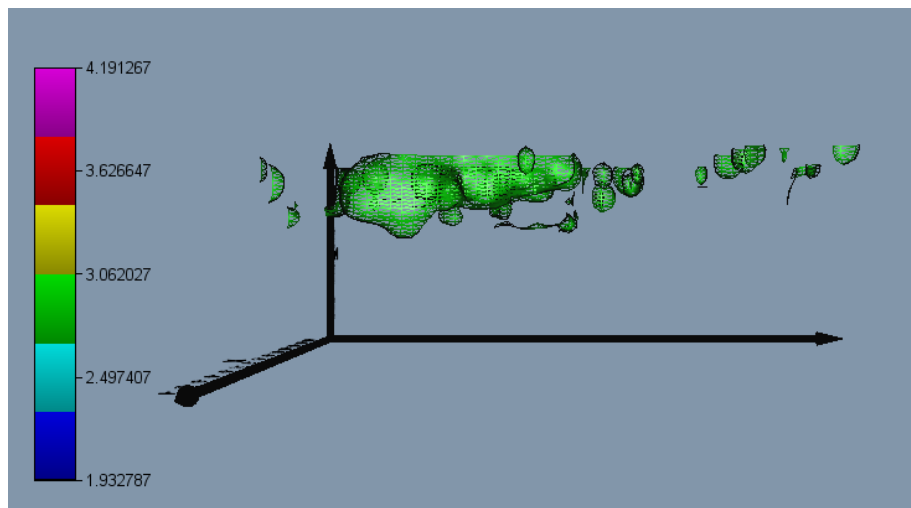


Figura. 4.21. Vista perfil izquierdo del resultado 3D con gráfica "Isosurface" para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.

Por último, en la Figura 4.22, se destacan tres planos de contorno axial (XY) a tres cotas diferentes, 546, 545 y 544.8 m, observándose:

- Las mayores resistividades se registran en la cota 546 m.
- La anomalía muestra su mínimo perceptible a partir de la cota 545 m.
- En la cota 544,8 la anomalía principal que abarca la longitud -7 m a -9,5 m en el eje X ha dejado de apreciarse, aunque todavía se muestra en el área limítrofe.

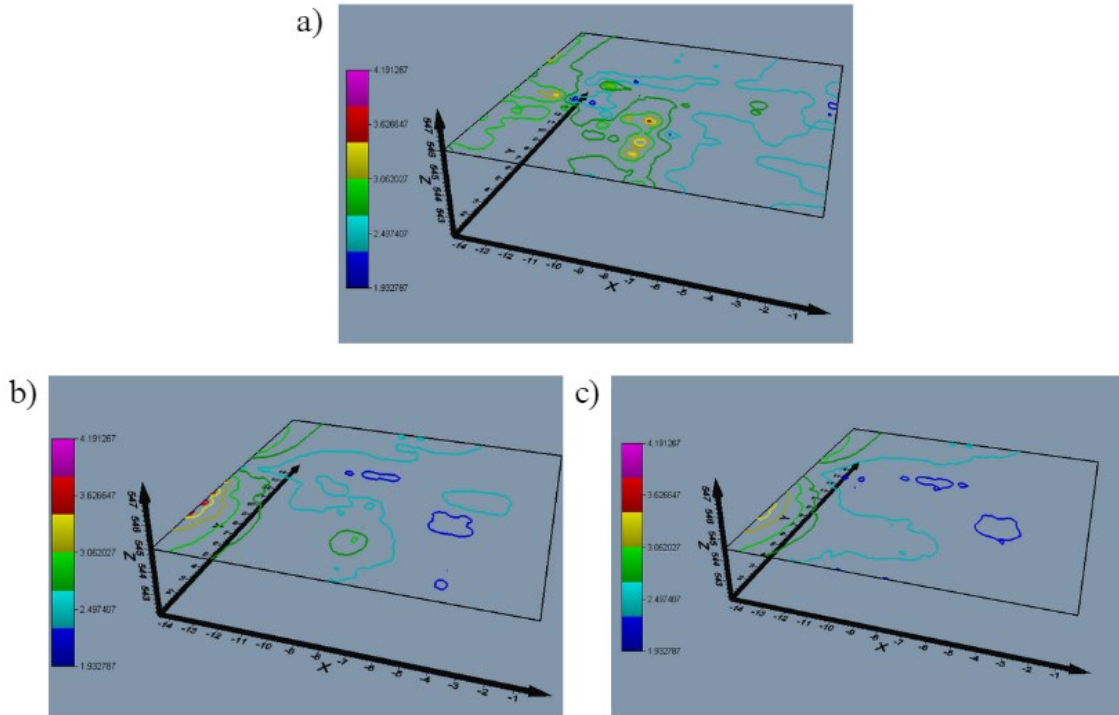


Figura. 4.22. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546. b) Plano de corte en cota 545. c) Plano de corte en cota 544,8.

4.4.2. Dispositivo Dipolo – Dipolo

4.4.2.1. Resultados en 3D a partir de datos obtenidos en RES3DINV

Se iniciará la interpretación con el modelo de “Isosurface” del software Voxler al igual que en el dispositivo anterior. Se partió con isovalores de $1.000 \Omega\text{m}$, ya que a partir de dichos valores se tiene teorizado que aparecerán las anomalías correspondientes a los muros.

El alzado de esta representación, Figura 4.23., exhibe un único cuerpo resistivo que, a diferencia del dispositivo Wenner – Schlumberger, alcanza una profundidad máxima en los 546,6 m. Existe también un cuerpo a partir de la cota 544 m con una altura baja y mayor extensión sobre el eje X, pero dicha anomalía no será analizada puesto que al estar aislada del cuerpo principal no tiene mucha importancia en el estudio.

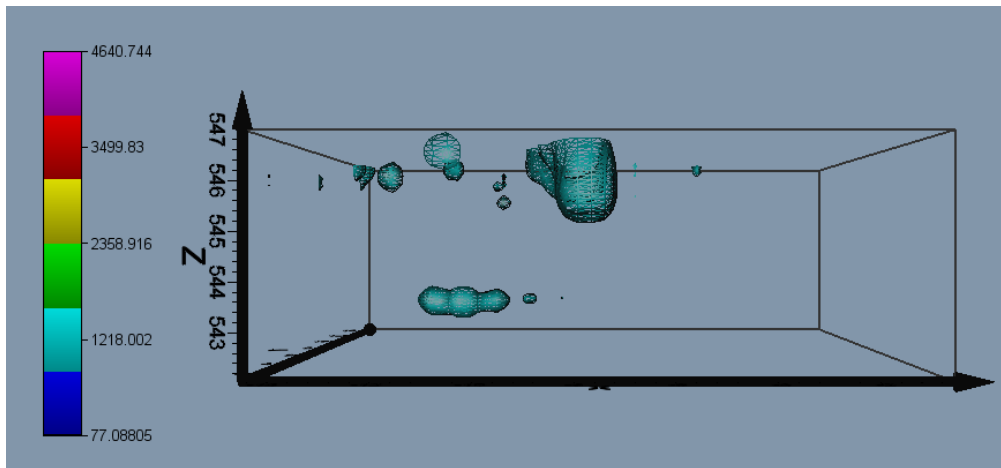


Figura. 4.23. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo.

La vista en planta, en la Figura 4.24, permite realizar los análisis de la distribución de la anomalía tanto en el eje de ordenadas como el de las abscisas. La anchura del cuerpo se corresponde con la analizada en el dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica, con una extensión de los -7 m a los -9,5 m en el eje X. Un aspecto importante a destacar es que la masa que se encontraba en el límite izquierdo no es perceptible para estos valores de resistividad, como sí ocurría en la representación de los isovalores del dispositivo anterior.

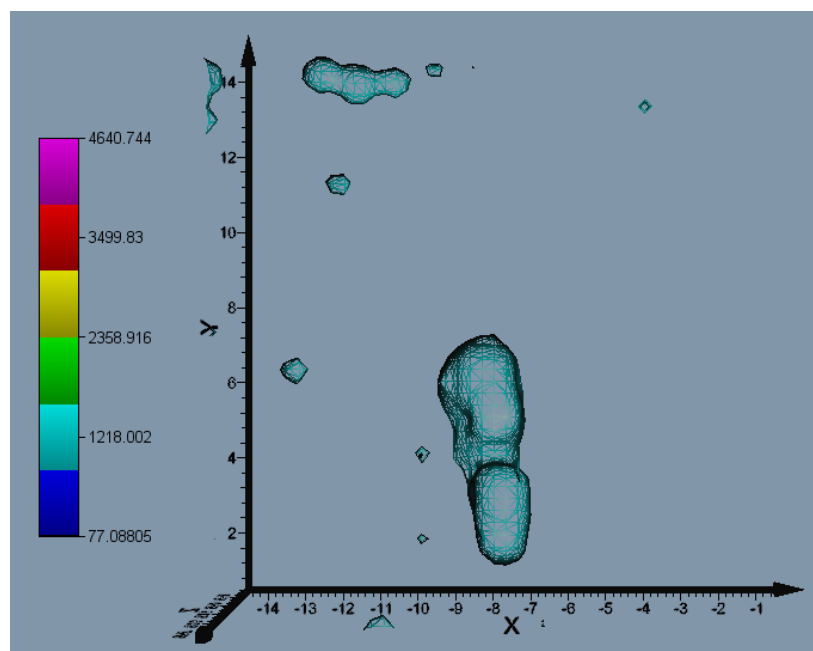


Figura. 4.24. Vista en planta del resultado 3D con gráfica “Isosurface” para dispositivo Dipolo – Dipolo.

Para completar la definición del volumen del cuerpo, en la Figura 4.25 se destaca el perfil izquierdo del resultado 3D con Isosurface, que confirma los datos apartados en el análisis de este modelo.

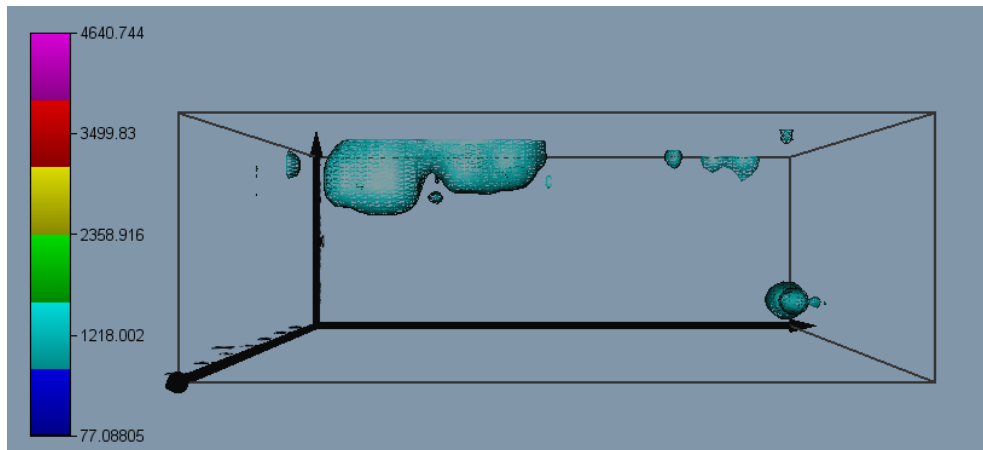


Figura. 4.25. Vista en planta del resultado 3D con gráfica "Isosurface" para dispositivo Dipolo – Dipolo.

Con la gráfica de contornos, se han configurado 10 niveles en la representación, los planos de corte axiales (XY) obtenidos, destacamos los 3 siguientes (Figura 4.26.):

- a) Las mayores resistividades se registran en la cota 546 m.
- b) La anomalía muestra su mínimo perceptible a partir de la cota 545,4 m.
- c) En la cota 545 m la anomalía principal que abarca la longitud -7 m a -9,5 m en el eje X ha dejado de apreciarse, aunque todavía se muestra en el área limítrofe.

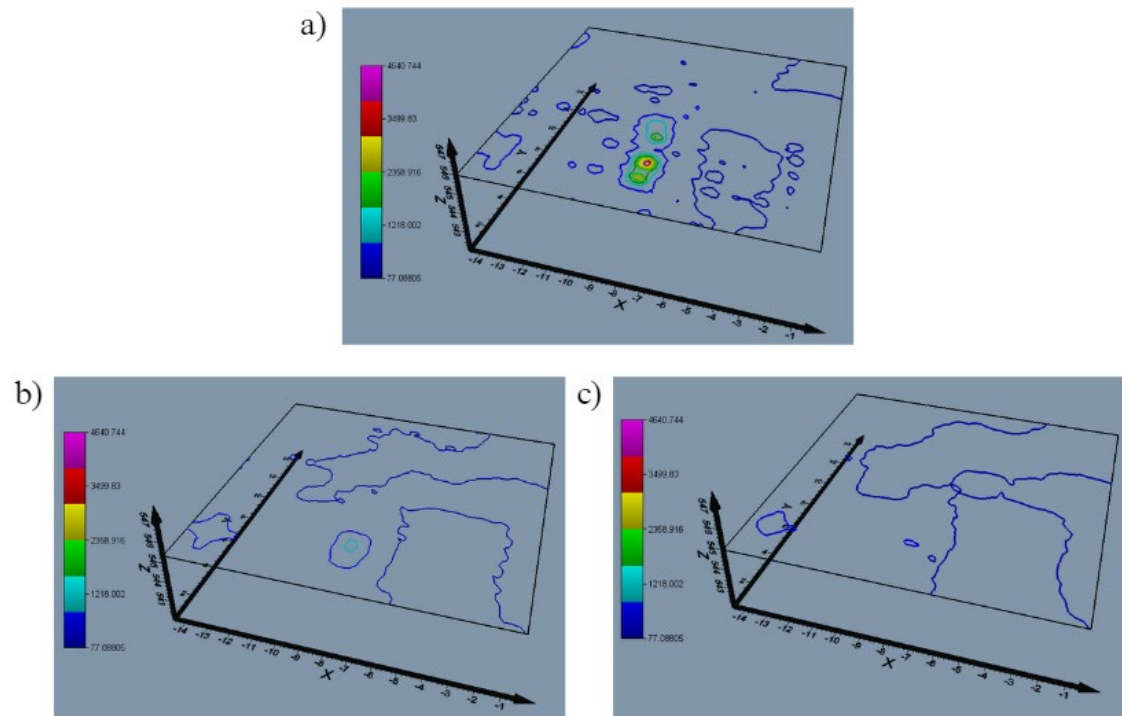


Figura. 4.26. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546. b) Plano de corte en cota 545,4. c) Plano de corte en cota 545.

4.4.2.1. Resultados en 3D a partir de datos en base logarítmica

Como ocurría en el dispositivo anterior, los datos en bruto no han sido suficientes para poder definir un volumen completo, por lo que se ha recurrido a la representación logarítmica de los mismos.

Esta representación iniciará con la gráfica “Volrender” obtenida del software Voxler. La imagen muestra que las mayores resistividades se encuentran en las mismas cotas analizadas en los datos en bruto; igualmente, se ve una mejor definición de las anomalías en comparación con el volumen analizados en el dispositivo Wenner – Schlumberger (Figura 4.27).

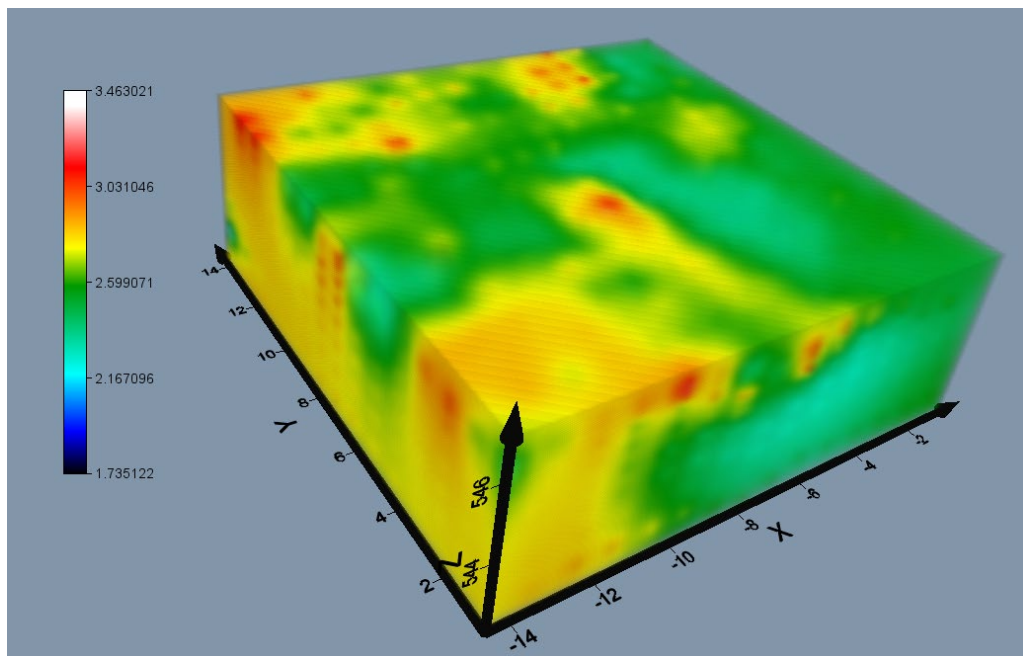


Figura. 4.27. Resultado del gráfico Volrender del software Voxler para dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica.

En la figura 4.28, se observa la vista en alzado obtenida con el gráfico Isosurface, para el dispositivo Dipolo – Dipolo. Se han tomado los isovalores de $2,75 \Omega\text{m}$, como se muestra en la gráfica anterior de Volrender, que son aquellos valores más resistivos del volumen analizado. En esta representación no se ha podido realizar una corrección de las medidas erróneas que ha mostrado el programa.

En esta vista, el valor máximo en profundidad se encuentra en la cota 546,8 m. Las anomalías con mayor profundidad, como se ha comentado anteriormente, se deben a

valores erróneos mal interpretados por el programa debido a que se encuentran en el límite de los perfiles, desniveles y zonas con ruido.

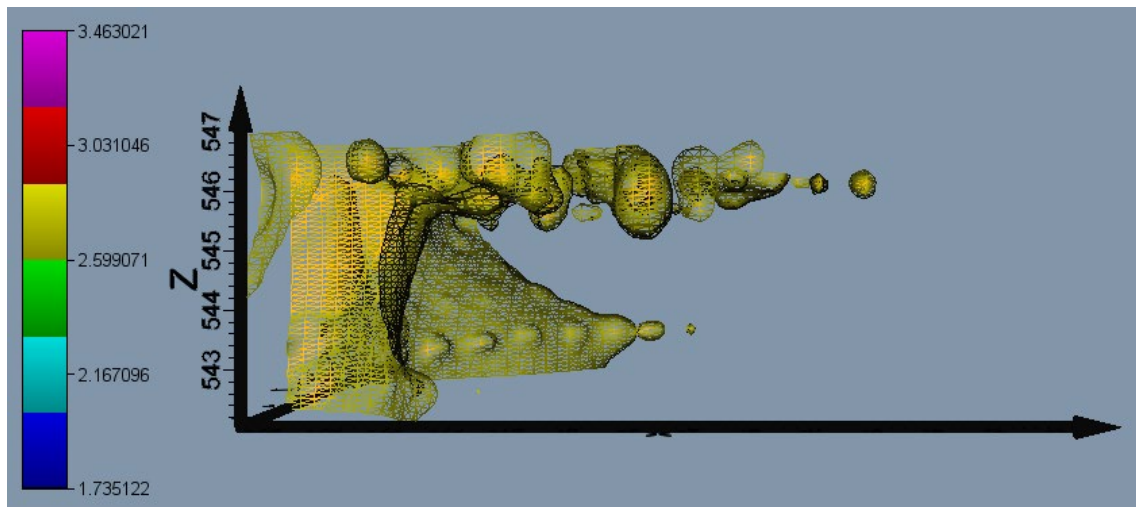


Figura. 4.28. Vista en alzado del resultado 3D con gráfica "Isosurface" para dispositivo Wenner – Schlumberger en base logarítmica.

La representación del modelo en planta Figura 4.29., muestra que:

- Eje X: una anomalía de presente de los -7 m a los -9,5 m y otra que se encuentra de -10,5 m a -15 m.
- Eje Y: en este eje la anomalía principal se extiende desde 1m hasta 7,5 m

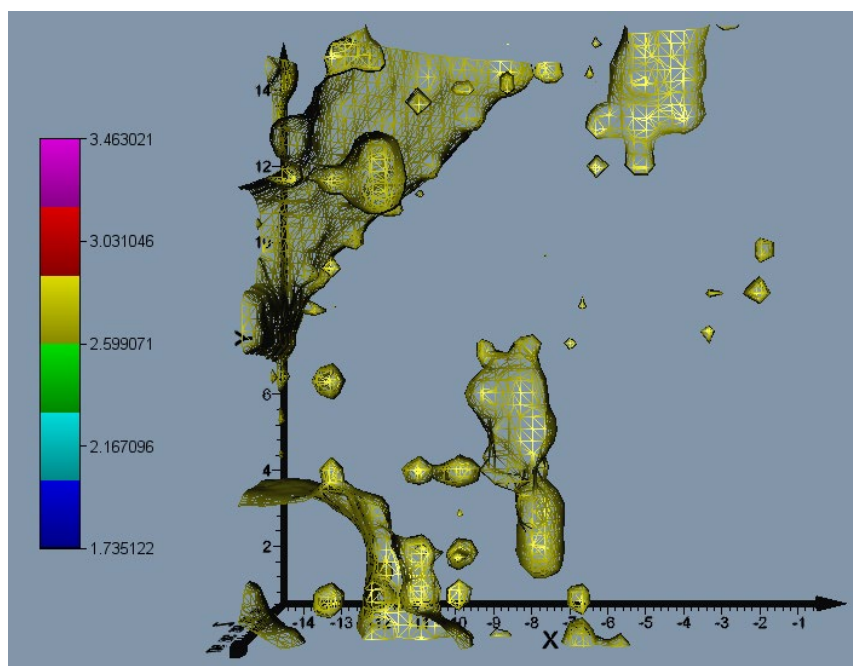


Figura. 4.29. Vista en planta del resultado 3D con gráfica "Isosurface" para dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica.

La última representación es la de la vista del perfil izquierdo Figura 4.30. de la anomalía, en ella se ha intentado realizar la corrección de aquellos errores en profundidad comentados al inicio de este apartado. Esta vista confirma también todos los comentarios realizados previamente.

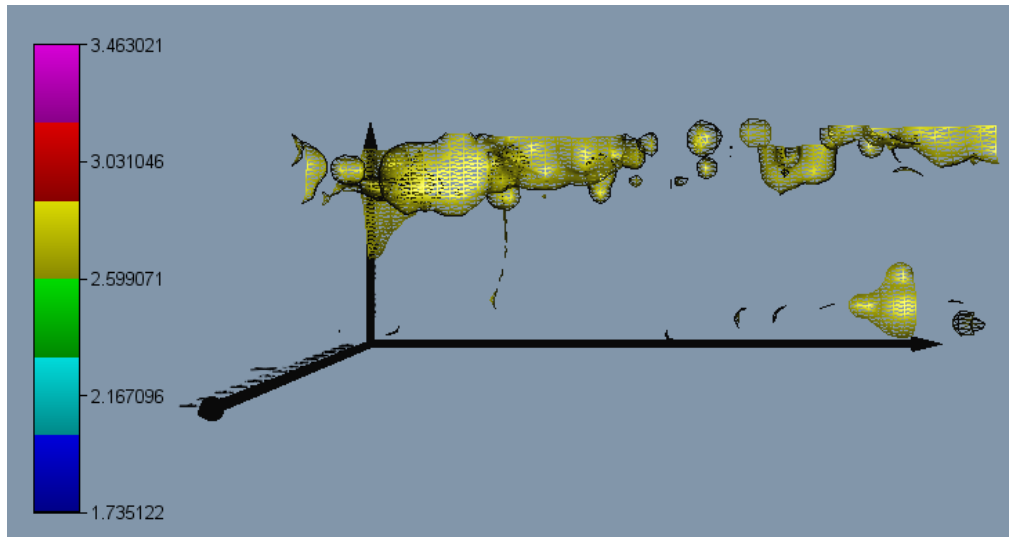


Figura. 4.30. Vista perfil izquierdo del resultado 3D con gráfica "Isosurface" para dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica.

Finalmente, en la Figura 4.31., se muestran tres gráficos de contornos a diferentes cotas, en la que siguiendo la misma línea que en los perfiles anteriores, se ha realizado con un total de 10 niveles para maximizar la representación según el plano axial (X, Y):

- a) Las mayores resistividades se registran en la cota 546 m.
- b) La anomalía muestra su mínimo perceptible a partir de la cota 545,2 m.
- c) En la cota 545 la anomalía principal que abarca la longitud -7 m a -9,5 m en el eje X ha dejado de apreciarse, aunque todavía se muestra en el área limítrofe.

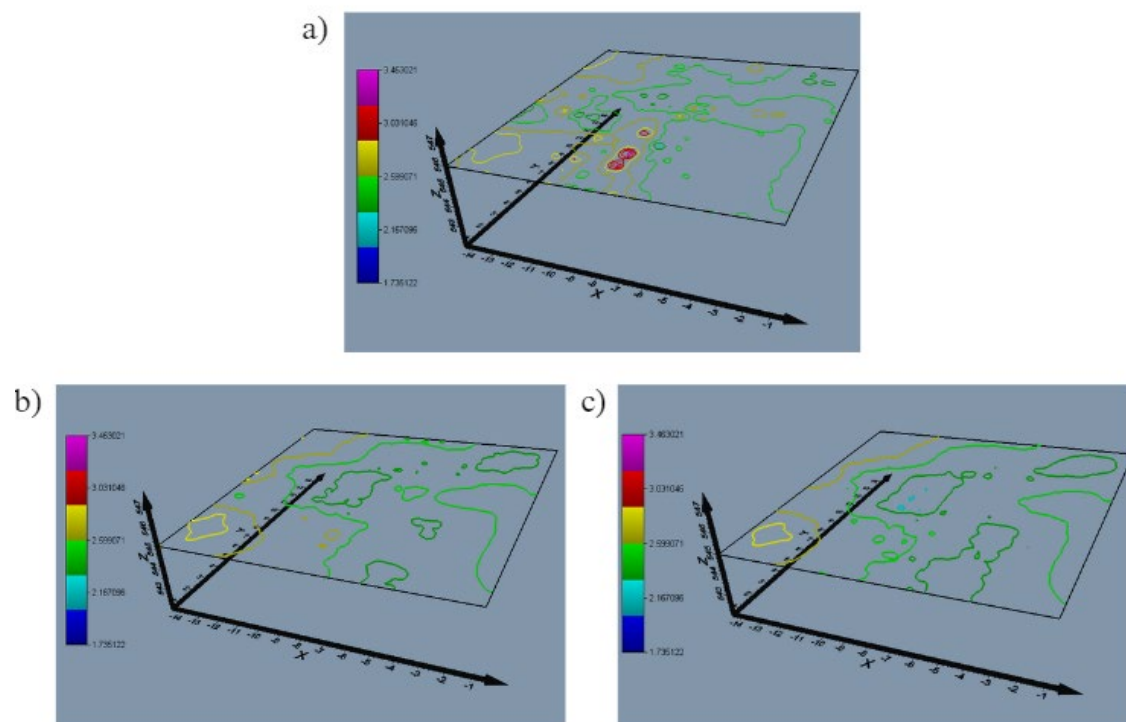


Figura. 4.31. Planos de corte axial (XY) con gráfica de contornos en software Voxler. a) Plano de corte en cota 546. b) Plano de corte en cota 545,2. c) Plano de corte en cota 545.

Conclusiones

Para finalizar, los hallazgos obtenidos en el presente Trabajo Fin de Grado, se resumen de la siguiente forma:

- Se estima que los muros han podido ser construidos en la época romana debido a la forma constructiva, materiales empleados y la ubicación de los mismos, en puntos elevados cercanos a de la explotación de San Telmo, práctica muy utilizada en las explotaciones de la época para muros de vigilancia o defensa. Aseveración queda evidenciada en la revisión bibliográfica realizada para el presente escrito.
- Debido a los materiales con los cuales está construido el muro (filitas y cuarcitas), y el contraste con las resistividades de los materiales circundantes (suelos y filitas alteradas), ha sido posible emplear la Tomografía Eléctrica 3D.
- Se ha podido realizar la adaptación del equipo en 2D conectando el cableado en forma de Zigzag para la realización del modelo 3D.
- Tanto el dispositivo Wenner-Schlumberger como el Dipolo-Dipolo, permite definir la presencia de los muros enterrados. No obstante, los mejores resultados se aprecian utilizando el dispositivo Dipolo – Dipolo en base logarítmica debido a que tienen mejor definición vertical, por lo que los márgenes laterales de la estructura quedan mejor definidos que con Wenner – Schlumberger.
- De todas formas, el uso de ambos dispositivos permite definir mejor la anomalía al cumplimentarse los resultados de uno y otro, minimizando los sesgos en los resultados.
- La utilización de los softwares de representación gráfica: Surfer y Voxler, fueron claves para visualizar de una forma más versátil los resultados obtenidos con el programa de interpretación RES3DINV; pudiendo destacar en un volumen 3D la anomalía.

En conclusión, la aplicación del método de Tomografía Eléctrica para obtener un modelo 3D resulta útil en la detección de estructuras y objetos enterrados, resolviendo tanto su localización y su disposición en el espacio.

Referencias

- Arboledas Martínez, L., Contreras Cortés, F., & Moreno Onorato, A. (1 de Marzo de 2014). La Explotación Minera Antigua en Sierra Morena Oriental y su Vinculación con el Territorio. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada CPAG*, 111-145. Obtenido de Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada.
- Audemard, F., Ollarves, R., & Díaz, G. (2006). *El Geo-radar como herramienta para la definición de fallas activas: aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela*. Obtenido de Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000400006
- Cañizal, J., Fernández, G., & Miranda, M. (s.f.). *Tema 9: Métodos de prospección geofísica de detalle. Geotecnia y Prospección Geofísica*. Obtenido de Universidad de Cantabria: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2131/course/section/1942/tema_9.pdf
- Contreras Cortés, F., & Dueñas Molina, J. (2010). *La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir: Desde sus orígenes hasta nuestro días*. Jaén: Instituto de Estudios Giennenses.
- COTECNO. (s.f.). *Resistividad y Sistema de Control de Electrodo RESECS DC*. Obtenido de COTECNO: <https://www.cotecno.cl/resistividad-y-sistema-de-control-de-electrodos-resecs-dc/?print-products=pdf>
- del Olmo, V. (2009). *Glosario de la Terminología Minera de la Cuenca de Linares*. Linares: Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Linares, Granada, Jaén y Málaga.
- Eiffel Lab. (2013). *Minas de Sierra Morena*. Obtenido de <https://www.minasdesierramorena.es/guia-de-campo/conjuntos-mineros/linares-la-carolina/>

García Sánchez-Berbel, L. (1993). *El Centenillo: un pueblo andaluz y minero*. Madrid: El Autor.

Geoelectrical Imaging. (1999). *RES2DMOD. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite element methods*. Obtenido de https://www.academia.edu/31684638/RES2DMOD_ver_2_2_Rapid_2D_resistivity_forward_modelling_using_the_finite_difference_and_finite_element_methods

GEOTOMO SOFTWARE. (Febrero de 2010). *RES2DINV ver. 3.59. Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method*. Obtenido de Geoelectrical Imaging 2D & 3D. GEOTOMO SOFTWARE: <https://www.aarhusgeosoftware.dk/>

GEOTOMO SOFTWARE. (Agosto de 2020). *RES3DINV. Rapid 3D Resistivity & IP inversion using the least-squares method*. Obtenido de GEOTOMO SOFTWARE SDN BHD: https://landviser.com/wp-content/uploads/2018/01/Res3dinvx64_full_manual.pdf

Geotomo Software. (2024). *Geotomosoft*. Obtenido de Geoelectrical Imaging 2D & 3D: <https://www.geotomosoft.com/about.php>

GOLDEN SOFTWARE. (2019). *Surfer. Full User's Guide*. Obtenido de GOLDEN SOFTWARE: <https://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer17UserGuide.pdf>

Guía para el uso del equipo Georadar. (s.f.). Obtenido de <https://oercommons.org/courseware/lesson/60185/student/?section=7>

Gutiérrez Guzmán, F. (2007). *Minería en Sierra Morena*. Linares: Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Linares, Granada, Jaén y Málaga.

IGME. (s.f.). *Mapa Geológico de España*. Obtenido de MAGNA 50-Hoja 884 (La Carolina): <http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0884.pdf>

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (s.f.). *Minería de Sierra Morena*. Obtenido de Atlas de Historia Económica de Andalucía ss. XIX-XX:

https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/atlashistoriaecon/atlas_cap_28.html

Intituto Geológico Minero de España. (s.f.). *Glosario de términos hidrogeológicos*.
Obtenido de IGME:

https://aguas.igme.es/igme/publica/libro76/pdf/lib76/in_09.pdf

IRIS INSTRUMENTS. (2021). *PROSYS II Software*. Obtenido de IRIS INSTRUMENTS: https://www.iris-instruments.com/Pdf_file/Prosys_Gb.pdf

Junta de Andalucía. (07 de Mayo de 2008). *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía - Histórico del BOJA n°90 de 07/05/2008*. Obtenido de Junta de Andalucía: <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2008/90/28>

López Hidalgo, A., Heng Loke, M., Fanton, G., & Cara, E. (2006). *Técnicas prácticas para investigación de resistividades en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D)*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/266036673_TECNICAS_PRACTICAS_PARA_INVESTIGACION_DE_RESISTIVIDAD_EN_DOS_Y_TRES_DIMENSIONES_TOMOGRAFIA_ELECTRICA_2D_y_3D

Martín Gutiérrez, J., & Dorta Martín, N. (Abril de 2006). *Control del suelo en cimentaciones y estructuras arquitectónicas por técnicas geofísicas (Sistema Georadar GPR)*. Obtenido de Universidad de Sevilla: https://institucional.us.es/revistas/EGE/EGE_4/ege-04-Control-del-suelo-en-cimentaciones-y-estructuras-arquitectonicas-por-tecnicas-geofisicas-Sistema-Georadar-GPR.-Modelos-Graficos..pdf

Martínez Sala, R., Mené Aparicio, J., & Rodríguez Abad, I. (Diciembre de 2017). *Aplicación de la técnica del georadar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón*. Obtenido de Elsevier. Hormigón y Acero: <https://www.elsevier.es/es-revista-hormigon-acero-394-articulo-aplicacion-tecnica-del-georadar-ingenieria-S0439568917300402>

Olona, J., Fernández, G., López, C., & Llana, S. (2016). *Caracterización geoeléctrica de la falla de Ventaniella mediante tres dispositivos geométricos distintos: dipolo-dipolo, Schlumberger y Wenner*. Obtenido de IX CONGRESO GEOLÓGICO DE ESPAÑA. ResearchGate:

https://www.researchgate.net/publication/311006446_Caracterizacion_geoelectrica_de_la_falla_de_Ventaniella_mediante_tres_dispositivos_geometricos_distintos_dipolo-dipolo_Schlumberger_y_Wenner

Ortega Andrade, F. (Octubre de 1994). *La Construcción Romana (I)*. Obtenido de Teoría e Historia de la Arquitectura: https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/16634/1/RE_Vol%2018_06.pdf

Parasnis, D. S. (1971). *Geofísica Minera*. Madrid: Paraninfo.

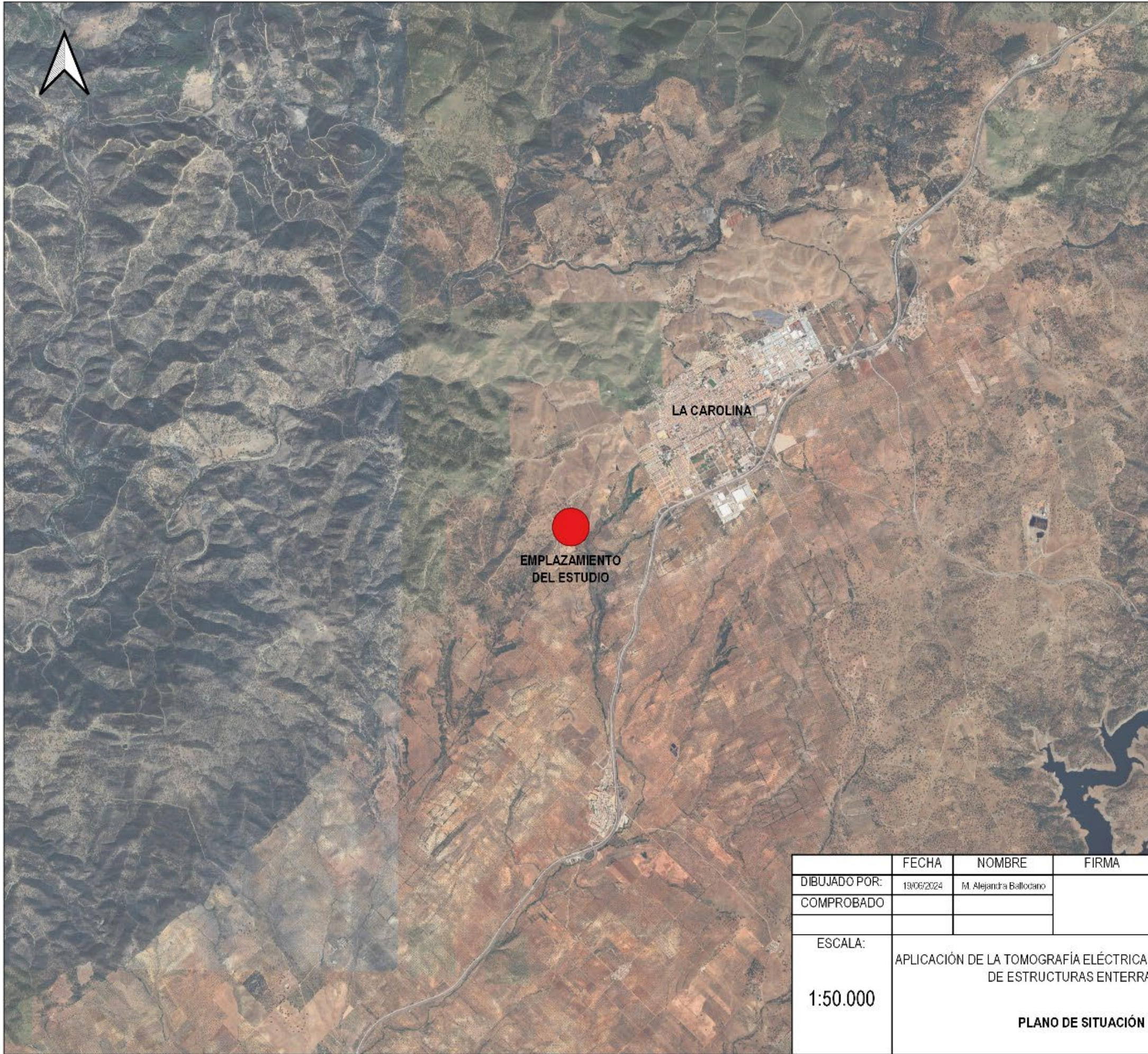
Rey Arrans, J., & Martínez López, J. (Abril de 2012). *Prospección Geofísica mediante Tomografía Eléctrica. Ejemplos de aplicación en proyectos realizados y/o en ejecución. XVI Curso de Sondeos*.

Rojas Hita, D., Hidalgo Estévez, M. d., & Kohfahl, C. (30 de Septiembre de 2019). *Tesis Doctoral. Influencia de los Residuos Geomineros Sobre Medio Hídrico en el Distrito Minero de La Carolina*. Obtenido de Universidad de Jaen: <https://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/999/5/9788491593157.pdf>

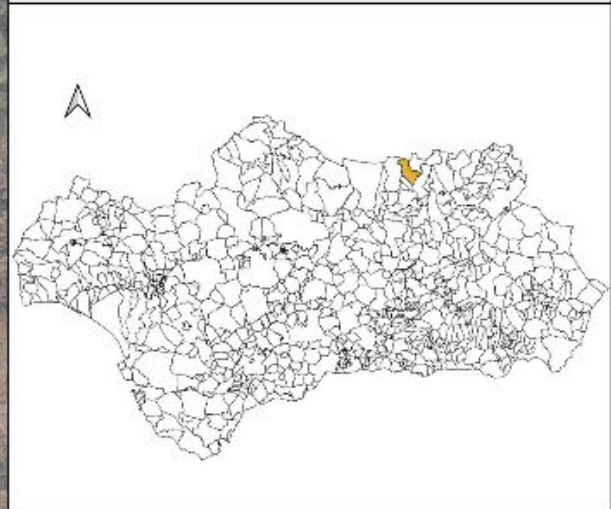
Serrano Ontiveros, J. (2003). *Tema 3: Tomografía Eléctrica*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

Vitruvio Polion, M. (1997). *Los Diez Libros de Arquitectura*. Madrid: Alianza Editorial.

ANEXOS



MAPA DE SITUACIÓN

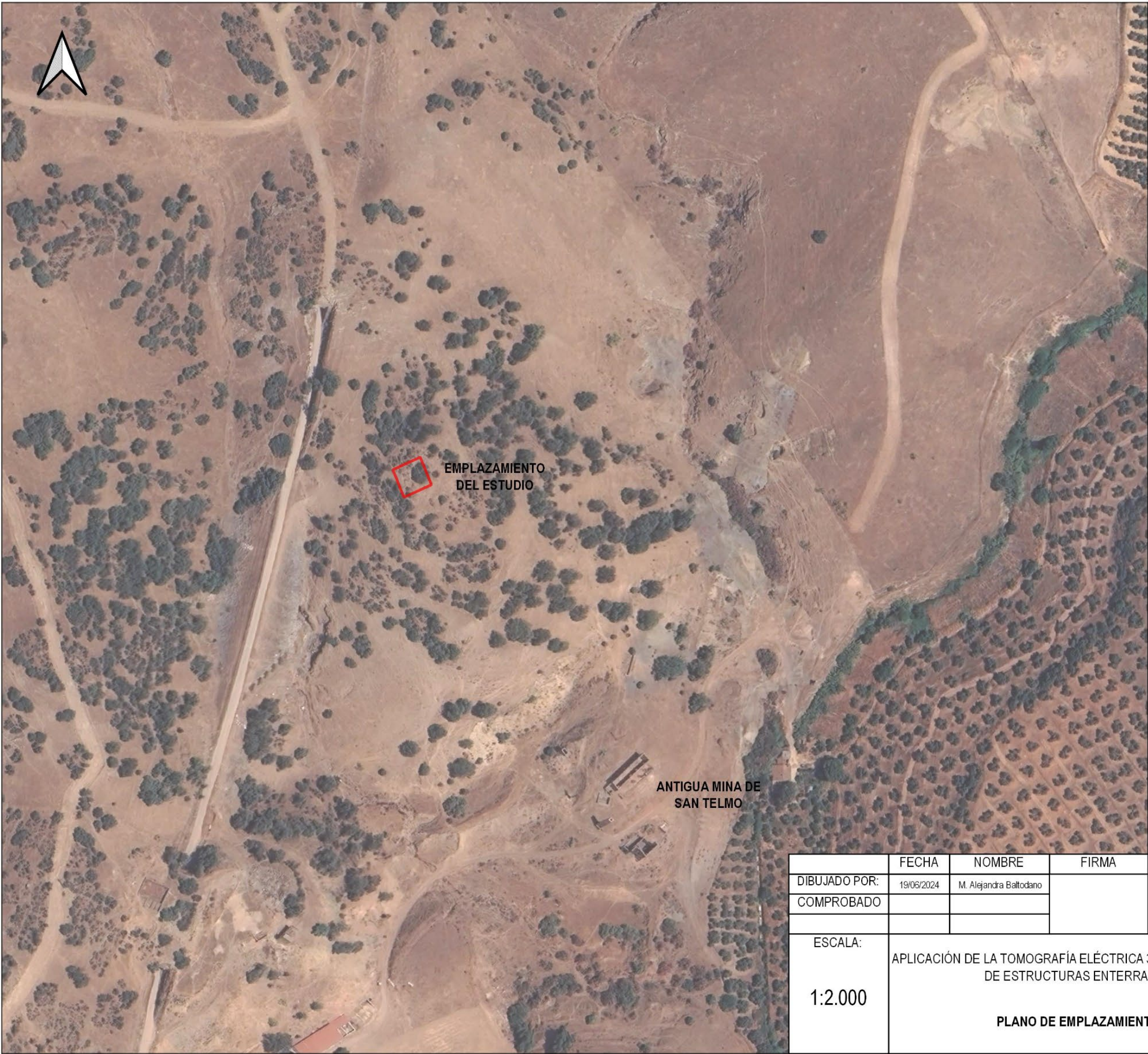


LEYENDA

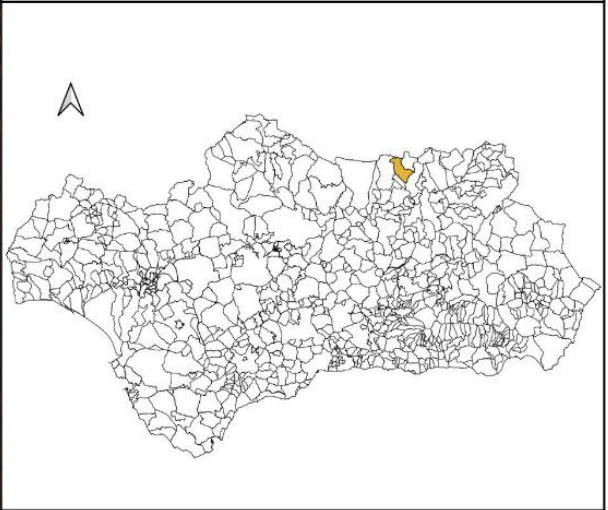
— Emplazamiento del Estudio
Google Satellite



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO POR:	19/06/2024	M. Alejandra Ballodano		
COMPROBADO				
ESCALA:	APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D EN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS			Nº PLANO
1:50.000				1/6
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:
	PLANO DE SITUACIÓN			



MAPA DE SITUACIÓN



LEYENDA

— Emplazamiento del Estudio
Google Satellite



	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO POR:	19/06/2024	M. Alejandra Baltodano	
COMPROBADO			

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

ESCALA: 1:2.000	APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D EN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS PLANO DE EMPLAZAMIENTO
------------------------	---

Nº PLANO 2/6
SUSTITUYE A:
SUSTITUIDO POR:

MAPA GEOLOGICO DE ESPAÑA

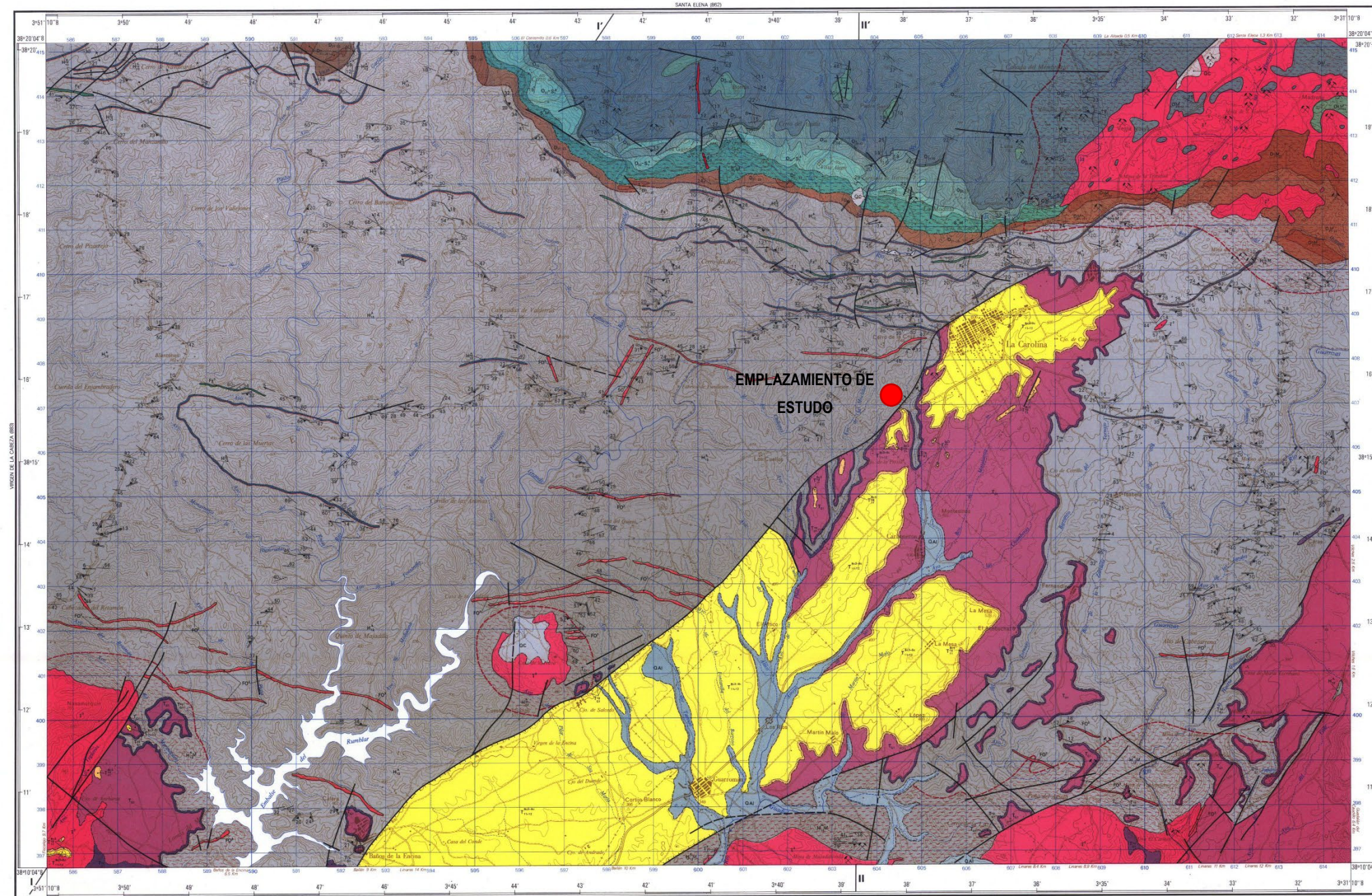
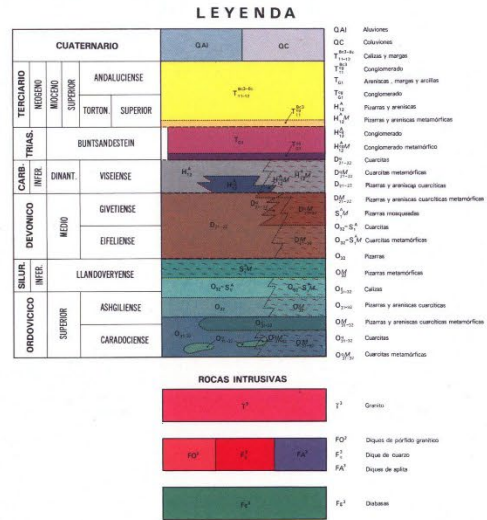
E. 1:50.000



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

LA CAROLINA

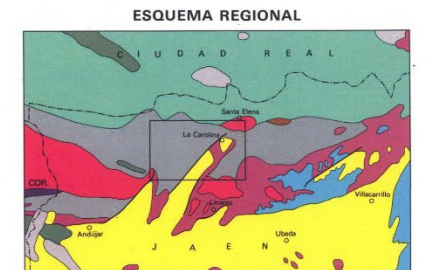
884
19-35



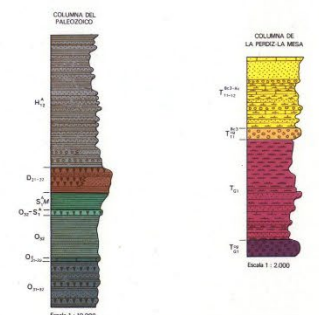
EDITA: SERVICIO DE PUBLICACIONES-MINISTERIO DE INDUSTRIA
C.S.G., 1972
Base topográfica y tirada: Instituto Geográfico y Catastral
Delineación y Repografía: RHEA Consultores S.A.
Depósito legal: M-25578-1976

NORMAS, DIRECCION Y SUPERVISION DEL IGME
ENADIMSA / R. Castelló Montori
F. Orta Castro
Madrid, 1974

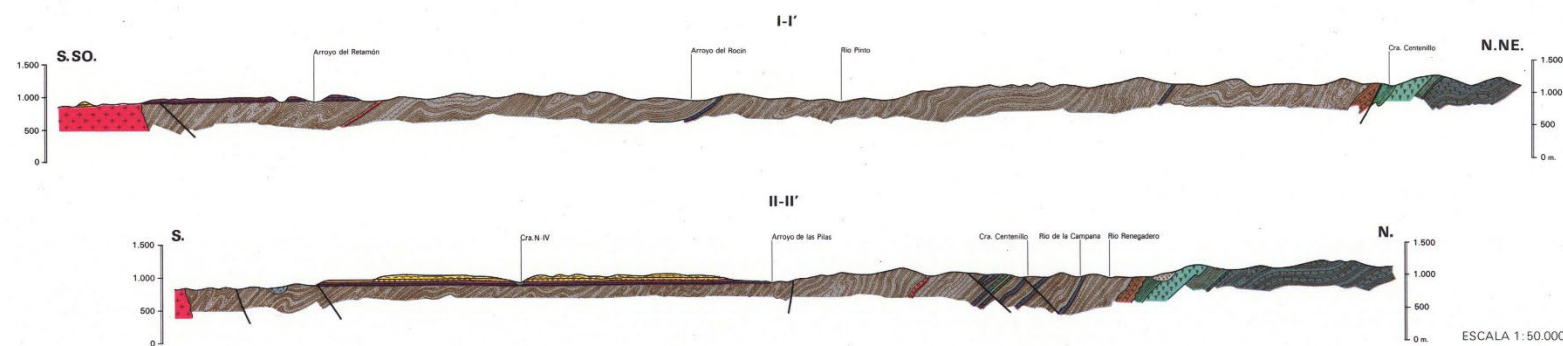
Las altitudes se refieren al nivel medio del Mediterráneo en Alicante
Cuadrícula Lambert-Equidistancia de las curvas de nivel: 20 metros
Proyección U.T.M.—Elipsoide Internacional

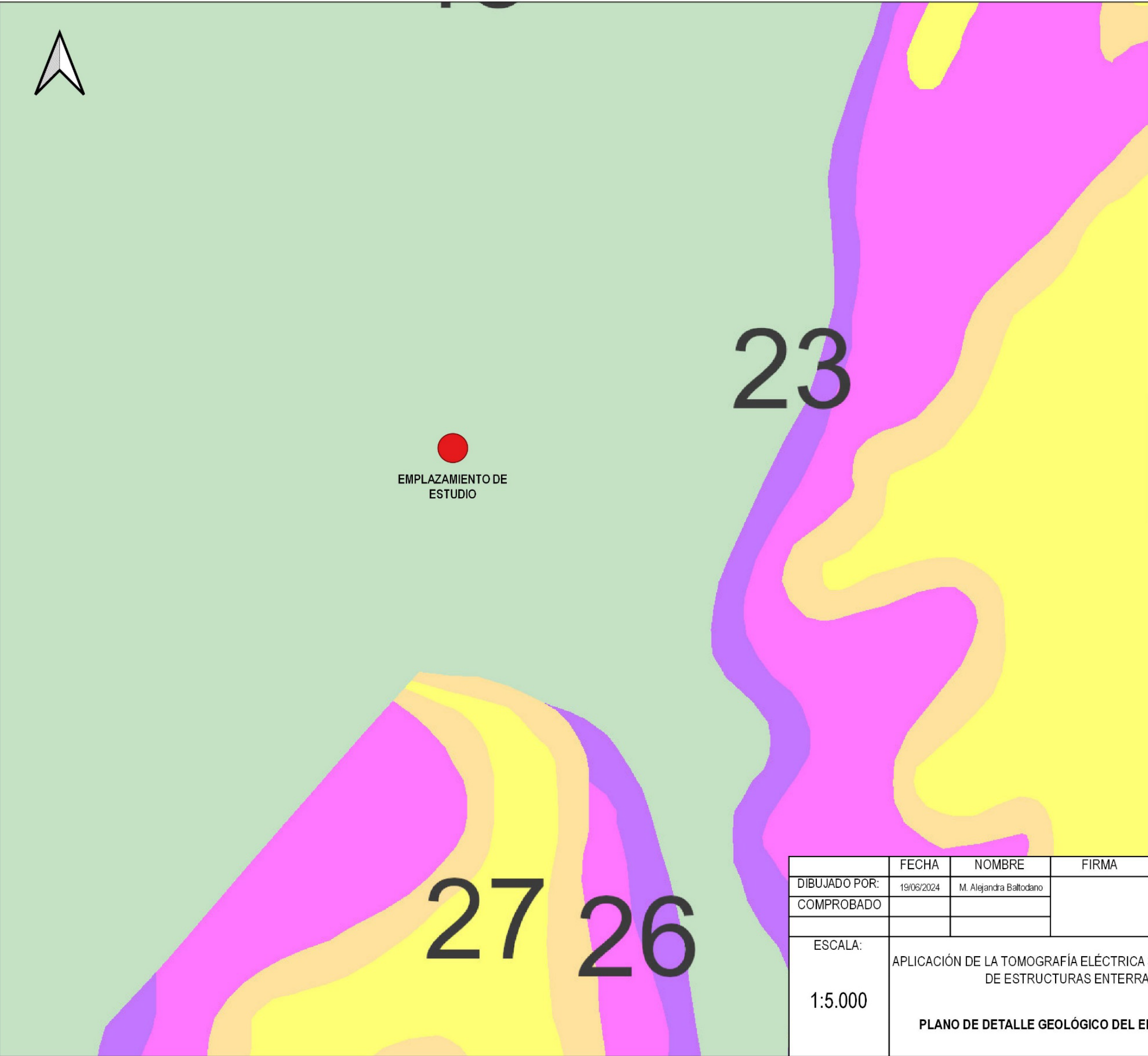


COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS EN LAS PRINCIPALES UNIDADES O ZONAS



CORTES GEOLOGICOS





MAPA DE SITUACIÓN



LEYENDA

- Ubicacion
MAGNA50_MapServer
- 23 Pizarras y areniscas metamórficas
 - 26 Areniscas, margas y arcillas
 - 27 Conglomerado



	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO POR:	19/06/2024	M. Alejandra Baltodano	
COMPROBADO			
ESCALA:	APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3DEN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS		
1:5.000	PLANO DE DETALLE GEOLÓGICO DEL EMPLAZAMIENTO		

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

Nº PLANO
3/6

SUSTITUYE A:
SUSTITUIDO POR:

E. 1:200.000



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

LINARES

11070

70

MORFOLOGIA			
SISTEMAS DE SONORIDAD	distancia		realización
	intensidad		realización
VOCALIZACIÓN ORIGINARIA	El origen	sonido que se produce en la cavidad bucal sonido que se produce en la cavidad nasal	realización realización
	características	sonido que se produce en la cavidad bucal sonido que se produce en la cavidad nasal	realización realización
DETERMINO EL FONETISMO DE UN FONEMA EN LA PRONUNCIACIÓN		deco y coo: el contexto según el que se pronuncie la vocal.	

MLNA					
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28
29	29	29	29	29	29
30	30	30	30	30	30
31	31	31	31	31	31
32	32	32	32	32	32
33	33	33	33	33	33
34	34	34	34	34	34
35	35	35	35	35	35
36	36	36	36	36	36
37	37	37	37	37	37
38	38	38	38	38	38
39	39	39	39	39	39
40	40	40	40	40	40
41	41	41	41	41	41
42	42	42	42	42	42
43	43	43	43	43	43
44	44	44	44	44	44
45	45	45	45	45	45
46	46	46	46	46	46
47	47	47	47	47	47
48	48	48	48	48	48
49	49	49	49	49	49
50	50	50	50	50	50
51	51	51	51	51	51
52	52	52	52	52	52
53	53	53	53	53	53
54	54	54	54	54	54
55	55	55	55	55	55
56	56	56	56	56	56
57	57	57	57	57	57
58	58	58	58	58	58
59	59	59	59	59	59
60	60	60	60	60	60
61	61	61	61	61	61
62	62	62	62	62	62
63	63	63	63	63	63
64	64	64	64	64	64
65	65	65	65	65	65
66	66	66	66	66	66
67	67	67	67	67	67
68	68	68	68	68	68
69	69	69	69	69	69
70	70	70	70	70	70
71	71	71	71	71	71
72	72	72	72	72	72
73	73	73	73	73	73
74	74	74	74	74	74
75	75	75	75	75	7

QUIMISMO		MESES	DIAS
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12

ROCA ENCAJANTE			
1.	2.	3. MATERIAL	4.
5.	6.	7.	8.

[illegible]

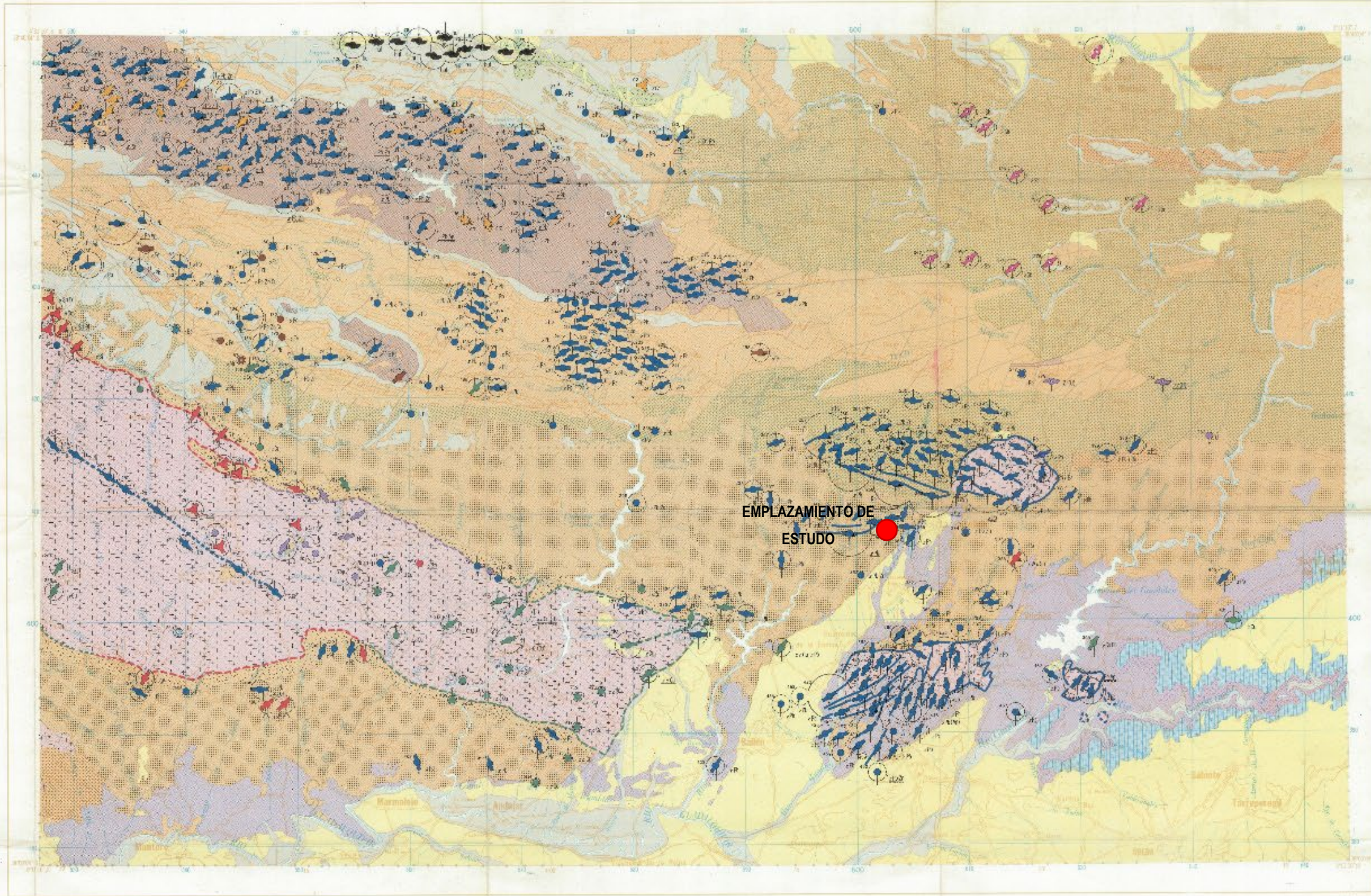
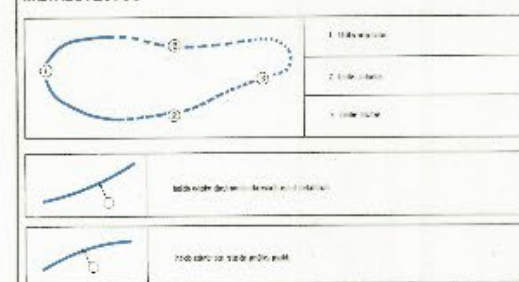
DATOS ECONOMICOS *datos y monedas*

 monedas	 pagos	 matrícula	 gastos
 análisis	 inversión		

[illegible]

OTRAS CARACTERÍSTICAS				
	Atorno	2-5 minutos por hora	3-	10
	4-5 minutos	17-5	6-	20

METALOTECTOS



BASE GEOLOGICA

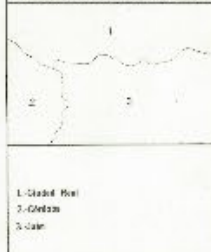
Adaptación simplificada del
MMA distribuido (EJEMPLO)

[illegible]

MINISTERIO DE INDUSTRIA
DIRECCION GENERAL DE MINAS
PLAN NACIONAL DE MINERIA
Programa Nacional de Investigación Minera

con la colaboración de:
J. SIERRA, A. ORTIZ, J. BURKHALTER Y
J. E. AZCARATE
en la Escuela Nacional de Investigaciones Moleculares, ADOBO, G. A. (ENADIMA)

DIVISION ADMINISTRATIVA



Escala 1:200.000



Professor D. L. M. Blijleven, Hys and
Schieda, Alameda, made the map in Mexico
Cruzcampo, de C. 1900, 400 meters.
Longitude, with the standard of Greenwich, Dutch, Europe.

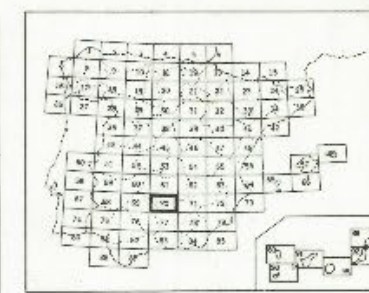
SP EDITA: Servicio de Publicaciones Ministerio de Industria

Referencia Mapa Nacional
1:50,000

337	339	327	33
330	331	332	30
327	332	334	33
333	334	329	30

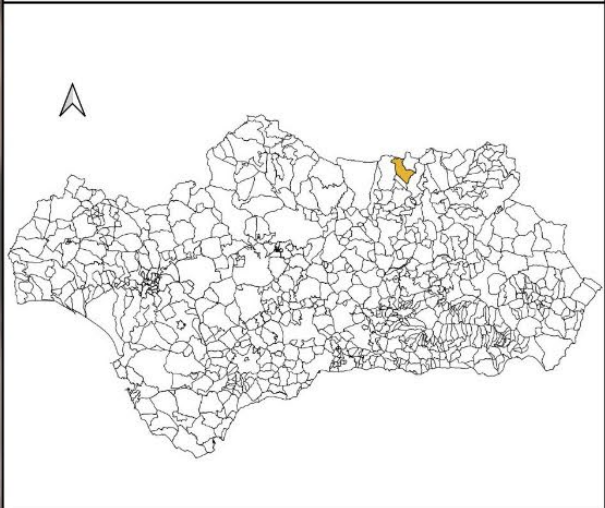
Reference: Mapa Militar

17-23	18-29	19-31	20-
17-24	18-30	19-32	20-
17-25	18-31	19-33	20-
17-26	18-32	19-34	20-





MAPA DE SITUACIÓN



LEYENDA

- Paralelogramo
- Vertices
- Google Satellite

Nombre	Coord_X	Coord_Y
Vertice A	444361	4235012
Vertice D	444375	4235018
Vertice C	444369	4235032
Vertice B	444355	4235026

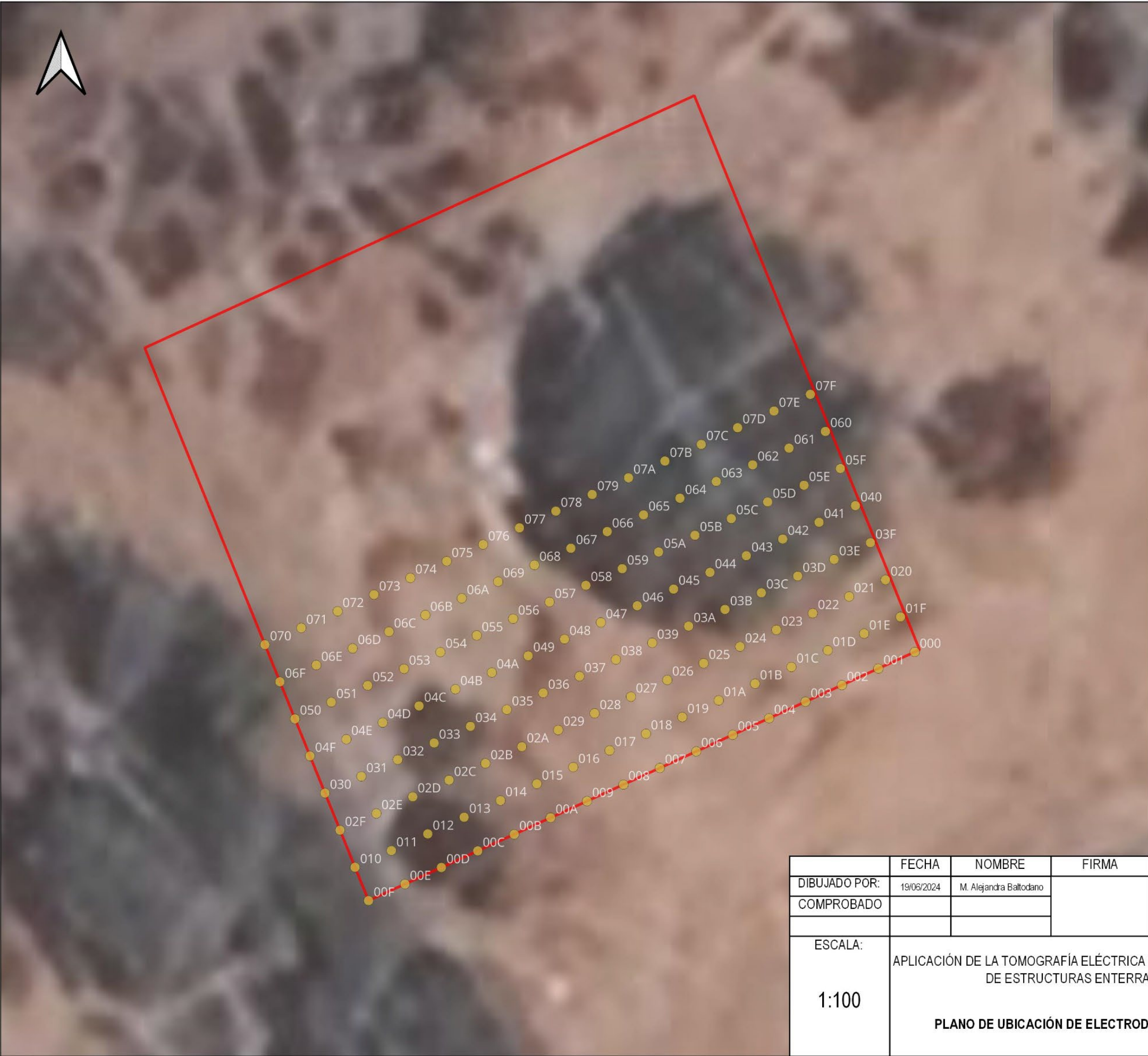


	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO POR:	19/06/2024	M. Alejandra Baltodano	
COMPROBADO			

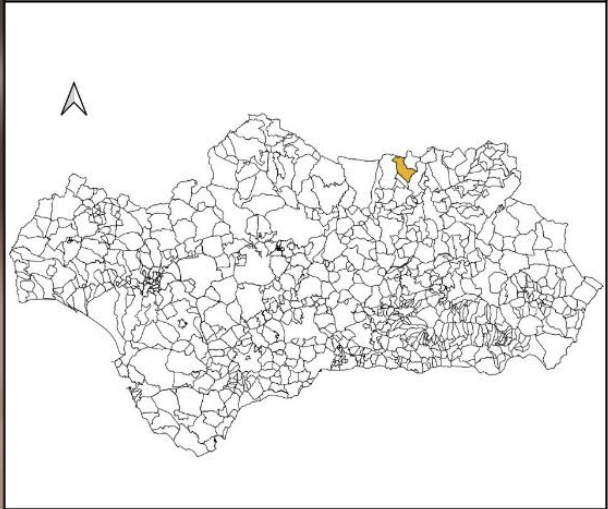
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

ESCALA:	APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3DEN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS
1:200	PLANO DE UBICACIÓN DE VÉRTICES DEL PARALELOGRAMO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Nº PLANO
4/6
SUSTITUYE A:
SUSTITUIDO POR:



MAPA DE SITUACIÓN

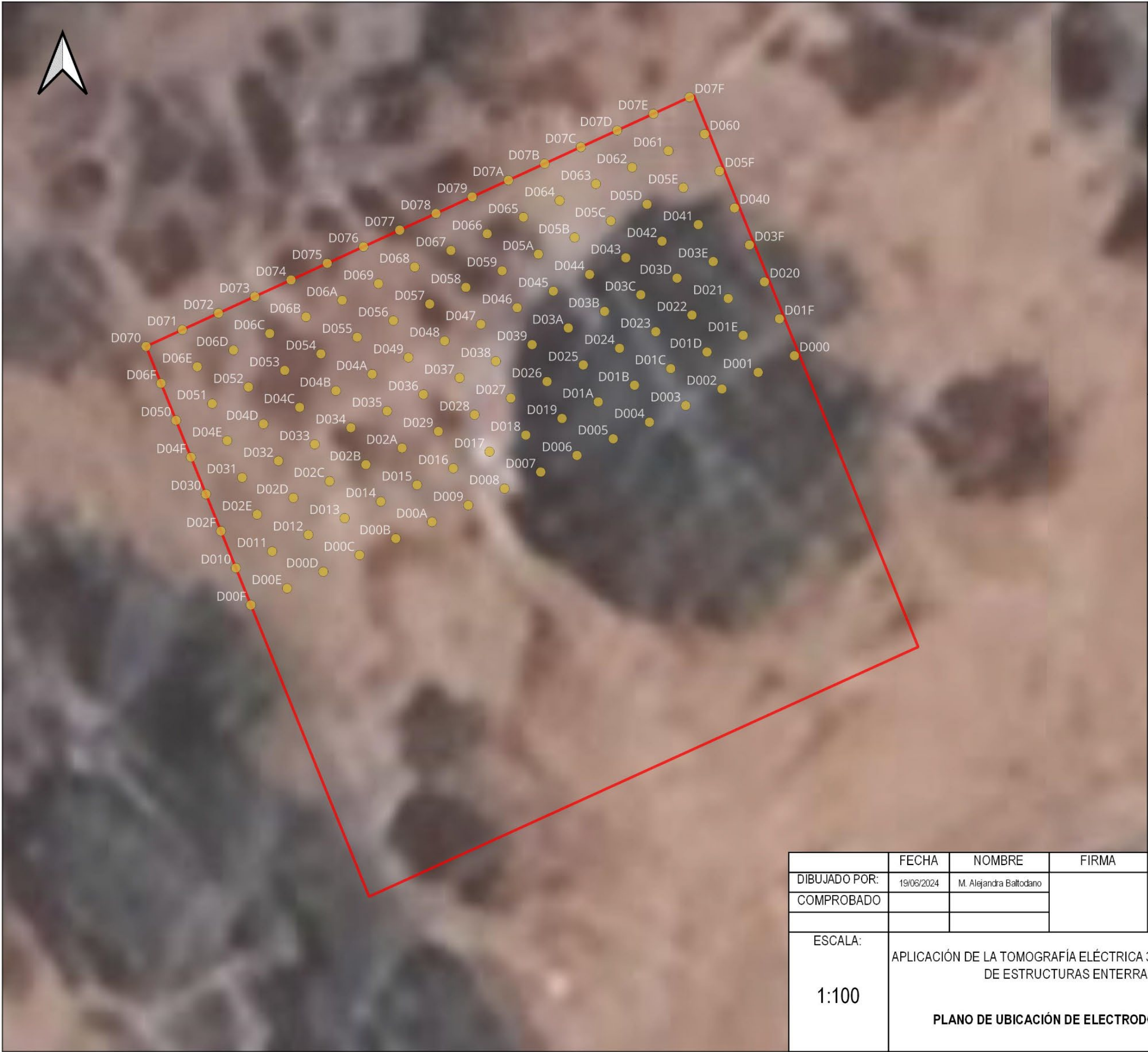


LEYENDA

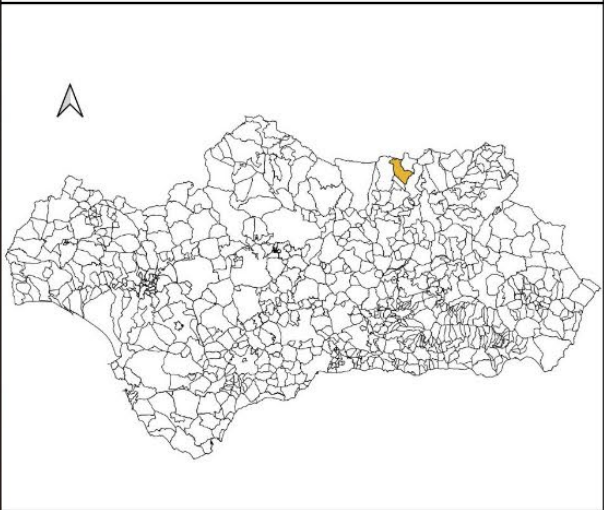
● Electrodos Dia 3
— Paralelogramo
Google Satellite

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO POR:	19/06/2024	M. Alejandra Baltodano			
COMPROBADO					
ESCALA:	APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3DEN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS			Nº PLANO	
1:100				5/6	
	PLANO DE UBICACIÓN DE ELECTRODOS DEL DÍA 3			SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



MAPA DE SITUACIÓN



LEYENDA

- Electrodo Dia 4
- Paralelogramo
- Google Satellite



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO POR:	19/06/2024	M. Alejandra Baltodano			
COMPROBADO					
ESCALA:	APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3DEN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS			Nº PLANO	
1:100				6/6	
	PLANO DE UBICACIÓN DE ELECTRODOS DEL DÍA 4			SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	