

MEJORA DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONOCIMIENTO SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO APOYO A LA GESTIÓN HIDROLÓGICA DE LA CIUDAD DE MELILLA (2018-2020) FASE 2ª

**INFORME RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA EN EL ALUVIAL DEL RÍO DEL
ORO POR ENCIMA DEL PUENTE DEL ESCAÑO
(ACTIVIDAD 5)**

Junio de 2019

INDICE

1. OBJETIVO Y LOCALIZACIÓN DE LOS DATOS GEOFÍSICOS	4
2. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO.....	6
3. EQUIPO Y SOFTWARE EMPLEADO	8
4. RESULTADOS.....	10
4.1 Perfil-1.....	11
4.2 Perfil 2.....	11
4.3 Perfil 3.....	12
5. CONCLUSIONES.....	16
6. REFERENCIAS.....	16

1. OBJETIVO Y LOCALIZACIÓN DE LOS DATOS GEOFÍSICOS

Se han realizado 3 perfiles de tomografía eléctrica (Fig. 1 y Tabla 2), dos de ellos paralelos al cauce del Río del Oro (Perfil-1 y Perfil-3) y uno en el paraje conocido como Huerta de los Fernandez (Perfil-2), con el objetivo de caracterizar la potencia del relleno aluvial en dichos sectores. Se ha aplicado dicha técnica debido al contraste de resistividad existente entre los materiales detríticos aluviales que constituyen el cauce del río y las margas y limos messinienses infrayacentes.

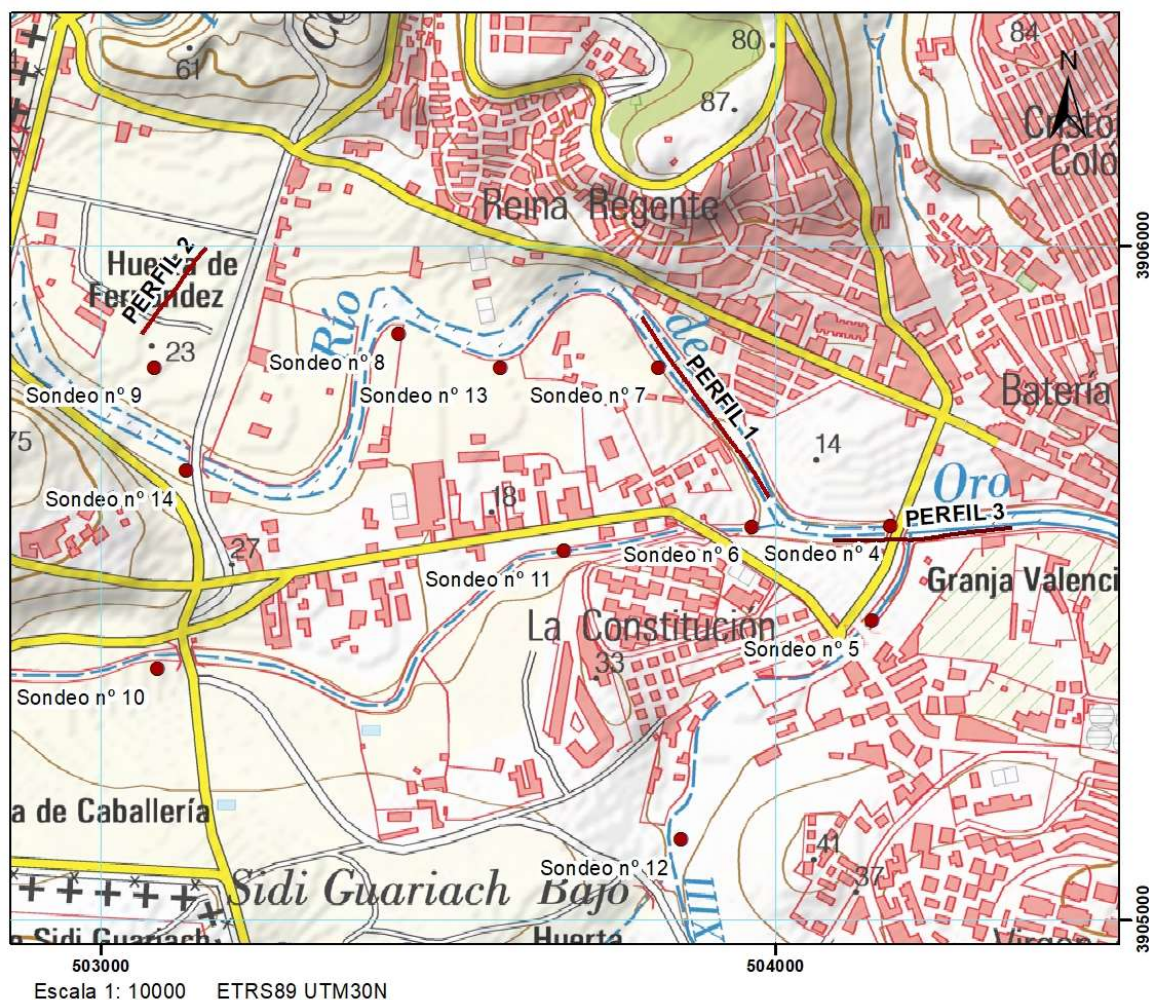


Figura 1. Localización de los perfiles de tomografía eléctrica y sondeos de exploración realizados en las inmediaciones del Río del Oro.

En la adquisición y procesado de la campaña geofísica realizada han participado el siguiente personal del IGME:

- Ana Ruiz Constán (Científica Titular)
- Carlos Marín Lechado (Científico Titular)
- Antonio Navarro (Ayudante de Investigación)

La adquisición de los datos se realizó entre el 22 y el 25 de abril de 2019. Los resultados de la tomografía eléctrica complementan la información sobre potencia del relleno aluvial proporcionados por la campaña de sondeos realizada a lo largo del cauce del Río del Oro (tabla

1). Los lugares seleccionados se encuentran aguas arriba del Puente del Escaño ya que a partir de ese punto y hasta su desembocadura el río se encuentra encauzado y revestido con planchas de hormigón por lo que no es posible instalar los electrodos. No se han realizado secciones transversales al cauce debido a que todo el sector se encuentra urbanizado y no es posible extender los electrodos transversalmente debido a la presencia de edificios. A continuación se detallan las características de los tres perfiles de tomografía eléctrica realizados:

NOMBRE	Prof. (m)	Litología (resumen)	N.E. (m) 05/10/16	Lámina de agua (m)
Nº 2-Depósito	De 0 a 11,60	Mat. detríticos aluviales	3,26	9,24
	De 11,60 a 12,50	Limo arenoso mioceno		
Nº 3-Callejón de la Marina	De 0 a 11,70	Mat. detríticos aluviales	3,65	8,35
	De 11,70 a 12,00	Arcilla arenosa miocena		
Nº 4-Jardines del Mar I	De 0 a 8,00	Mat. detríticos aluviales	7,20	0,80
Nº 5-Jardines del Mar II	De 0 a 9,80	Mat. detríticos aluviales	8,3	3,70
	De 9,80 a 12,00	Margas miocenas		
Nº 6-Río de Oro-Farhana	De 0 a 8,00	Mat. detríticos aluviales	5,88	3,52
	De 8,00 a 9,40	Arenas y limos miocenos		
Nº 7-General Mizzian	De 0 a 7,20	Mat. detríticos aluviales	5,83	2,17
	De 7,20 a 8,00	Arcilla arenosa miocena		
Nº 8-Gravera	De 0 a 6,00	Mat. detríticos aluviales	6,85	0,55
	De 6,00 a 7,40	Limos miocenos		
Nº 9-Planta de bombeo CHG	De 0 a 8,20	Mat. detríticos aluviales	SECO	0,00
	De 8,20 a 8,50	Limos miocenos		
Nº 10-C.E.T.I.	De 0 a 6,50	Mat. detríticos aluviales	6,48	0,52
	De 6,50 a 7,00	Arenas miocenas		
Nº 11-Carretera de Farhana	De 0 a 5,80	Mat. detríticos aluviales	7,44	2,56
	De 5,80 a 10,00	Arcillas limosas miocenas		
Nº 12-Nuevo Instituto	De 0 a 7,30	Mat. detríticos aluviales	7,49	1,51
	De 7,30 a 9,00	Limos arenosos		
Nº 13-Caballerizas	De 0 a 6,30	Mat. detríticos aluviales	6,16	3,58
	De 6,30 a 9,74	Arenas y limos		
Nº 14-Frente pantalla CHG	De 0 a 6,00	Mat. detríticos aluviales	SECO	0,00
	De 6,00 a 6,30	Margas miocenas		

Tabla 1: Resumen de las columnas litológicas atravesadas por los sondeos en el aluvial del Río del Oro.

Perfil	Dispositivo de medida	Espaciado electrodos (metros)	Longitud (metros)	Coordenadas UTM	
				inicio	fin
Perfil-1	Multiple gradient	1.5	340	503802E 3905894N	503990E 3905627N
Perfil-2		1	165	503060E 3905869N	503155E 3905997N
Perfil-3		1.5	250	504086E 3905562N	504352E 3905582N

Tabla 2. Localización de los perfiles de tomografía realizados y principales características.

2. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

La tomografía eléctrica es una técnica de prospección geofísica que consiste en introducir en el terreno una corriente eléctrica continua a través de dos electrodos de corriente (A y B) y medir la diferencia de potencial eléctrico mediante otro par de electrodos (M y N), también situados en superficie (Fig. 2).

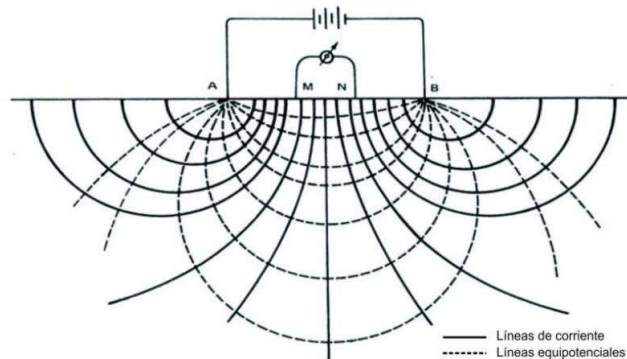


Figura 2: Esquema básico de funcionamiento de los métodos de resistividad.

Existen diferentes configuraciones (Wenner, Schlumberger, etc.) en función de la geometría utilizada en la disposición de los 4 electrodos de medida (Loke, 2004). La elección del dispositivo depende del tipo de estructura que se pretende estudiar, del nivel de ruido de la zona y de las características propias del dispositivo (sensibilidad a cambios verticales y horizontales de resistividad, profundidad de investigación, potencia de la señal...). En este trabajo se ha seguido un protocolo denominado *Multiple Gradient* que ofrece una resolución superior a los métodos tradicionales Wenner y Schlumberger. Proporciona una alta densidad de datos cerca de la superficie, y una menor densidad en profundidad.

La operación en campo (Fig. 3 y 4) consiste en realizar medidas en un primer ciclo que involucra a los electrodos de las 4 bobinas instaladas, y un segundo ciclo en el que sólo se utilizan las dos bobinas centrales. La longitud de los perfiles puede extenderse la distancia deseada desplazando la bobina inicial hasta el final del perfil todas las veces que fuera necesario. La unidad central del equipo, mediante el programa secuencial específico previamente indicado, ordena cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición. De esta manera se obtiene un gran número de datos de resistividades aparentes.

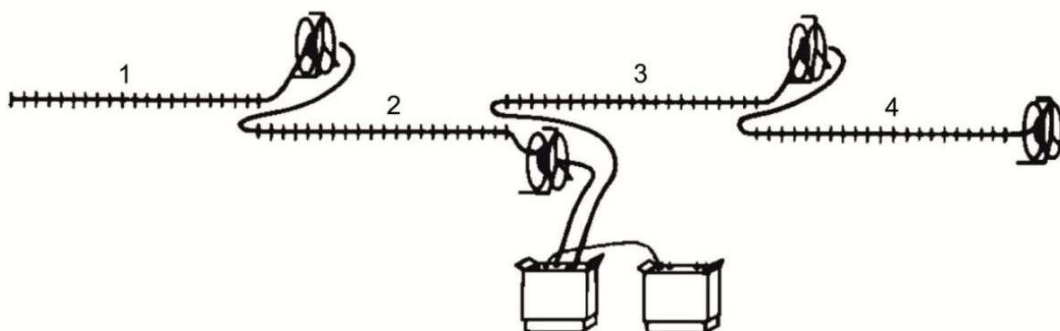


Figura 3: Dispositivo multiple gradient con 4 canales de medida. Se observa la distribución en campo de cables y electrodos a lo largo del perfil y su conexión con la unidad central (Geotomo Software, 2006).

A partir del valor de la corriente inyectada y del voltaje medido se obtiene la resistividad aparente del subsuelo, magnitud que determina la dificultad al paso de la corriente eléctrica en un determinado material. El valor de resistividad obtenido es aparente, y no real, ya que generalmente el subsuelo está compuesto por distintos materiales, y en ese caso el campo eléctrico introducido afecta simultáneamente a las diversas capas, de forma que la resistividad obtenida corresponderá a un valor intermedio de todas ellas. Solo para suelos homogéneos o para profundidades de investigación muy superficiales, el valor de resistividad medido coincidirá con el de resistividad real.



Figura 4: Disposición de los electrodos en el campo conectados al cable a lo largo del perfil nº 1.

El objetivo de este método, cuando se trabaja en perfiles 2D, es obtener una sección de resistividades reales del subsuelo. Cada tipo de material presenta un rango de resistividad más o menos característico (Fig. 5) y su distribución permite determinar la estructura del subsuelo. Para ello es necesario, procesar los datos mediante un programa de inversión con el que transformar las resistividades aparentes obtenidas en campo, a valores de resistividad real. Para la realización de este trabajo se ha utilizado el programa RES2INV.

La tomografía eléctrica ha supuesto en los últimos años un avance considerable con respecto a los métodos de resistividad convencionales, ya que estos métodos sólo utilizan 4 electrodos que se deben ir cambiando manualmente para cada medida, lo que ralentiza la adquisición. En la tomografía eléctrica, al ser una técnica multielectródica, el proceso de adquisición de datos se agiliza ya que se hace de forma automática.

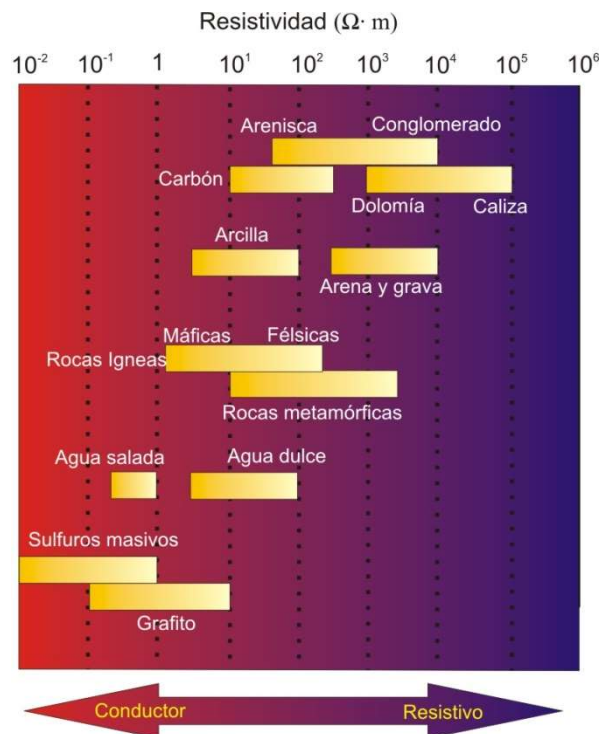


Figura 5: Rangos de variación de la resistividad eléctrica en las distintas rocas y minerales (modificado de Orellana, 1982).

3. EQUIPO Y SOFTWARE EMPLEADO

Para la adquisición de las medidas de tomografía eléctrica se ha utilizado un tomógrafo ABEM Terrameter LS2 (Fig. 6) con cuatro canales de medida que aumentan la velocidad de adquisición de datos respecto a equipos monocanal. A continuación se detallan los componentes del equipo:

- Unidad central (resistivímetro; Fig. 6A): pequeño ordenador con alimentación interna desde donde se programan las medidas (tipo de dispositivo electródico, número de electrodos, espaciado entre ellos, número de medidas a realizar, etc.) y que se encarga de ejecutarlas, verificar el buen estado de las conexiones y almacenar digitalmente todos los resultados.
- Electrodos (Fig. 6C): 80 piquetas metálicas de acero inoxidable para emitir y recibir la electricidad del terreno en pulsos de polaridad opuesta separados por periodos de espera.
- Batería externa: fuente de alimentación para inyectar la corriente al terreno.
- Cable (Fig. 6B): Sistema de cables LUND que permite transmitir la corriente eléctrica a los electrodos; está compuesto por 4 bobinas de 100 m de longitud cada una que consta de 20 conexiones, con intervalos de 5 metros que determina el espaciado máximo que permite utilizar el equipo.
- Conectores (Fig. 6B): pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos para unir los electrodos a las tomas del cable.

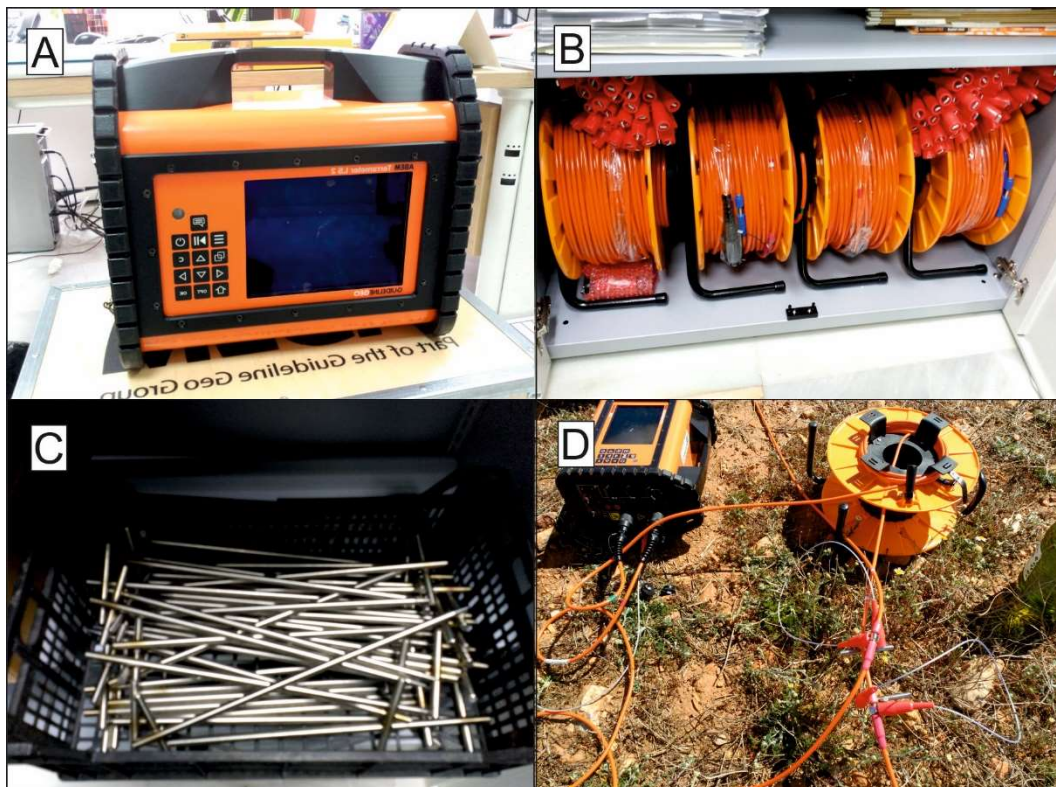


Figura 6: Equipo de tomografía eléctrica. A: Unidad central; B: cables y conectores; C: electrodos; D: Equipo en funcionamiento.

El programa utilizado para la inversión ha sido RES2DINV, de Geotomo Software, que permite realizar el cálculo automatizado (inversión) de modelos bidimensionales de resistividad del terreno a partir de datos obtenidos en campo. Es el software con un uso más generalizado a nivel mundial para el procesado e interpretación de este tipo de datos.

El objetivo de la inversión es obtener un modelo de distribución de las resistividades reales del subsuelo que, dado un determinado dispositivo electródico, genere una respuesta similar (resistividades aparentes teóricas) a los valores de resistividad medidos en campo (resistividades aparentes experimentales). Ambas magnitudes se cuantifican finalmente con el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas).

Se ha determinado la posición geográfica precisa de los perfiles de tomografía eléctrica y los electrodos mediante la técnica de GPS diferencial. Con un equipo GPS *Leyca* consistente en un receptor móvil y una antena (figura 7) se obtienen las coordenadas geográficas y se comparan en tiempo real mediante conexión de datos de internet con la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP). De esta forma se obtienen posicionamientos muy precisos con errores centimétricos.



Figura 7: Posicionamiento de los electrodos mediante GPS diferencial.

4. RESULTADOS

La profundidad de investigación alcanzada mediante tomografía eléctrica depende del espaciado entre electrodos que se instalan durante la adquisición en campo. Cuanto mayor sea la distancia entre ellos, mayor será la profundidad alcanzada pero menor la resolución, y viceversa. En este trabajo en el que se pretende caracterizar el relleno aluvial del Río del Oro, con potencias máximas en torno a la decena de metros, según la campaña de sondeos de reconocimiento previa, se ha considerado que el espaciado entre electrodos recomendable es 1-1.5 metros. Con esta configuración se han obtenido profundidades comprendidas entre 25-15 metros.

En los siguientes apartados se muestran los perfiles de resistividad aparente medidos en campo, los perfiles de resistividad aparente calculados, así como los modelos obtenidos tras la inversión de los datos. La diferenciación de cuerpos de distintas resistividades permite inferir su interpretación geológica en base a los datos de campo y los datos proporcionados por sondeos cercanos. En los diferentes modelos se ha marcado, mediante una línea blanca discontinua, la base del relleno aluvial. La diferencia entre el modelo medido y el calculado nos proporciona el valor de error cuadrático medio (RMS) de los modelos finales.

4.1. Perfil-1

El Perfil-1 se ha realizado en el cauce del Río del Oro, en un tramo rectilíneo de dirección NO-SE (Fig. 8) del sector de Reina Regente. El espaciado entre electrodos utilizado es de 1.5 m y la longitud total del perfil es de 330 m.



Figura 8. Localización sobre foto aérea de la traza del Perfil-1.

En el modelo de resistividad (Fig. 11) se observa una primera capa superficial con valores superiores a 55 ohm·m con un espesor homogéneo de 3-4 m que se corresponde con el relleno aluvial del río. Por debajo, aparece otra capa que se caracteriza por valores de resistividad muy bajos (10-35 ohm·m), con un contraste muy neto, que se correlaciona con la presencia de margas y limos messinienses. Debido a la orientación del perfil, paralelo al cauce del río, se observa un espesor del relleno aluvial prácticamente constante. El valor de RMS de este modelo es de 5.4.

4.2. Perfil-2

El Perfil-2 (Fig. 9), de dirección NE-SO, se realizó en un meandro del río situado en el paraje denominado Huerta de Fernández con un espaciado entre electrodos de 1 m y una longitud total de perfil de 160 m.

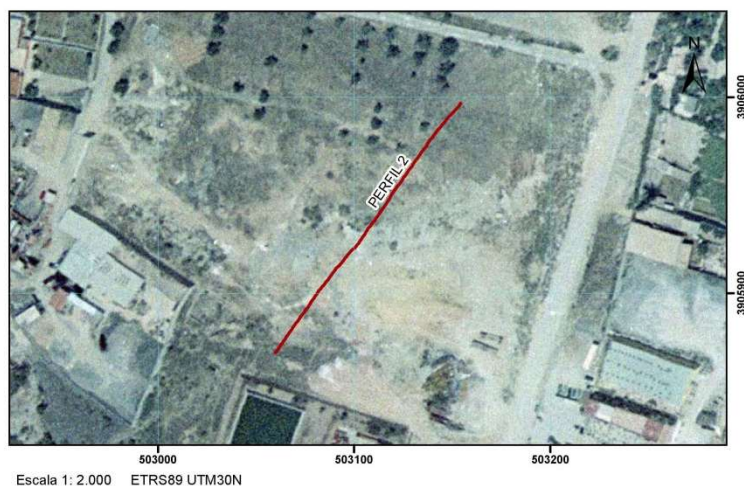


Figura 9. Localización sobre foto aérea de la traza del Perfil-2.

En el modelo de resistividad (Fig. 12) se observa de nuevo una primera capa superficial resistiva con valores comprendidos entre 55 y 200 ohm·m. Esta capa, en la parte inicial del perfil muestra una potencia de 7 m que se va incrementando hacia el NO, con un espesor máximo de 12 m. En la parte inferior, se observan resistividades inferiores relacionadas con la presencia de margas bajo el relleno aluvial. El valor de RMS alcanzado es de 5.4.

4.3. Perfil-3

El Perfil-3 se ha realizado sobre el cauce del Río del Oro, en un tramo rectilíneo E-O a su paso por la zona de Granja Valenciana y con un espaciado de 1.5 m (figura 10). La longitud total del perfil es de 270m.



Figura 10. Localización sobre foto aérea de la traza del Perfil-3.

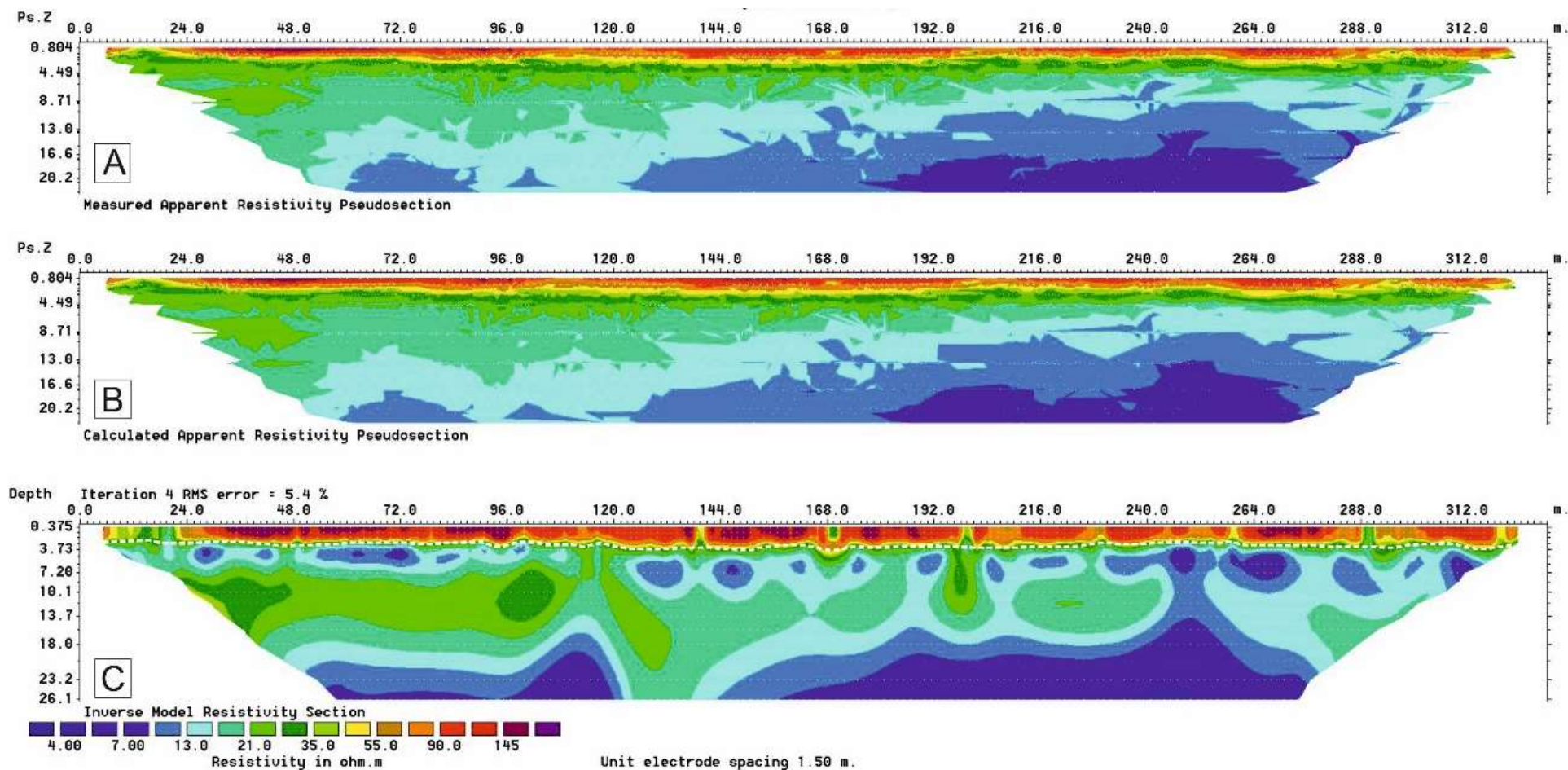


Figura 11. Perfil-1 de resistividad aparente medida en campo (A), calculada (B) e inversión de los datos (C). La línea blanca marca la base del relleno aluvial; exageración vertical x1.5. Orientación del perfil NO (izquierda) – SE (derecha).

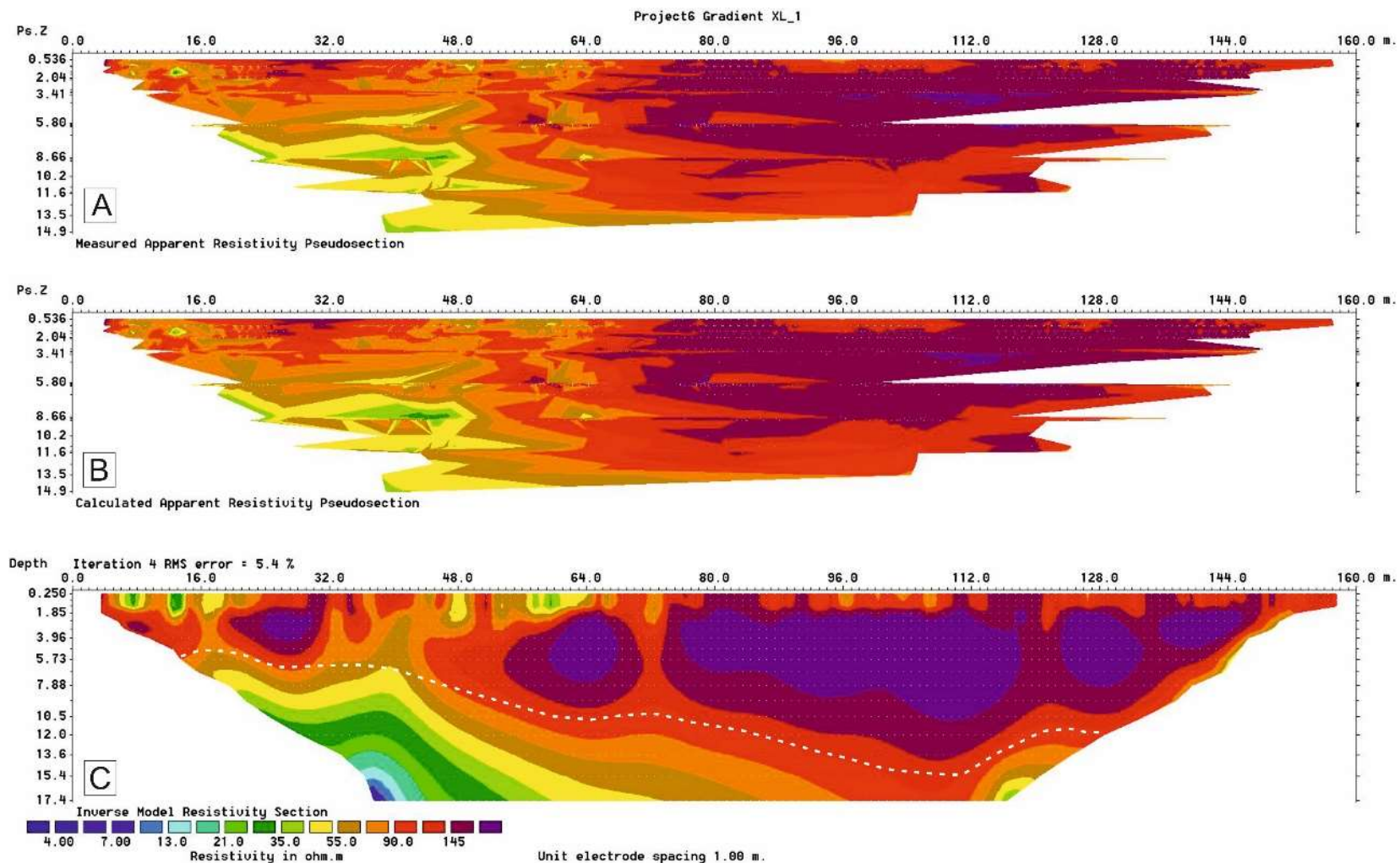


Figura 12. Perfil-2 de resistividad aparente medida en campo (A), calculada (B) e inversión de los datos (C). La línea blanca marca la base del relleno aluvial; exageración vertical x1.5. Orientación del perfil SO (izquierda) – NE (derecha).

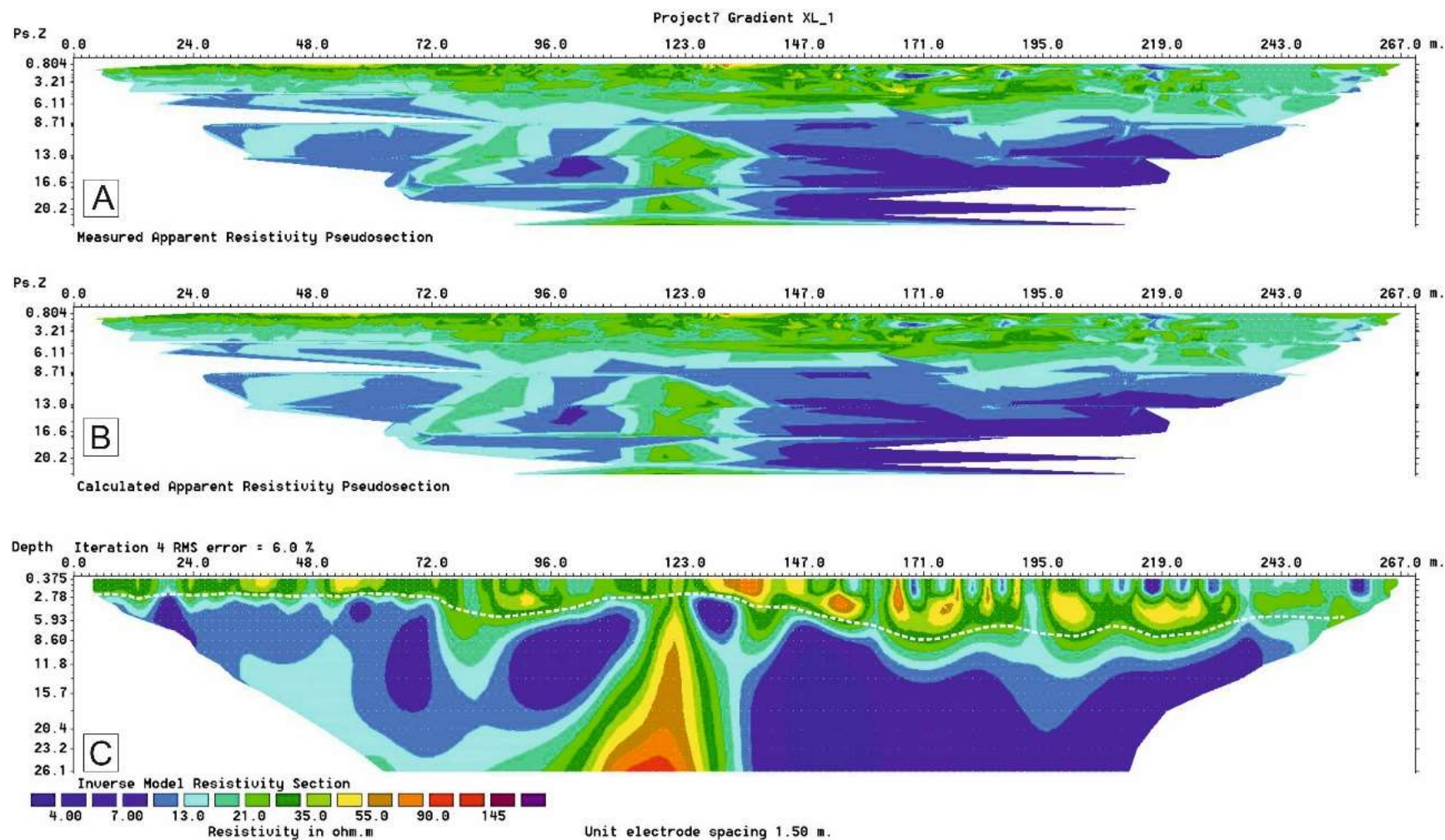


Figura 13. Perfil-3 de resistividad aparente medida en campo (A), calculada (B) e inversión de los datos (C). La línea blanca marca la base del relleno aluvial; exageración vertical x1.5. Orientación del perfil O (izquierda) – E (derecha).

La parte superficial del perfil (figura 13) muestra valores de resistividad heterogéneos muy localizados debido a la existencia de canalizaciones y otras estructuras antrópicas que distorsionan las medidas realizadas. Al igual que en los perfiles anteriores, se observan valores de resistividad altos en la parte superior del perfil ($>30 \text{ ohm}\cdot\text{m}$). La potencia de este cuerpo resistivo oscila entre los 3 m al inicio del perfil y los 8 m en su tramo final. Por debajo se localiza un cuerpo conductor ($<15 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) que se correlaciona con la presencia de margas. Se ha alcanzado un RMS de 6.0.

5. CONCLUSIONES

La tomografía eléctrica es el método de prospección geofísica más adecuado para establecer la geometría de los depósitos asociados al Río del Oro, tanto en su cauce como en los meandros adyacentes, ya que existe un marcado contraste de resistividad entre dichos materiales y las margas infrayacentes.

De manera general, los tres perfiles tienen una distribución de resistividades similar. En la parte superior de los perfiles se distingue un cuerpo resistivo ($>30 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) que se corresponde con el relleno aluvial del Río del Oro mientras que la parte inferior de las secciones refleja valores más conductores ($<15 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) debido a la presencia en profundidad de margas messinienses. Las potencias registradas en el cauce varían entre 3-8 m mientras que en el Perfil-2 hay una mayor variabilidad y se llega a alcanzar la decena de metros.

6. REFERENCIAS

- Geotomo Software, (2006). RES2DINV ver. 3.55. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software, Penang, Malaysia.
- Loke, M. H. (2004). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 128 p.
- Orellana, E. (1982). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2ª ed. Madrid. Ed. Paraninfo. 538 p.