UNIVERSIDAD DE OVIEDO

FACULTAD DE GEOLOGÍA

MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Valoración de la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) para la caracterización de zonas poco profundas

JULIO-2017

Autor: David Cimadevilla Fuente

Tutor: José Paulino Fernández Álvarez

Cotutor: Jorge Gallastegui Suárez

Máster en Recursos Geológicos
e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo

ASTURIAS
CAMPUS DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL
AD FUTURUM

D. DAVID CIMADEVILLA FUENTE, autor del Trabajo Fin de Máster titulado "VALORACIÓN DE LA TÉCNICA GEOFÍSICA DE LOS SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SEDT) PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ZONAS POCO PROFUNDAS", confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 11 de JULIO de 2017

Fdo. DAVID CIMADEVILLA FUENTE

El Dr. JOSÉ PAULINO ÁLVAREZ FERNÁNDEZ ÁLVAREZ, Profesor Contratado-Doctor del Departamento de Explotación y Prospección de Minas y el Dr. JORGE GALLASTEGUI SUÁREZ, Profesor Titular, del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirman que han tutelado el trabajo "VALORACIÓN DE LA TÉCNICA GEOFÍSICA DE LOS SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SEDT) PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ZONAS POCO PROFUNDAS", realizado por D. DAVID CIMADEVILLA FUENTE, y autorizan su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 11 de JULIO de 2017

Fdo. JOSÉ PAULINO FERNÁNDEZ ÁLVAREZ (Tutor)

Fdo. JORGE GALLASTEGUI SUÁREZ (Cotutor)

-AGRADECIMIENTOS -

En primer lugar, me gustaría agradecer al tutor del trabajo, D. Paulino Fernández Álvarez, por concederme la posibilidad de formar parte de la Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y de Ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo que me permitió continuar con el desarrollo de mi carrera profesional como geólogo y por su ayuda en el desarrollo del trabajo presentado.

Estoy especialmente agradecido a D. Jorge Gallastegui Suárez, por prestarse amablemente a la revisión del trabajo, por sus correcciones y comentarios realizados.

De igual forma me gustaría agradecer a mis compañeros de la Unidad de Modelización, por su apoyo incondicional en muchas de las tareas realizadas en este trabajo, en especial a Lorena por su asistencia incondicional en las campañas de campo. A David físico, por sus lecciones de Matlab. A Ramón, por animarme con este trabajo. A Andrés, que está, pero no está, por insistir en que acabase el Máster. También a Enol y Carlos, los primeros que me presentaron el "electromagnético". A los "minions", César, Alex y Luis, ya casi "ingenieritos" que alguna vez les tocó mancharse de barro en campo y a Jéssica, por sus correcciones y apoyo en las campañas de campo.

Me gustaría reconocer también a otras personas que indirectamente me aportaron, durante los últimos años, muchos conocimientos en las aventuras como geólogo por España, Honduras y Guinea.

A mi familia, en especial a mis padres y al incansable apoyo de Elena día a día.

-RESUMEN-

La geofísica aplicada hace referencia a las técnicas utilizadas en este campo de la ciencia que permiten obtener información indirecta de los fenómenos naturales a través del estudio de sus propiedades físicas. Los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT) es una herramienta de prospección geofísica que responde a las propiedades eléctricas del subsuelo, en concreto a la conductividad/resistividad de los materiales.

El TFM pretende, tras una revisión de los fundamentos teóricos, evaluar la capacidad del método para la caracterización de zonas poco profundas. Para ello se analizan varios sondeos SEDT realizados en el marco de varios proyectos de investigación con el fin de profundizar en el conocimiento de la técnica.

A través de dos capítulos claramente diferenciados, se analiza el problema de no-unicidad, es decir, la obtención de modelos equivalentes que se ajustan a los datos observados en campo en la misma medida. Para ello se analizan los sondeos realizados sobre una balsa de lodos clausurada que no permite técnicas directas de análisis con el objetivo de caracterizar el estado de los lodos almacenados y determinar el nivel freático en el interior de la balsa. En otro de los capítulos de analizan seis sondeos SEDT tomados en distintas localizaciones con el objetivo de determinar las propiedades físicas de los materiales rocosos, estudiar la respuesta electromagnética en cada uno de ellos y la capacidad de obtener otro tipo de información geológica.

Asimismo, se plantean varias contribuciones, de interés práctico en una campaña de campo y en el análisis de los datos con el equipo *TerraTEM*®:

- Desarrollo de una metodología de trabajo en campo.
- Modo de procesado y almacenaje de datos
- Utilización de softwares específicos GIS para representación y visualización de datos.

Los resultados obtenidos han permitido establecer las siguientes conclusiones:

- La técnica SEDT, permitió resolver con cierto grado de incertidumbre, como consecuencia del fenómeno de equivalencia, un problema hidrogeológico sobre una balsa de lodos sellada superficialmente que no permite el estudio con otro tipo de técnicas.
- Se pone de manifiesto la capacidad de los SEDT en la caracterización de zonas poco profundas, sobre todo en materiales en los que los valores de resistividad son relativamente bajos.
- Los valores obtenidos para determinadas formaciones geológicas se ajustan a las obtenidas por otros autores en estos mismos materiales con la misma técnica geofísica.

-ABSTRACT-

Applied geophysics refers to the techniques used in this field of science that can obtain indirect information from natural phenomena through the study of their physical properties. The Time Domain ElectroMagnetic (TDEM) is a tool of geophysical prospecting that responds to the electrical properties of the subsoil, in particular to the material´s conductivity/resistivity.

After a review of the theoretical foundations, this master's thesis intends to evaluate the ability of the method for the characterisation of shallow areas. For this, several TDEM soundings are analyzed in the framework of several research projects in order to deepen the knowledge of the technique.

Through two clearly differentiated chapters, the problem of non-uniqueness is analyzed, that is, obtaining equivalent models that fit the data observed in the field to the same extent. For this purpose, we analyze the surveys carried out on a closed tailings pond which don´t allow direct analysis techniques with the objective of characterizing the state of the stored tailings and determining the water table inside the waste dump.

In a second chapter, six TDEM soundings, performed in different locations, are analyzed to determine the physical properties of rocks, to study the electromagnetic response in each of them and the ability to obtain other geological information.

There are also several contributions of practical interest in a field campaign and in the analysis of the data with the *TerraTEM*® instrument:

- Development of a methodology of work in the field.
- Processing and storage of data.
- Use of specific GIS software for representation and visualization of data.

The results obtained allowed to establish the following conclusions:

- The TDEM method made it possible to solve with a certain degree of uncertainty, as a consequence of the non-uniqueness phenomenon, a hydrogeological problem on a tailings waste dump that does not allow the study with other techniques.
- The ability of TDEM soundings to characterize shallow areas is demonstrated, especially in materials where resistivity values are relatively low.
- The values obtained for certain geological formations are in accordance with those obtained by other authors in these same materials with the same geophysical technique.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. MOTIVACIONES Y OBJETIVOS 7
1.1 Motivaciones 7
1.2 Objetivos del trabajo 8
1.2.1 Objetivos primarios 8
1.2.2 Objetivos secundarios 8
1.3 Descripción de la estructura del trabajo fin de máster 8
2. INTRODUCCIÓN 9
2.1 Geofísica aplicada 9
2.2 Antecedentes en la prospección del subsuelo 9
2.3 Métodos de prospección geofísica 9
2.4 Métodos electromagnéticos 10
2.5 Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) 11
3. CONTEXTO Y MARCO GEOLÓGICO 13
3.1 Contexto y localización de los SEDT 13
3.2 Contexto geológico 15
4. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LOS SEDT 18
4.1 Fundamento físico del método utilizado 18
4.2 Propagación de las corrientes parásitas 19
4.3 Descripción de la señal de salida y la señal de entrada (recibida) 22
4.4 Configuraciones del transmisor/receptor 23
4.5 Fuentes de ruido 24
5. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS 25
5.1 Conductividad/Resistividad 25
5.2 Conducción eléctrica entre poros 26
6. LA CAMPAÑA GEOFÍSICA 28
6.1 Equipo utilizado 28
6.2 Diseño de la campaña 30
6.2.1 Recogida de información preliminar 30
6.2.2 Ensayo 30
6.2.3 Configuración del dispositivo 30
6.2.4 Diseño del procedimiento en campo 31
6.3 Adquisición de los datos 32
6.3.1 Parámetros de configuración 32
6.3.2 Organización de los archivos de datos 34
7. PROCESADO Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS 35
7.1 Procesado 35

7.2 Presentación de los datos....36
7.2.1 Perfiles Voltaje-tiempo....36
7.2.2 Algoritmo de Spiker....37
7.3 Interpretación de los datos SEDT....37
7.3.1 Modelización....38
7.3.2 No unicidad....38
8. PROBLEMA DE EQUIVALENCIA EN LOS SEDT....39
8.1 Introducción....39
8.2 Información complementaria al estudio geofísico....40
8.2.1 Información a priori proveniente del proceso constructivo....41
8.2.2 Información proveniente del análisis químico de las aguas drenadas.....42
8.2.3 Información de los caudales drenados....43
8.3 Detección de la no-unicidad....44
8.4 Resultados....44
8.4.1 La transformación de Spiker....45
8.4.2 Modelización e inversión....46
8.4.3 Definición de la no unicidad....48
8.5 Discusión de los resultados....51
9. ANÁLISIS COMPARATIVO DE VARIOS SEDT EN MATERIALES CON DIFERENTES PROPIEDADES FÍSICAS....56
9.1 Introducción....56
9.2 Adquisición de los SEDT....56
9.3 Descripción de la información recopilada a-priori....57
9.4 Análisis de los datos....59
9.4.1 Análisis de las curvas de decaimiento....59
9.4.2 Obtención de pseudoperfiles....61
9.5 Interpretación de los SEDT....62
9.6 Discusión de los resultados....69
10. CONCLUSIONES....70
REFERENCIAS....71
ANEXOS....73

1
Motivaciones y objetivos

El trabajo fin de máster, TFM en adelante, forma parte del "Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica" impartido por el departamento de Geología en la Universidad de Oviedo. En él se presenta un nuevo método de prospección geofísica a los ya estudiados en los estudios de Licenciatura y Máster, los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT). En este capítulo se presentan las motivaciones que han llevado a realizar este trabajo y los objetivos definidos.

1.1 MOTIVACIONES

La geofísica como campo multidisciplinar en el que se estudian los fenómenos naturales desde el punto de vista físico se presenta como una de las competencias profesionales que hoy en día tienen los titulados en geología. La prospección del subsuelo a partir del estudio de sus propiedades físicas permite obtener información de la estructura y distribución de los materiales que constituyen el sustrato geológico. Las herramientas geofísicas permiten obtener información válida reduciendo costes, con un menor impacto en el terreno y minimizando tiempos de ejecución abarcando mayores áreas de investigación.

Estos tipos de metodologías son utilizadas para la resolución de problemas geológicos relacionados con la prospección de yacimientos metálicos, hidrogeología, geotecnia, arqueología, medio ambiente, cartografía geológica, etc.

El TFM se basa en las actividades realizadas en los dos últimos años en la "Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos no Destructivos" de la Universidad de Oviedo con la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT). Esta técnica permite medir variaciones en la conductividad eléctrica de los materiales del subsuelo, complementando otros métodos geofísicos estudiados en los planes de estudio en la licenciatura de geología y máster tales como la sísmica, la tomografía eléctrica, la gravimetría y la magnetometría.

Se trata de una técnica que, no siendo novedosa a nivel internacional, no se encuentra muy extendida en el ámbito de la prospección geofísica en España a diferencia de los SEV y ERT (sondeos eléctricos verticales y tomografía eléctrica resistiva). Permite investigar desde zonas poco profundas - en niveles superficiales- hasta más de 1500 metros de profundidad. Este hecho hace que sea de gran interés aumentar el conocimiento que se tiene del método.

El uso de esta técnica para la caracterización de zonas poco profundas muestra un interés particular en aplicaciones medioambientales y geotécnicas. Se profundiza en los aspectos técnicos que se consideran importantes a la hora de llevar a cabo la campaña geofísica, se establecen unas pautas básicas de conocimiento desde un punto de vista didáctico y metodológico y se valora la capacidad de la técnica para la caracterización de distintos tipos de materiales en el contexto geológico asturiano. El trabajo analiza en profundidad, con casos reales, la capacidad del método para dar solución a diversas incógnitas que se presentan en el análisis e interpretación de los datos.

Para el desarrollo del trabajo se usaron varios sondeos realizados en distintas localizaciones de Asturias en el marco de varios proyectos con objetivos de estudio diferentes. Estos sondeos fueron utilizados en este trabajo con la finalidad de definir varios problemas a los que se enfrenta la interpretación con esta técnica geofísica.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos definidos en el presente trabajo son eminentemente metodológicos y pueden dividirse en primarios y secundarios. A continuación, se describe cada uno de ellos.

1.2.1 Objetivos primarios

- Evaluar la capacidad de la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) en la prospección de materiales con distintas características geológicas.

- Desarrollar una metodología de trabajo en campo con la técnica de SEDT que permita optimizar los tiempos de ejecución de un sondeo.

- Analizar el problema de la no-unicidad con los datos obtenidos en el estudio hidrogeofísico de una balsa de lodos en la mina de oro del Valle-Boinás.

1.2.2 Objetivos secundarios

- Estimar la configuración idónea a utilizar para la caracterización de zonas poco profundas.

- Analizar la respuesta electromagnética de varios sondeos con características electromagnéticas diferentes y valorar la capacidad del método para caracterizar materiales con resistividades altas.

- Aplicar programas específicos para el procesado y presentación de los datos: MATLAB en la elaboración de gráficos, ArcGIS de ESRI para almacenamiento y representación de los datos.

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

El trabajo se divide en dos secciones.

- La primera parte engloba los capítulos 1-7 en los que se describe la metodología, fundamento teórico de la técnica y el modo de procesado de los datos. En esta primera sección se incorporan también las contribuciones realizadas para el desarrollo de las campañas geofísicas y las tareas que engloban el procesado, representación e interpretación de los datos. Este apartado se utilizará como referencia y apoyo para el desarrollo de distintas cuestiones que se tratan en las investigaciones desarrolladas en la segunda sección.

- La segunda parte del trabajo, capítulos 8 y 9, presenta dos casos de estudio con la técnica SEDT en los que se discuten los resultados obtenidos y se analizan varios problemas intrínsecos a la técnica geofísica empleada:

    - El problema de la no unicidad, tomando como ejemplo el estudio realizado en una balsa de lodos de mina clausurada.
    - La baja resolución del método en materiales con resistividad elevada.

2
Introducción

2.1 GEOFÍSICA APLICADA

El término geofísica aplicada hace referencia a las técnicas utilizadas en este campo de la ciencia que permiten obtener información indirecta de los fenómenos naturales a través del estudio de sus propiedades físicas.

La demanda de recursos geológicos hizo necesario ampliar el conocimiento de las estructuras y materiales que conforman la corteza terrestre, la delimitación espacial y cuantificación de esos recursos. Una de las técnicas utilizadas en la industria minera, petrolera y en la obra civil para obtener de forma directa información de los materiales es a partir de la realización de sondeos mecánicos. Este tipo de prospección supone un elevado coste económico por metro lineal y una baja cobertura espacial, que hace que la caracterización de una zona extensa, solamente con el uso de sondeos mecánicos, sea prácticamente inviable desde el punto de vista económico y logístico.

El avance en conocimiento y nuevas tecnologías hizo que surgieran técnicas que permitieran la caracterización del subsuelo a partir del estudio de sus propiedades físicas, con alta cobertura espacial, en un corto periodo de tiempo y a menor coste que los sondeos mecánicos. Entre sus aplicaciones, destaca el uso en hidrogeología, minería, arqueología, geotecnia, medio ambiente y cartografía geológica.

2.2 ANTECEDENTES EN LA PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO

Las primeras referencias a la utilización de técnicas geofísicas en exploración se remontan a 1843. Von Wrede propuso que las herramientas utilizadas para medir variaciones en el campo magnético terrestre podrían ser utilizadas también para investigar yacimientos de magnetita. Esta técnica no fue impulsada hasta el año 1879 con la publicación del libro *'On the examination of iron ore deposits by magnetic methods'* del profesor Robert Thalen, lo que supone la aparición del primer magnetómetro que permitía determinar la orientación, buzamiento y profundidad de diques de magnetita.

La demanda de metales y la expansión de la exploración de petróleo hicieron que aumentase el desarrollo de las técnicas y la capacidad y sensibilidad de éstas para la detección de depósitos y estructuras. La II Guerra Mundial supuso mejoras en el tipo de instrumentación y aplicación de medios digitales para el procesado e interpretación de los datos. Muchas de las técnicas usadas en la actualidad derivan de este periodo en el que se utilizaron metodologías de este tipo para la localización de armas, submarinos y barcos. La emisión de ondas acústicas en el agua, conociendo la velocidad de propagación se utilizó para el reconocimiento de objetos, nace así la técnica de sonar, usada en estudios geofísicos en la actualidad. De igual forma aparecieron o se desarrollaron técnicas como el radar, la sísmica de refracción y técnicas magnéticas.

2.3 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Según la propiedad física a la que responde, las técnicas geofísicas se pueden clasificar en cinco clases principales:

- Gravitacionales
- Magnéticas
- Radiométricas
- Sísmicas
- Eléctricas y electromagnéticas

Los métodos gravimétricos y magnéticos detectan diferencias en densidad y magnetismo respectivamente midiendo variaciones en los campos gravimétricos y magnéticos de la tierra. El método radiométrico responde a variaciones en la radioactividad natural, de las cuales se puede estimar el contenido de los elementos radioactivos. El sísmico detecta variaciones en las propiedades elásticas de las rocas, que se manifiesta como variaciones en el comportamiento de la propagación de las ondas a través de los materiales. Los métodos electromagnéticos, responden según las propiedades eléctricas de las rocas y minerales.

Otra forma de clasificación de las técnicas geofísicas se hace en función de la fuente energética a la que responden los materiales: fuente natural o fuente artificial. Según este criterio se clasifican como métodos de fuente pasiva y activa, respectivamente. Dentro de las técnicas de fuente pasiva se encuentran las técnicas sísmicas, magnéticas, gravitacionales, radiométrica y la de potencial espontáneo (SP). La respuesta se mide por medio de un instrumento que actúa como receptor de la propiedad física a la que responde.

Los métodos activos incluyen aquellos en los que es necesario introducir una fuente energética de forma artificial, de manera que se estimula la reacción del terreno a la energía incorporada. Es el ejemplo de las ondas sísmicas, corrientes eléctricas, ondas electromagnéticas. La medida geofísica es realizada mediante un instrumento que actúa como receptor. El hecho de incorporar una fuente de energía, a partir de un transmisor, hace que este tipo de métodos sean más complejos y más costoso trabajar con ellos. En la Fig. 2.1 se indican los métodos geofísicos más extendidos y sus aplicaciones.

Tabla 2.1 Principales métodos geofísicos y sus aplicaciones (Reynolds, 1997)

		Aplicaciones (ver código inferior)																	
Método geofísico	**Propiedad física**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Gravimetría	Densidad	P	P	s	s	s	s	!	!	s	!	s	s	s	s	!	!	s	!
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	P	P	P	s	!	m	!	P	P	!	P	s	!	m	!	P	P	!
Sísmica de refracción	Densidad	P	P	m	P	s	s	!	!	!	!	m	P	s	s	!	!	!	!
Sísmica de reflexión	Densidad	P	P	m	s	s	m	!	!	!	!	m	s	s	m	!	!	!	!
Tomografía eléctrica resistiva	Resistividad	m	m	P	P	P	P	P	s	P	m	P	P	P	P	P	s	P	m
Potencial espontaneo	Diferencia de potencial	!	!	P	m	P	m	m	m	!	!	P	m	P	m	m	m	!	!
Polarización inducida	Resistividad, capacitancia	m	m	P	m	s	m	m	m	m	m	P	m	s	m	m	m	m	m
Métodos electromagnéticos	Conductancia, inductancia	s	P	P	P	P	P	P	P	P	m	P	P	P	P	P	P	P	m
EM-VLF	Conductancia, inductancia	m	m	P	m	s	s	s	m	m	!	P	m	s	s	s	m	m	!
GPR	Permitividad, conductividad	!	!	m	P	P	P	s	P	P	P	m	P	P	P	s	P	P	P
Magnetotelúrico	Resistividad	s	P	P	m	m	!	!	!	!	!	P	m	m	!	!	!	!	!

P=método primario; s=método secundario; m=se utiliza, pero no es con el mejor rendimiento o no se ha desarrollado en este campo; (!)= no se usa

Aplicación

1 Exploración de hidrocarburos (gas, carbón y petróleo)
2 Estudios geológicos regionales
3 Exploración y desarrollo de yacimientos minerales
4 Aplicaciones en ingeniería
5 Aplicaciones hidrogeológicas
6 Detección de cavidades superficiales
7 Mapeo de plumas contaminantes
8 Localización y delimitación de objetos metálicos
9 Aplicación arqueológica
10 Aplicación forense

2.4 MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Este tipo de métodos se basa en el análisis de la propagación de ondas electromagnéticas en el subsuelo. En función de la fuente de ondas, natural o artificial, una de las posibles clasificaciones de los métodos electromagnéticos es la que se presenta en la Tabla 2.2. En el caso de los métodos de fuente artificial, se componen de un sistema emisor-receptor que actúan como fuente de energía y escucha respectivamente.

Tabla 2.2 Métodos electromagnéticos utilizados en exploración geofísica (Migliano Quintana, 2012)

FUENTE	NATURAL	Magnetolerúrico
		Audiomagnetotelúrico
		Potencial natural
		Fuente natural
		Sondeo geomagnético profundo
	ARTIFICIAL	Very low frecuency (VLF)
		Radar de penetración terrestre (GPR)
		Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)
		Sondeos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia
		Audiomagnetotelúrico de fuente controlada, Control Source Audio Magneto Telluric (CSAMT)
		Radiomagnetolerúrico (RMT)

En el siguiente apartado se profundiza en la técnica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo, técnica que ha sido utilizada para la realización de las campañas geofísicas de las que se toman los datos para la realización de este trabajo.

2.5 SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SEDT)

La realización de un SEDT consiste en inyectar una corriente continua en un bucle o bobina transmisora (Tx) generando un campo magnético primario constante en el tiempo. Cuando se interrumpe de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (Tx), el campo magnético primario desaparece y esta variación temporal induce, según la Ley de Faraday, unas corrientes parásitas en los materiales conductores del subsuelo.

Estas corrientes fluyen en trayectorias cerradas, migrando en profundidad y lateralmente, disminuyendo su intensidad a lo largo del tiempo. Asociado a las corrientes parásitas o inducidas existe un campo magnético secundario que llega a superficie e induce un voltaje en la bobina receptora (Rx) (Fig. 2.1). La forma en que decae el voltaje medido en superficie aporta información sobre la conductividad del subsuelo ya que la magnitud y distribución de la corriente inducida depende de las propiedades eléctricas del medio.

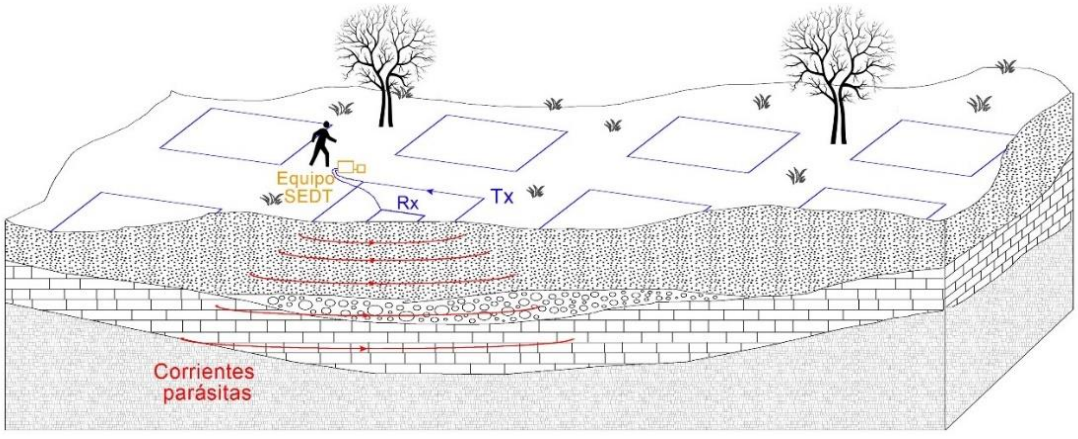


Fig. 2.1 Concepto de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo. En superficie, el lazo transmisor (Tx) induce unas corrientes (corrientes parásitas) que se difunden en profundidad. Estas inducen un voltaje que se recibe en la antena receptora (Rx). Los lazos se desplazan sobre la superficie realizando varias estaciones de muestreo lo que permite estudiar la zona con buena resolución.

Históricamente, el desarrollo de las técnicas electromagnéticas comenzó en los años 20 en los Países Escandinavos, Estados Unidos y Canadá para la detección de yacimientos metálicos. Hasta los años 60

prácticamente todos los equipos electromagnéticos se basaban en la medición en una frecuencia determinada, serían los primeros equipos de sondeos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia.

La primera manifestación en el uso del método en el dominio del tiempo viene de Wait, (1951) para la determinación de los parámetros de yacimientos de sulfuros masivos, que lleva en 1953 a una patente a favor de *Newmont Exploration Ltd.* (Wait, 1956). No fue hasta 1962 cuando se desarrolló por primera vez, de forma satisfactoria, el método *SEDT EMP system* que consistía en un gran transmisor y una antena compacta con varias vueltas. En 1964 se realiza satisfactoriamente la primera prueba con el equipo *EMP* en Chipre (Dolan, 1970) y Sudáfrica. En 1958 se desarrolla *INPUT*, el primer sistema TEM aerotransportado (Barringer, 1962).

En la URSS la investigación de métodos inductivos comienza en 1958 en el instituto de prospección geológica y exploración. En 1960 la investigación genera sus frutos y desarrollan la primera versión de un sistema TEM, el *MPPO-1*, que utiliza transmisor y receptor en un mismo lazo (Velikin and Bulgakov, 1967). En los años 70 los avances en computación generan una prolifeeración de equipos con este tipo de técnica geofísica. En 1977 la CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) en Australia desarrollaron el primer sistema TEM con microprocesasor de control, *SIROTEM* (Buselli and O'Neill, 1977), que operaba con un lazo en la configuración *single-loop*. En los años sucesivos fueron saliendo al mercado diferentes equipos con nuevas posibilidades en el procesado de datos y capacidad de investigación.

La utilización de lo SEDT en España comenzó en los años 80 con carácter de ensayos por parte de IGME y de otras organizaciones como TRAGSA, ENUSA, etc. (Sanz and Calzada, 2000). En 1987 se publica el primer trabajo en el "Boletín Geológico y Minero" del IGME con las primeras experiencias con esta técnica para demostrar las posibilidades del método en comparación con la técnica de los sondeos eléctricos verticales (SEV) que se venían utilizando hasta el momento (Granda Sanz et al., 1987). Fue entonces cuando se integró como herramienta de prospección geofísica en proyectos de manos de ENRESA para el estudio de formaciones arcillosas y evaporíticas (Sanz and Calzada, 2000).
La utilización de transmisores de pequeño tamaño para prospectar a profundidades menores de 100 m se ha venido utilizando con gran éxito en las últimas dos décadas. Auken et al., (2003) desarrollaron el sistema *PATEM* que utiliza trasmisores de 40x40 m en prospección hidrogeológica. En los últimos años se desarrollaron nuevos sistemas que permiten investigar en un amplio rango de profundidades, resultando equipos muy efectivos para trabajar de forma ágil y eficiente. El equipo *TerraTEM*® (Monex GeoScope), evolución del *SIROTEM*, se trata de un equipo que permite investigar desde zonas poco profundas de menos de 10 m hasta más de 2000 m.

Como se muestra en la Tabla 2.1 la aplicación de la técnica de los sondeos electromagnéticos SEDT, se trata de un método muy versátil que se ha utilizado en numerosos campos de investigación y a distintas escalas, desde prospección de yacimientos minerales a grandes profundidades hasta aplicaciones de geofísica superficial.

Entre las aplicaciones a destacar y algunos de los autores destacados:

- Aplicaciones hidrogeológicas (Fitterman and Stewart, 1986) (Danielsen et al., 2003)
- Exploración de recursos minerales (Palacky, 1988) (Gómez-Ortiz et al., 2014)
- Aplicaciones medioambientales (Hallbauer-Zadorozhnaya and Stettler, 2009)
- Detección de intrusión salina en acuíferos costeros (Goldman et al., 1988) (Kafri and Goldman, 2006)
- Caracterización de zonas de falla (Bedrosian et al., 2013) (Weber et al., 2012)
- Mapeo geológico (Dennis and Cull, 2012) (Rachel Dennis, 2011)

3
Contexto y marco geológico

3.1 CONTEXTO Y LOCALIZACIÓN DE LOS SEDT

Los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) utilizados para llevar a cabo este trabajo se han obtenido a lo largo de dos años de trabajo con la "Unidad de Modelización y Ensayos No Destructivos" de la Universidad de Oviedo. Se realizaron en diversas zonas del Principado de Asturias, en el marco de varios proyectos citados a continuación, con diferentes objetivos de investigación y como complemento a otras técnicas de estudio. En la Fig. 3.1 se sitúan cada una de las localizaciones de muestreo con la nomenclatura utilizada que se seguirá en este trabajo.

Los proyectos a los que se hace referencia a lo largo del trabajo son:

- *Informe hidrogeológico con motivo de las futuras obras de ampliación del vertedero de R.S.U de la Zoreda*: se han realizado un total de 12 SEDT en las proximidades del vertedero de R.S.U (Serín) que junto a datos de sondeos geotécnicos realizados en la zona sirve como información complementaria para complementar la información que existe de la zona y caracterizar la sucesión Jurásica-Cretácica. En el capítulo 9 se utilizan los sondeos (COG3 y COG5) realizados sobre diferentes materiales.

- *Estudio hidrogeofísico de la balsa de lodos clausurada de El Valle-Boinás.* Se realizó una malla de 22 sondeos sobre una balsa de lodos clausurada en la mina de oro del Valle-Boinás con objeto de delimitar el estado actual de la balsa desde el punto de vista hidrogeológico. La información obtenida con los datos geofísicos se complementó con estudios del proceso constructivo, análisis de las curvas de drenaje del interior de la balsa y datos geoquímicos de las aguas drenadas.

- *Proyecto Geocantábrica: Procesos modeladores del relieve de la Cordillera Cantábrica.* En el marco del proyecto FC-15-GRUPIN14-44, se realizaron varias campañas geofísicas con el fin de estudiar la falla de Ventaniella a su paso por Asturias: en la zona norte, en las proximidades de Avilés, en el sur en la localidad tipo en Ventaniella y en la zona central en las proximidades de la localidad de El Solanu (Nava). En este trabajo se analizan dos de los sondeos realizados en la última zona (SOL7-Stn1 y SOL7-Stn6)

- *Estudio hidrogeofísico del sinclinal de Perlora.* Se realizó una batería de sondeos próximos a la línea de costa y 500 m hacia el interior con el objeto de caracterizar la posible intrusión salina a través de los materiales calcáreos de la formación Barcaliente (PER18)

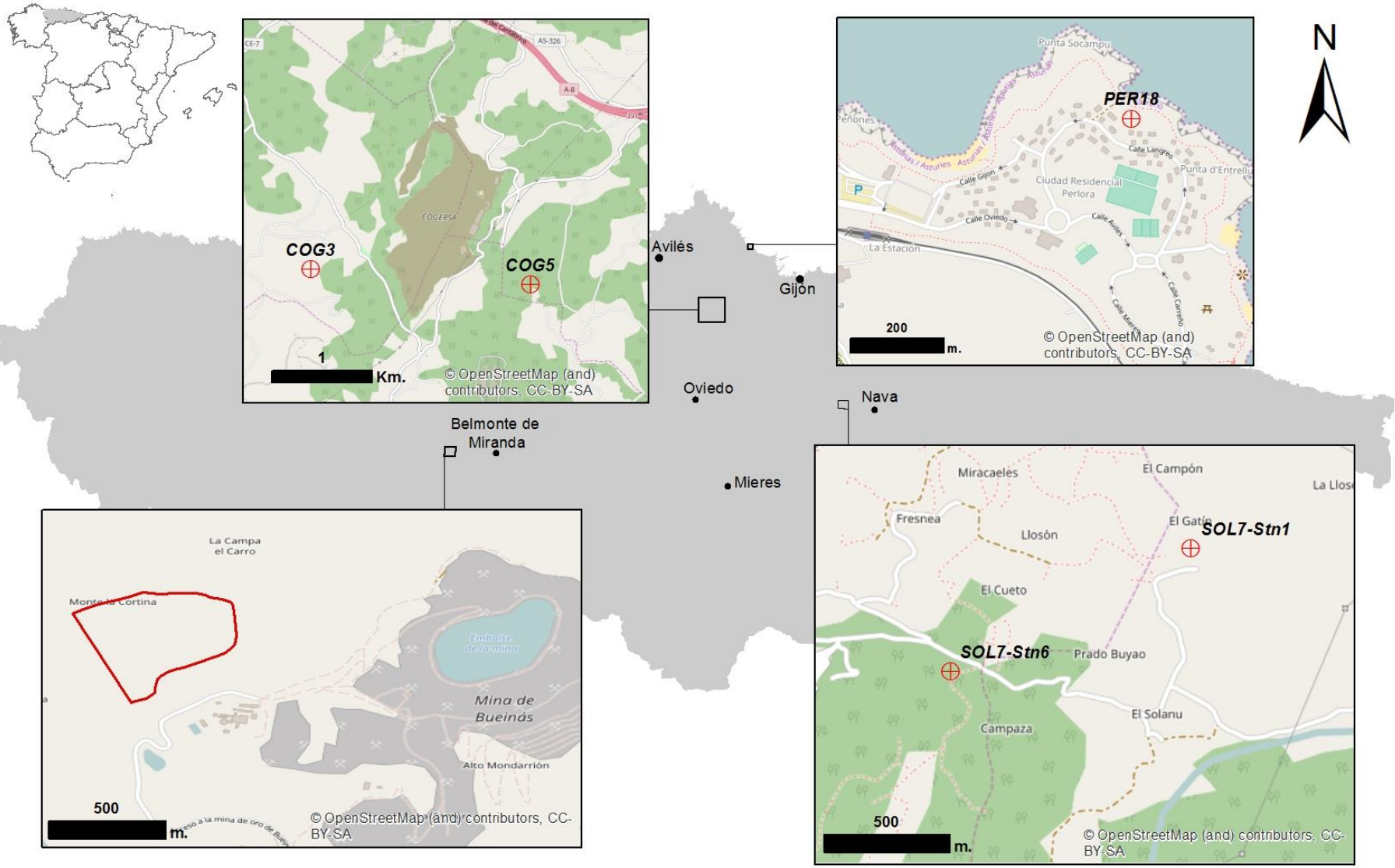


Fig. 3.1 Localización de los SEDT tratados en el trabajo

3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

Las diferentes zonas de estudio se encuentran dispersas dentro de la denominada Zona Cantábrica (Fig. 3.2), de acuerdo con la subdivisión del Macizo Ibérico del noroeste de la Península Ibérica de Lotze, (1945) y de la cobertera Permo-Mesozoico-Terciaria que la cubre discordantemente. La Zona Cantábrica constituye la parte más externa de la cordillera varisca y está constituida por rocas del Cámbrico al Carbonífero, sin prácticamente metamorfismo ni foliaciones tectónicas en la que abundan sedimentos sinorogénicos. Se caracteriza por presentar una deformación superficial con cabalgamientos y mantos de despegue y pliegues asociados. La cobertera se depositó discordantemente y se deformó posteriormente en relación con los procesos que dieron lugar a la apertura y posterior cierre parcial del Golfo de Vizcaya y al levantamiento alpino de la Cordillera Cantábrica.

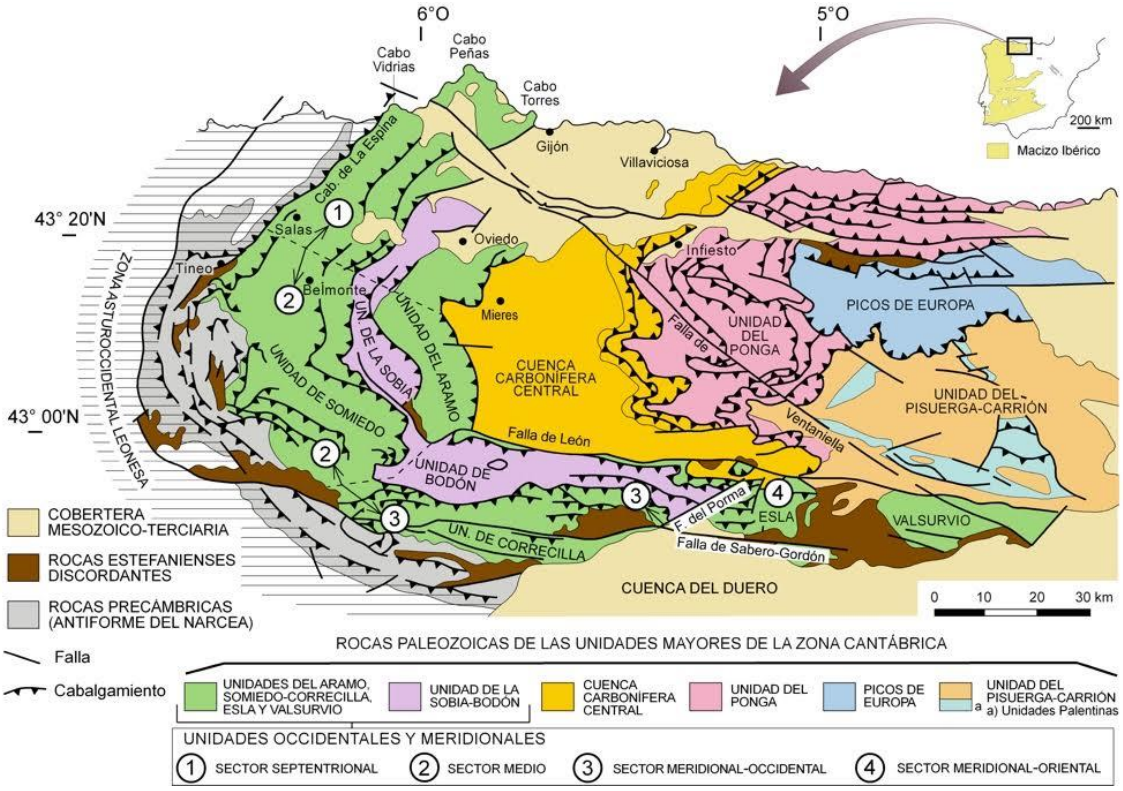


Fig. 3.2 Geología de la zona Cantábrica (ZC) según Julivert, (1971), modificado por Pérez-Estaún et al., (1988)

Los sondeos SEDT localizados en la zona de Boinás, sobre una balsa de lodos y los SEDT de Perlora (Figs. 3.3 y 3.4), se realizaron sobre materiales paleozoicos de las unidades de Somiedo-Correcillas de acuerdo con la subdivisión de la Zona Cantábrica de Julivert, (1971). En el primer caso la balsa está asentada sobre materiales que corresponden a rocas detríticas cámbricas del Fm. Oville que a efectos de este trabajo no presentan gran interés ya que los sondeos fueron realizados para la caracterización de los lodos almacenados. En el segundo caso corresponden a rocas carbonatadas carboníferas de la formación Barcaliente.

En cuanto a los sondeos realizados en la cobertera, los dos sondeos cercanos a la zona de la Falla de Ventaniella en Lieres se sitúan sobre formaciones detríticas permotriásicas y mesozoicas; mientras que el sondeo de la zona de Serín se encuentra sobre materiales detríticos Mesozoicos. En las Fig. 3.3, Fig. 3.4, Fig. 3.5 y Fig. 3.6 se presentan las cartografías geológicas del área de estudio obtenidas del mapa geológico continuo del IGME con la descripción de los materiales (Merino-Tomé et al., n.d.).

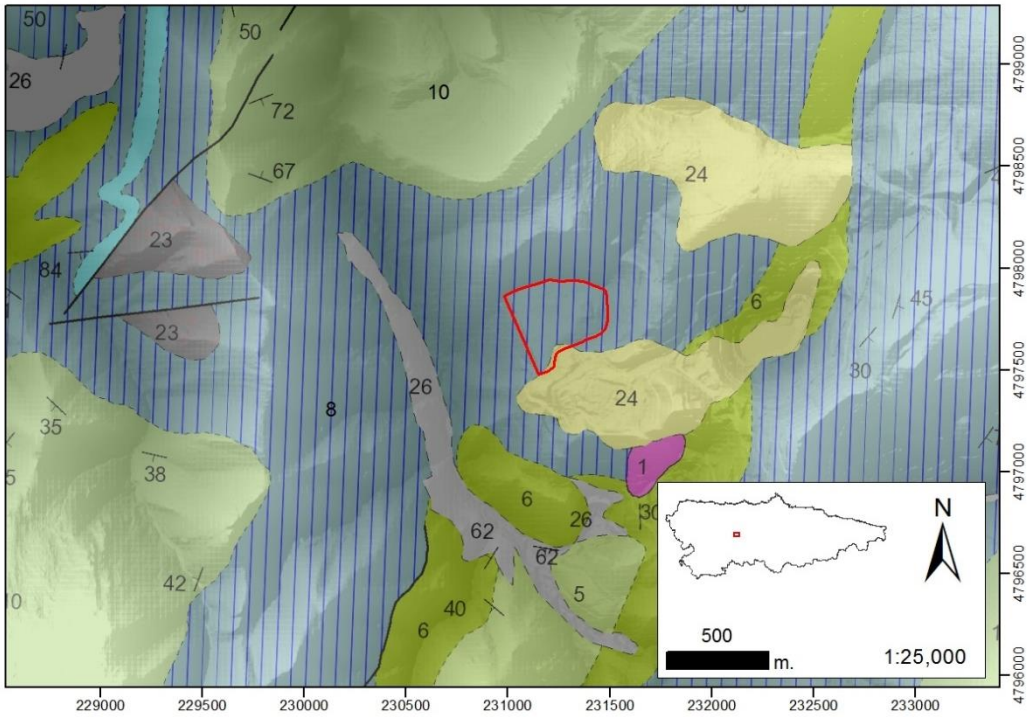


Fig. 3.3 Mapa geológico de la zona de estudio, en el centro, contorno de la balsa de lodos, objeto de estudio. LEYENDA GEOLÓGICA: **1_**Granitos y microgranitos, **5_Fm. Herrería:** Areniscas feldespáticas, **6_ Fm. Láncara:** Calizas y dolomías, **8_Fm. Oville:** areniscas y pizarras, **23_** Conglomerados, **24_**Arenas, cantos y arcillas, **26_**Aluviones

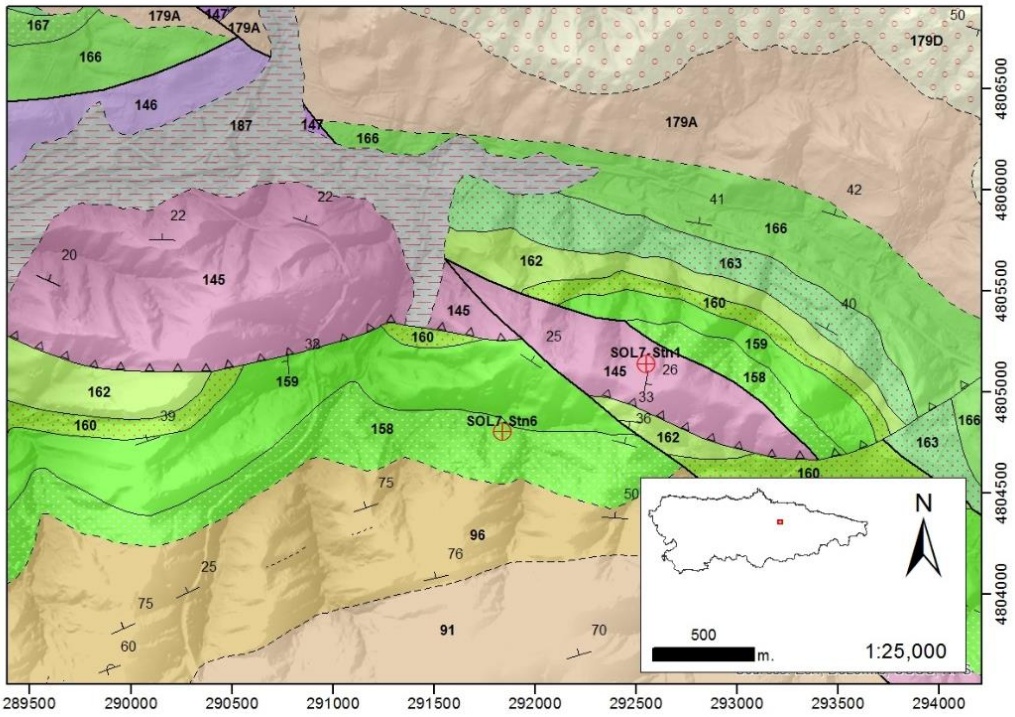


Fig. 3.4 Mapa geológico de la zona de estudio próxima a la localidad del Solanu (Nava) en el que se indica la localización de los SEDT. Datos vectoriales IGME (HOJA 29, Oviedo). LEYENDA GEOLÓGICA: **91_Grupo Lena**: lutitas, areniscas, margas, calizas y escasas capas de carbón (Paquetes Levinco, Llanón, Tendeyón y Caleras); **96_Grupo Sama**: pizarras, limolitas, areniscas, conglomerados y capas de carbón; **145_ Fms. Sotres, Cabranes y Caravia (Permotrias)**: arcillas, areniscas, conglomerados; **158_Fm. Pola de Siero**: conglomerados, areniscas y lutitas; **159_Fm. Ullaga**: calizas bioclásticas grises, argilitas, limolitas y areniscas; **160_Fm. El Caleyu**: areniscas blanquecinas, limolitas y arcillitas; **162_ Fm. La Manjoya**: calizas bioclásticas arenosas, areniscas y lutitas grises. **166_ Fm. San Lázaro**: margas, calizas, argilitas, limolitas, areniscas y calizas glauconíticas nodulosas. El trazado de la falla de Ventaniella pone en contacto las formaciones 159 y 145 en la zona de estudio.

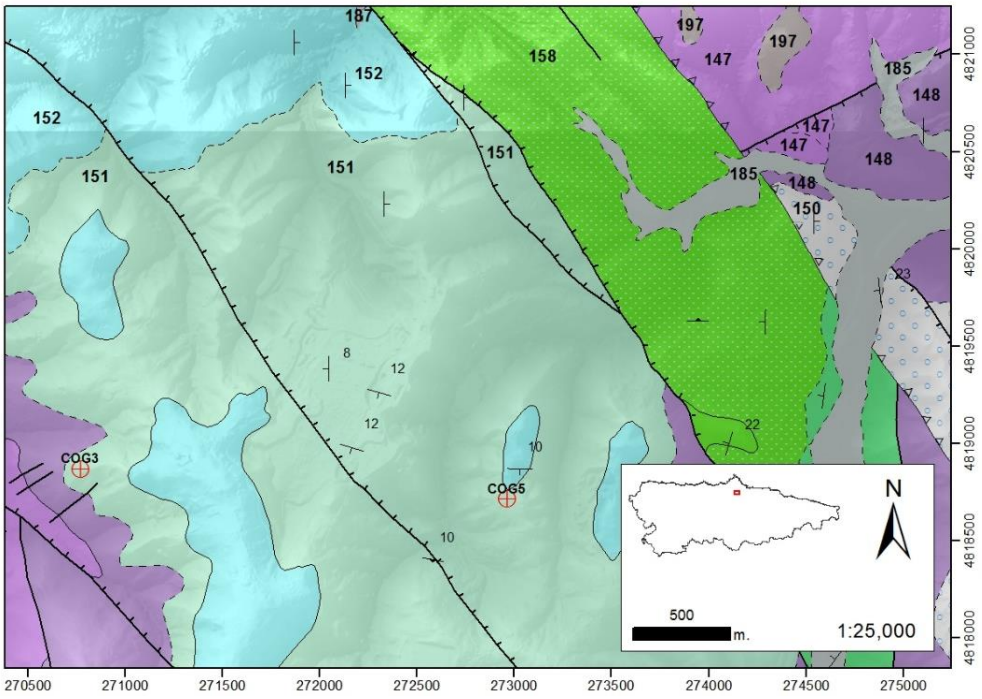


Fig. 3.5 Mapa geológico de la zona de estudio próxima al vertedero de residuos sólidos urbanos de COGERSA en el que se indica la localización de los SEDT. Datos vectoriales IGME (HOJA 29, Oviedo; HOJA 13, Avilés). LEYENDA GEOLÓGICA:147_ Fms. Sotres, Cabranes, Caravia y Fuentes; 148_ **Fm. Gijón:** dolomías, calizas, brechas calcáreas, margas y lutitas **151_ Fm. Vega:** areniscas, limolitas y lutitas; **152_** Margas lumaquélicas grises, calizas y areniscas con evaporitas (Fm.Tereñes). Areniscas, margas y calizas (Fm. Lastres); **158_ Fm. Pola de Siero:** conglomerados, areniscas y lutitas *Mapa en revisión actualmente por IGME*

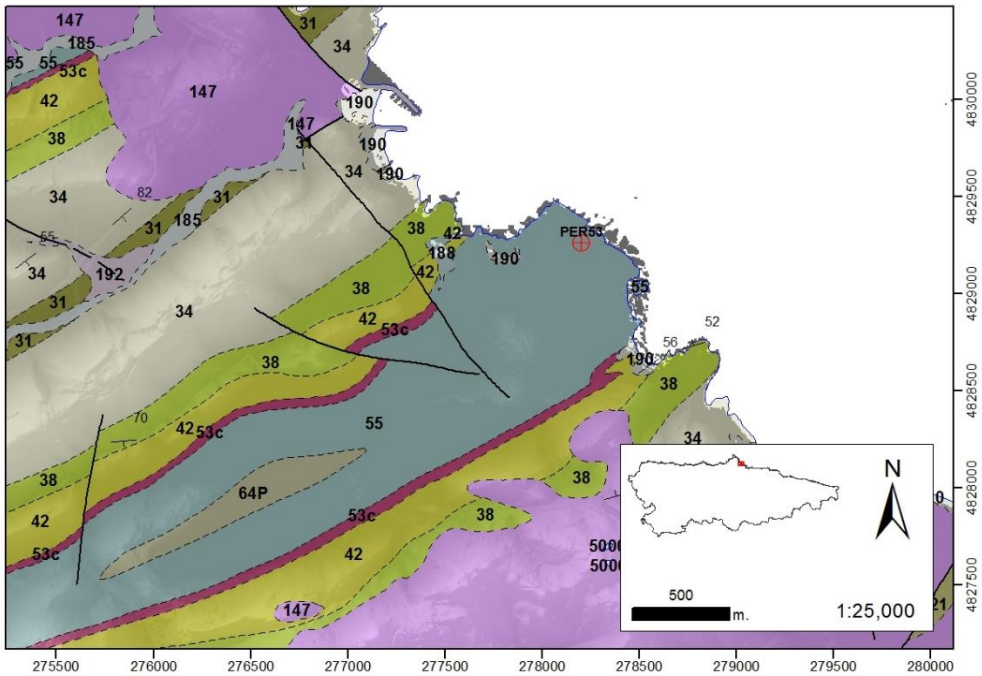


Fig. 3.6 Mapa geológico de la zona de estudio en el entorno de la ciudad de Vacaciones de Perlora. Datos vectoriales IGME (HOJA 14, Gijón). LEYENDA GEOLÓGICA: **31_ Fms. Moniello y Santa Lucía**: calizas bioclásticas y arrecifales y margas; **34_ Fm. Naranco**: areniscas rojo oscuro y pizarras; **38_ Fms. Portilla y Candás**: calizas bioclásticas y arrecifales, dolomías, pizarras y margas; **42_ Fm. Piñeres**: areniscas ferruginosas y areniscas cuarcíticas blancas;53_ Fm. Alba: calizas nodulosas rojas y rosadas, margas y cherts rojos ;**55_ Fm. Barcaliente**: calizas micríticas y microesparíticas negras y finamente laminadas; **64P_ (Fm. San Emiliano; Mb. Pinos):** Lutitas oscuras, areniscas y brechas calcáreas

4
Fundamento teórico de los SEDT

4.1 FUNDAMENTO FÍSICO DEL MÉTODO UTILIZADO

No entra en el desarrollo de este trabajo definir las leyes que gobiernan la teoría electromagnética pero sí aspectos fundamentales para entender el fundamento físico de la técnica utilizada. Un campo eléctrico tiene asociado de forma intrínseca un campo magnético perpendicular, que definiremos como primario. Según la ley de Faraday-Maxwell, un cambio brusco en el primario genera una corriente, denominada fuerza electromotriz (f.e.m) que se induce en los cuerpos conductores próximos. Estas corrientes inducidas son las conocidas como corrientes parásitas, corrientes de Foucalt o "eddy currents" en la literatura inglesa. Estas a su vez llevan asociado un campo magnético (secundario) y se comportan diferentemente en función de la conductividad del medio a través de que se difunden.

En electromagnetismo y electrónica, la inductancia (L) es la medida de la oposición a cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético y se define como la relación entre el flujo magnético (Φ) y la intensidad de corriente eléctrica (I) que circula por la bobina, $L = \Phi/I$

Si se considera que el cuerpo a investigar es un lazo de cobre (Fig. 4.1), con una resistencia (R) y una inductancia (L), al que intersecta un campo magnético primario (Φ_p), la relación entre estas dos variables viene definida por la constante de tiempo $\tau = L/R$, que condiciona la capacidad que tiene un cuerpo para mantener las corrientes inducidas. Como consecuencia del apagado en un tiempo Δt mucho menor que la constante de tiempo (τ) se genera una fuerza electromotriz que viene definida por la ley de Faraday como $\Phi_p/\Delta t$. Según la teoría de un circuito eléctrico la corriente,

$$i(t) = \frac{\Phi p}{L} e^{\frac{-t}{\tau}} \qquad (1)$$

El campo magnético secundario es proporcional a lo largo del tiempo a i(t).

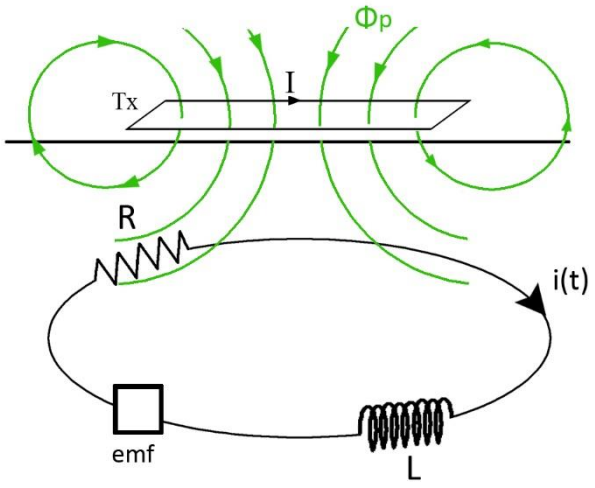


Fig. 4.1 Modificada de Mcneill, (1980).

En el momento del apagado t=0, la amplitud de la corriente inducida y del magnético secundario es independiente de la resistencia del medio (en este caso de la bobina de cobre). Ya que la definición de la inductancia del lazo es el flujo por unidad de corriente, la corriente inicial viene dada por Φ_p/L. El voltaje inducido en el receptor es proporcional a la tasa de cambio del secundario y viene dado por:

$$A(t) = -\frac{1}{\tau} A_0 e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (2)$$

A partir de esta expresión se determina que cuerpos conductores (aquellos que tienen un valor bajo de resistencia y por lo tanto un alto valor de τ produce señales con amplitudes iniciales bajas y un decaimiento suave y viceversa, cuerpos con resistencia alta, generan amplitudes iniciales altas y decaimientos rápidos.

Esta es la consecuencia por la que se debe registrar en varios canales de tiempo el voltaje inducido en el receptor. Más cuando el cuerpo a investigar es muy resistivo y por lo tanto con una baja constante de tiempo τ.

4.2 PROPAGACIÓN DE LAS CORRIENTES PARÁSITAS

La respuesta electromagnética en el dominio del tiempo es un fenómeno complejo. Con el fin de reducir esta complejidad, para los fines que se analizan en este trabajo, el análisis de reduce al de un modelo homogéneo. Se entiende como tal, aquel en el que el único contraste en las propiedades eléctricas es entre el subsuelo y el aire.

El principio fundamental del método SEDT se ilustra como analogía a la propagación de un anillo de humo, "smoke ring" en la literatura anglosajona (Nabighian, 1979), que se propaga desde la superficie hacia el interior del terreno (Fig. 4.2). Previamente al apagado, la corriente tiene asociado un campo magnético estático en el tiempo, el cese de este campo genera una fuerza electromotriz en el terreno que se manifiesta como una serie de corrientes parásitas, que a su vez llevan asociadas un campo magnético secundario, que se propagan hacia abajo y hacia los lados intentando evitar el cese del campo magnético primario.

El registro se realiza en el tiempo de apagado mientras el campo secundario induce una respuesta en la bobina receptora. Se traduce en un decaimiento de la señal que depende de la conductividad del terreno, siendo más rápido en un medio más resistivo incrementando su propagación (Nabighian, 1988).

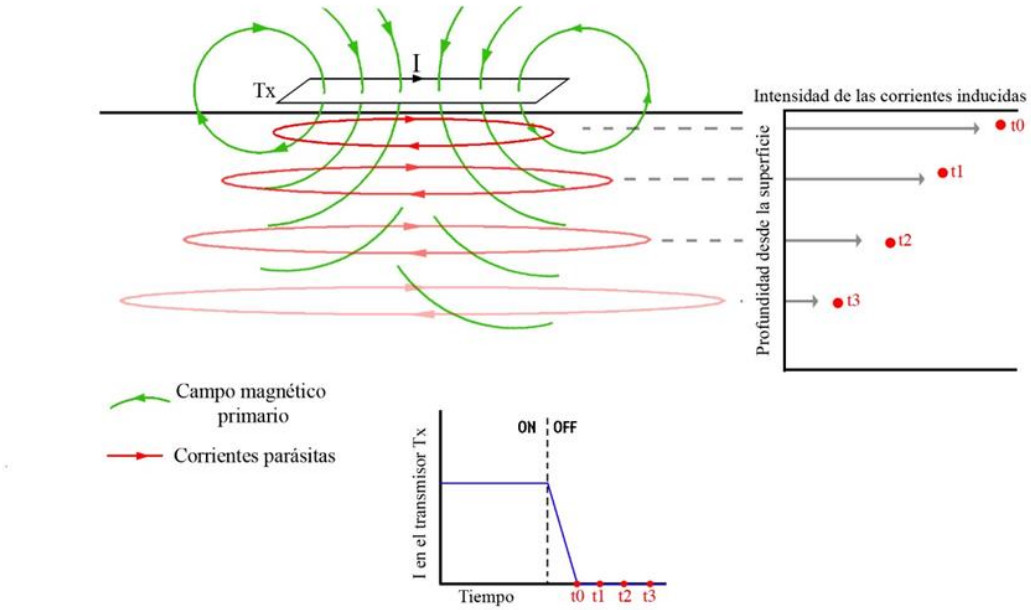


Fig. 4.2 Difusión de las corrientes parásitas en profundidad desde el momento (t0) en que definitivamente se corta la corriente y caída en la intensidad de las corrientes inducidas a lo largo del tiempo.

En cuanto a la profundidad de investigación, depende del momento magnético generado según:

$$M = I * A * n \tag{3}$$

Donde I es la corriente del transmisor en amperios, A es el área del lazo transmisor y n el número de vueltas.

Otro de los factores que afectan a la profundidad de investigación es la conductividad de los materiales objeto de estudio y las limitaciones por el ruido de fondo. La profundidad de penetración viene definida por (Nabighian, 1988):

$$d = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \tag{4}$$

t en segundos; d en metros; σ, conductividad en siemens/metro y la permitividad magnética en el vacío, $\mu = 4\pi * 10^{-7}\ henry/m$. Se obtiene así,

$$d = 1261{,}6\sqrt{\frac{t}{\sigma}} \tag{5}$$

A partir de esta última ecuación, si se tiene en cuenta un medio homogéneo, la profundidad de difusión está en función de $\sqrt{t}$ lo que hace que en medios resistivos la velocidad de difusión sea más rápida y por lo tanto sea necesario muestrear en tiempos tempranos.

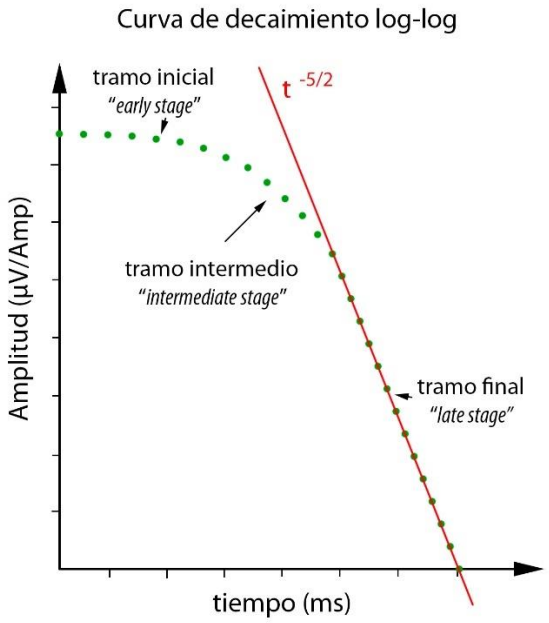


Fig. 4.3 Curva teórica de un SEDT con el ajuste del tramo final. Modificado de Mcneill, (1994)

En el supuesto de un modelo homogéneo y según las nociones de difusión, como se muestra en la Fig. 4.3, el primer tramo de curva, la corriente se mantiene constante debido a la capacidad que tienen las corrientes inducidas de mantener la corriente del transmisor. El tramo intermedio, muestra el comienzo del decaimiento y en el último tramo (*late stage*) la velocidad cambia lentamente y el decaimiento presenta un comportamiento asintótico (Kaufman y Keller 1983) dado por:

$$emf_z = \frac{\mu^{5/2}}{4\pi^{3/2}} \frac{\sigma^{3/2} M_t M_R}{t^{5/2}} \tag{6}$$

donde:
t = tiempo después del apagado
σ = conductividad de un medio homogéneo
μ= permitividad magnética
M_t = momento del transmisor
M_R = momento del receptor

Como se observa, el voltaje inducido en el receptor db/dt (emf_z) presenta un decaimiento proporcional a $t^{-5/2}$. Aunque estas curvas reflejan la tendencia en el cambio de resistividades del subsuelo por sí mismas, es necesario convertir esta información en términos de resistividad aparente en función del tiempo para el tramo *late stage* de la curva, según (Fitterman and Stewart, 1986)

$$\rho_a = \frac{\mu}{4\pi t}\left|\frac{2\pi\mu r^2 M_R I}{5TV}\right|^{2/3} \quad (7)$$

donde:
r = radio del transmisor
I= corriente en el transmisor (A)

Los datos en bruto son inicialmente presentados como curvas de decaimiento que muestran el colapso del campo magnético. Se representa la amplitud del transitorio en unidades de voltaje, normalizadas en función de la corriente inyectada en el transmisor y el área del receptor. En la Fig. 4.4, en trazo azul, viene indicada la curva de decaimiento tipo de un SEDT;, en trazo rojo se indica en términos de resistividad aparente.

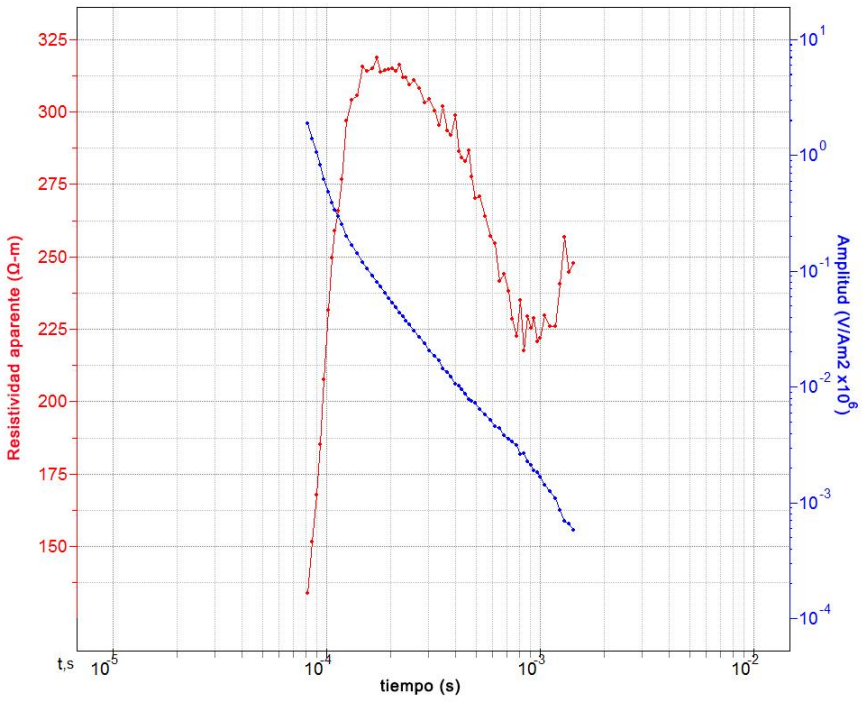


Fig. 4.4 Representación primaria de los datos obtenidos en campo. En trazado azul, amplitud del transitorio en unidades de voltaje normalizado por la corriente y el área del receptor. En trazo rojo la curva de resistividad aparente en ohm-m asociada al transitorio.

Durante la realización de la campaña de campo, este tipo de representaciones proporcionan una herramienta instantánea para la comparación con otros sondeos y sirven como indicación para analizar el ruido. Estos datos se pueden presentar en perfiles voltaje/tiempo a lo largo de una línea que refleja variaciones en la tasa de decaimiento.

Graficando las curvas de decaimiento con un eje Y, amplitud/μV de cada una de las estaciones, se obtiene una representación en 2D de la tendencia de la amplitud en cada curva. Este tipo de representación también indica la localización, profundidad y dimensiones de cualquier anomalía conductiva. Un procesado más avanzado consiste en generar una imagen que representa la distribución de conductividad de forma continua bajo cada sondeo para lo que se han desarrollado numerosos algoritmos para la obtención de este tipo de representaciones. Se describe de forma más extensa en el capítulo 7 de procesado y presentación de los datos.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA SEÑAL DE SALIDA Y LA SEÑAL DE ENTRADA (RECIBIDA)

La técnica SEDT se clasifica dentro de los métodos activos, por lo que es necesaria una fuente de energía que 'estimule' una respuesta en el terreno. Utiliza como fuente emisora una señal periódica y amplitud constante (Fig. 4.5a) que por medio de ciclos de encendido-apagado, en pocos microsegundos, genera, según las leyes de Maxwell, una fuerza electromotriz (f.e.m) en el subsuelo (Fig. 4.5b). Esta f.e.m se traduce en unas corrientes parásitas, con un campo magnético asociado, que se propagan en los materiales conductores e inducen un voltaje en el lazo receptor. Esta respuesta es registrada en canales de tiempo previamente configurados (Fig. 4.5c), de tal manera, que los primeros registros, con una mayor tasa de decaimiento, la frecuencia de muestreo es más alta que para tiempos posteriores.

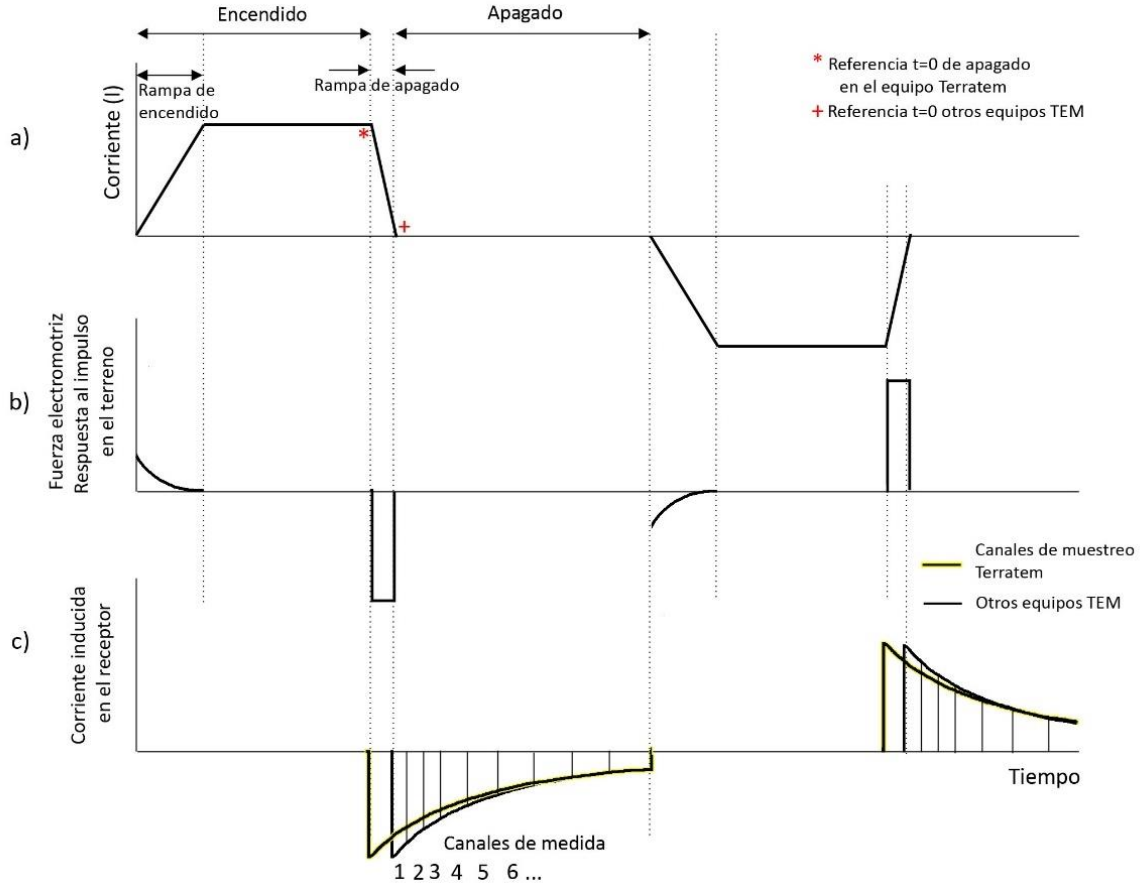


Fig. 4.5 a) Fuente emisora del transmisor sobre la que se indica los tiempos de la rampa de encendido y de apagado y su referencia. b) Respuesta del terreno a la fuerza electromotriz inducida. c) Voltaje inducido en el lazo receptor, registrado por medio de canales de medida. Véase la capacidad del equipo *terraTEM®* de registrar la rampa de apagado. Modificado de Mcneill, (1997).

El voltaje medido en el instante que cesa la corriente está afectado por el retardo de apagado (rampa de apagado) del circuito eléctrico, es decir, la corriente no alcanza instantáneamente el valor 0. El motivo de este comportamiento es el papel que juega la autoinducción que genera el propio cable transmisor que

impide cualquier cambio en la corriente que circula por él, fenómeno que se debe a la energía almacenada en los campos magnéticos asociados al movimiento de cargas.

El tiempo de apagado o rampa de apagado influye en la capacidad de una configuración determinada en caracterizar la zona más somera del terreno, de manera que, un tiempo de apagado elevado impide recibir la respuesta en tiempos tempranos y genera un efecto de decaimiento brusco como consecuencia de ese retardo. Este efecto puede reducirse disminuyendo el momento del transmisor con una corriente menor.

En Fig. 4.5c se indica la referencia del apagado para el equipo *terraTEM*®, utilizado en este trabajo, que a diferencia de otros equipos SEDT es capaz de registrar señal durante la rampa de apagado.

4.4 CONFIGURACIONES DEL TRANSMISOR/RECEPTOR

El método SEDT puede emplear múltiples configuraciones del bucle emisor (Tx) y receptor (Rx):

- Bucle Coincidente *(Coincident loop):* Dispositivo compuesto por dos lazos (uno emisor, Tx, y otro receptor, Rx, que se tienden conjuntamente sobre el terreno. Esta configuración se recomienda para la realización de la mayor parte de los estudios ya que combina una elevada productividad, baja afección por ruido ambiental y buena sensibilidad para el estudio de objetos profundos.

- Bucle Simple *(Single Loop):* Configuración en la que un único lazo actúa como emisor y receptor. Configuración más simple desde el punto de vista logístico y productivo ya que solo ha de emplazarse un bucle si bien, se ve afectado en mayor medida por el ruido.

- Loop doble *(Slingram):* Configuración en la que se disponen dos lazos (Tx y Rx) de iguales dimensiones contiguos, separados dos metros.

- Loop central *(In Loop):* Variante de la configuración de bucle coincidente en el cual el lazo receptor (Rx) es de menor tamaño y se emplaza en el centro del emisor (Tx). Esta configuración se recomienda cuando es necesaria la implantación de un transmisor de gran tamaño.

- RVR *(Roving Vector Receiver):* Es una variación de la configuración *In loop*. En este caso se utiliza como receptor un núcleo compacto que permite hacer mediciones del campo magnético en las tres direcciones del espacio. Por su alta sensibilidad, es utilizado para grandes lazos transmisores.

- En sondeo *(Down Hole):* Dispositivo diseñado para investigar las inmediaciones de sondeos. La configuración se basa en la disposición de un transmisor (Tx), rodeando el sondeo, haciendo descender un receptor (Rx) por el mismo. El dispositivo presenta una elevada sensibilidad permitiendo determinar pequeñas variaciones de conductividad con la profundidad.

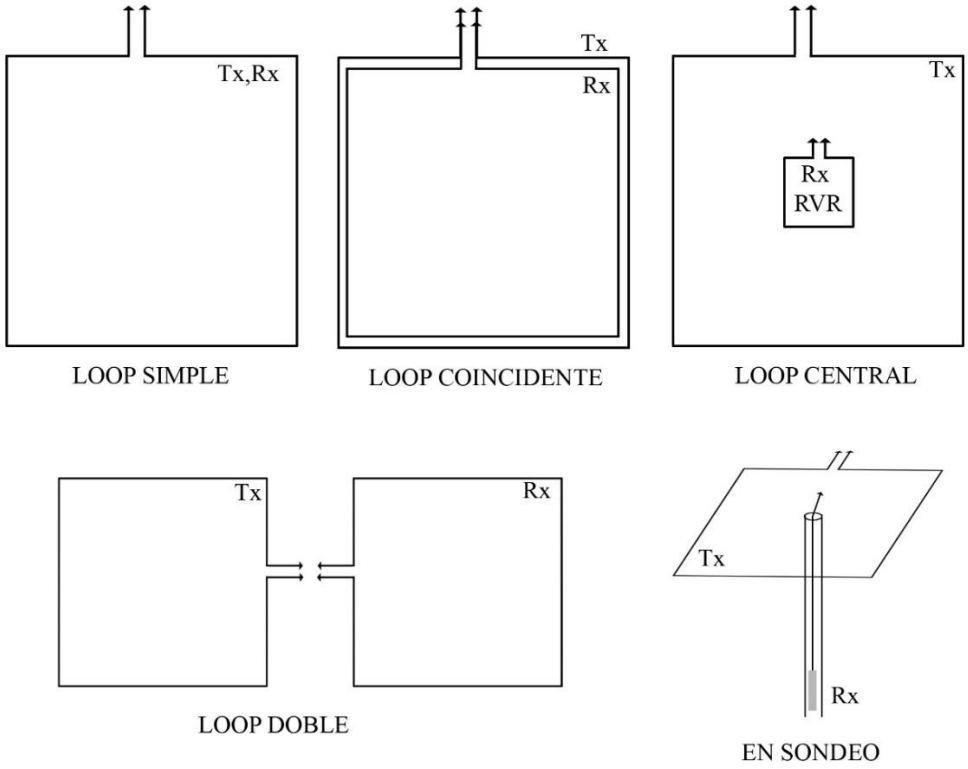


Fig. 4.6 Diferentes configuraciones posibles de los SEDT.

4.5 FUENTES DE RUIDO

Toda medida obtenida por medio de un instrumento geofísico consiste a la suma de un par de valores: la propia respuesta del terreno y la incertidumbre en el área de estudio procedente de fuentes externas. A efectos del procesado y tratamiento de los datos, toda respuesta que no corresponde a la geología del terreno es considerada como ruido que se superpone a la medida real.

La exactitud de cualquier método electromagnético está influenciada por la ratio señal/ruido en el receptor. Por debajo del nivel de ruido la señal queda ininterrumpida y no es posible diferenciar entre la respuesta del terreno y el ruido.

Según (Mcneill, 1994) las fuentes de ruido pueden dividirse en:

- Ruido generado por el propio equipo
- Ruido inducido o radiado
- Presencia de elementos metálicos cercanos
- Efectos generados por la alta polaridad de elementos del suelo

Otros autores clasifican estas señales de ruido según la fuente que las genere como geológicas, hace referencia a las generadas por el terreno o antrópicas, aquellas producida como consecuencia de la actividad antrópica.

5
Propiedades eléctricas de las rocas

La propiedad física más importante que afecta a las medidas de los métodos electromagnéticos es la conductividad eléctrica o su recíproco, la resistividad. Propiedad que mide la capacidad que tiene un material para permitir la circulación eléctrica a través de él. El método SEDT es capaz de medir variaciones espaciales de conductividad en los materiales del subsuelo.

5.1 CONDUCTIVIDAD/RESISTIVIDAD

Básicamente, la resistividad/conductividad eléctrica de una sustancia mide la facilidad/dificultad con la que una corriente eléctrica fluye a través de ella. La mayoría de elementos que conforman el suelo y las rocas son aislantes con valores de resistividad muy altos. Sin embargo, en ocasiones, la presencia de minerales como la magnetita, hematites, pirita y pirrotina en grandes cantidades genera un aumento en la conductividad. Establecer unos valores específicos para cada material es una tarea compleja, por ejemplo, en rocas porosas, las propiedades eléctricas están controladas por los fluidos que ocupan el volumen de poros los cuales no quedan retenidos en una muestra para su análisis.

La conductividad eléctrica de materiales rocosos es la propiedad eléctrica que más varía, más que ninguna otra propiedad física utilizada en otros métodos geofísicos. En la naturaleza, las rocas se comportan como materiales conductores con rangos de resistividad de 10 **Ω**m para materiales arcillosos a 10000 **Ω**m para rocas cristalinas y conglomerados silíceos (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Valores de resistividad de distintos materiales (Loke, 2004)

Material	Resistividad	Material	Resistividad
Granito	6.10^3 - 10^6 Ω.m	Arcilla	1 - 100 Ω.m
Esquisto	30 - 10^4 Ω.m	Marga	4 - 90 Ω.m
Mármol	100 - 4.10^8 Ω.m	Depósitos aluviales	10 - 900 Ω.m
Cuarcita	100 - 3.10^8 Ω.m	Agua dulce	10 - 100 Ω.m
Pizarra	800 - 5.10^7 Ω.m	Agua marina	0,3 Ω.m
Caliza	70 - 7.10^3 Ω.m	Esquisto grafítico	10^{-4} - 7.10^{-3} Ω.m
Arenisca	10 - 6.10^3 Ω.m	Carbón antracítico	10^{-3} - 2.10^5 Ω.m

A partir de los datos que se muestran en la Tabla 5.1 se pueden decir respecto a los materiales del subsuelo las siguientes generalidades:

- La mayoría de los materiales rocosos se comportan como semiconductores. Algunas excepciones son los elementos metálicos nativos que son altamente conductores pero que no responden como tal en la respuesta geofísica ya que esta alta conductividad se ve enmascarada por la roca y matriz en la que están incluidos.

- Los minerales silicatados y carbonatados en general se comportan como minerales aislantes.

- El agua pura tiene baja conductividad, sin embargo, en el medio natural el agua lleva en disolución sales disueltas y según su concentración, el valor de la conductividad aumenta o disminuye. De esta manera el nivel freático está asociado con un contraste en la conductividad, con una resistividad mayor en la zona no saturada y mayor conductividad en la zona saturada, así como zonas altamente meteorizadas como son las zonas asociadas a fracturas de falla y zonas de tensión.

No es posible establecer una correspondencia unívoca entre material y conductividad, pues ésta depende varios factores que pueden cambiar para el mismo material. En los materiales rocosos, la conductividad se entiende desde dos puntos de vista: conducción electrónica a través de la matriz y conducción a través de los fluidos para lo que es necesario la interconexión de los poros. A efectos de este trabajo, el uso de los SEDT para el estudio de zonas someras, interesa analizar la conductividad iónica o electrolítica.

5.2 CONDUCCIÓN ELÉCTRICA ENTRE POROS

La conductividad de las rocas en la zona somera de la corteza terrestre está principalmente controlada por la conducción a través de los fluidos que ocupan los poros de la roca, es decir, depende del electrolito de la fase acuosa. Esta conducción depende del tipo, concentración y temperatura del electrolito, movilidad de los iones, el volumen de fluido (porosidad y grado de saturación) y su distribución (interconectividad y tortuosidad). La porosidad no se limita solamente a los huecos entre granos., las fracturas actúan como canales y forman excelentes rutas de flujo para la circulación de corrientes eléctricas en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias demostrando que la conductividad eléctrica no está solamente limitada a rocas sedimentarias porosas.

De forma empírica la resistividad de un medio poroso saturado en ausencia de arcillas con una solución salina según Archie, (1941) es proporcional a la resistividad del fluido y define esta relación como factor de formación (*F*).

$$F = \frac{\rho \text{ r.sat.}}{\rho \text{ fluido}} = \frac{a}{\Phi^m}$$

Donde ρ r.sat. es la resistividad de la roca saturada y ρ fluido la resistividad del fluido.

El factor de formación es una medida adimensional que mide la relación entre la resistividad del fluido y la resistividad de la roca, varía entre 5 y 500: 10 para rocas porosas y 400-500 en calizas poco permeables. Un mayor número de canales para la circulación de fluidos supone un factor de formación *F* próximo a 1. El factor de formación es directamente proporcional de la estructura porosa que viene definido por (φ). Medidas empíricas han demostrado que el factor de formación F y la porosidad φ se relacionan mediante dos parámetros: la constante *a* y el factor de cementación (*m*) (Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Parámetros de Archie para varias litologías (Keller, 1988)

Litología	a	m
Rocas ligeramente cementadas: arenas, areniscas y algunas calizas con porosidad del 0,25-0,45. Rocas terciarias	0.88	1.37
Rocas moderadamente cementadas que incluyen areniscas y calizas con una porosidad de 0,18-0,35. Rocas del mesozoico	0.62	1.72
Rocas bien cementadas. Porosidad de 0,05-0,25. Rocas de edad Paleozoica.	0.62	1.95
Rocas con porosidad elevada. Rocas volcánicas principalmente. Porosidad de 0,20-0,80	3.5	1.44
Rocas con porosidad menor del 0,04, que incluyen rocas metamórficas e ígneas	1.4	1.58

La conductividad es la propiedad física que más varía dependiendo de las condiciones. Las medidas en laboratorio se realizan de modo estandarizado en régimen saturado. Son varios los autores (Kalinski and Kelly, 1993) que relacionan linealmente el contenido de agua con el valor de resistividad de la formación, por lo tanto el grado de saturación de la muestra condiciona directamente el valor de resistividad. . Kuranchie et al., (2015) a partir de sus experimentos con lodos de una mina de hierro, obtienen valores desde 11 kΩ-m en estado seco hasta 20 Ωm en régimen saturado.

Las diferentes especies iónicas que contiene una solución (H^+, OH^-, SO_4^{2-}, Na^+, Cl^-) afectan también al valor de conductividad en distinto grado debido a la diferente movilidad de los iones. Esto explica por qué soluciones con la misma concentración en sales pero formadas por diferentes especies iónicas tienen diferente valor de conductividad (Samouëlian et al., 2005)(Fig. 5.1).

En el capítulo 8 se presenta el estudio de una balsa de lodos clausurada en la que son varias las especies metálicas en disolución y hace que los valores de conductividad de las aguas drenadas tengan valores de miles de μs/cm. A partir de estas aguas podemos estimar unos valores fiables de resistividad de los estratos geoeléctricos obtenidos con la técnica SEDT.

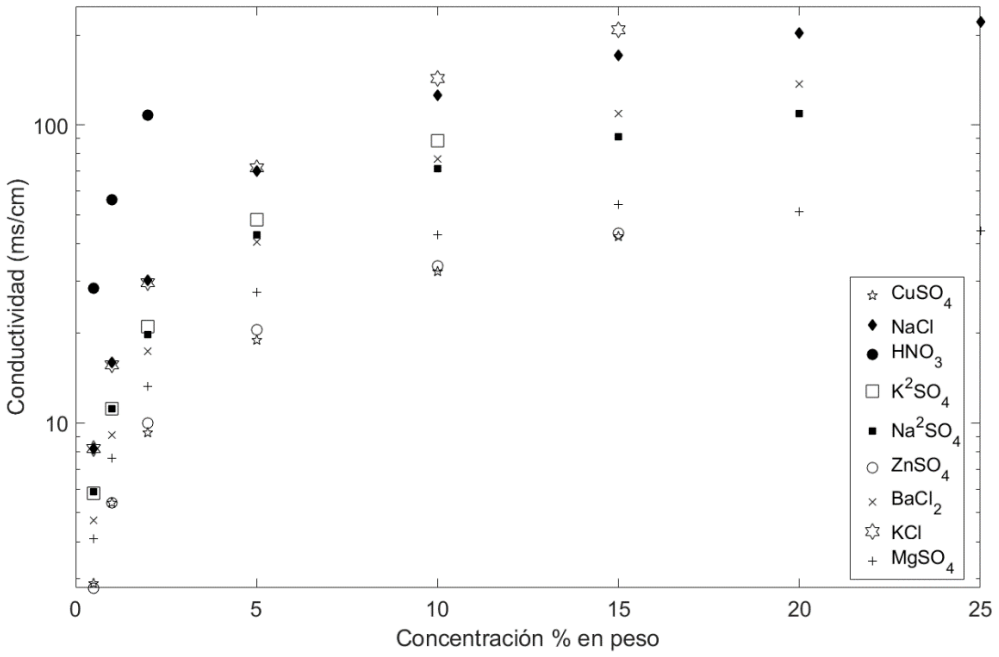


Fig. 5.1 Conductividad eléctrica en función de la concentración de soluciones acuosas con distintos electrolitos (Samouëlian et al., 2005)

Las sustancias disueltas son causa de la conduccion electrolítica en el interior de la balsa y reflejan indirectamente la cantidad de agua presente en el medio poroso. Un mayor grado de saturación implica valores de resistividad menores (Kalinski and Kelly, 1993) (Kuranchie et al. 2015)

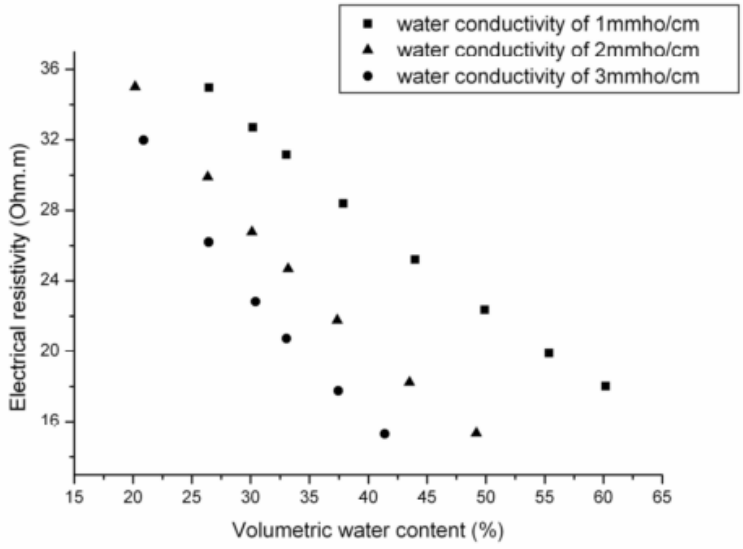


Fig. 5.2 Relación entre el contenido de agua y la resistividad para diferentes valores de conductividad del agua que ocupa los poros. (Samouëlian et al., 2005) Datos de (Kalinski and Kelly, 1993)

6
La campaña geofísica

El trabajo incluye una serie de sondeos (SEDT) que se han realizado en el marco de varios proyectos con sucesivas campañas geofísicas de las que resulta importante destacar algunos aspectos significativos en cuanto al desarrollo y metodología llevada a cabo en ellas. En este capítulo se describe el equipo utilizado, la planificación de la campaña y su ejecución. En estos apartados se indican las contribuciones realizadas para llevar a cabo la campaña de forma eficiente.

6.1 EQUIPO UTILIZADO

El Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo cuenta desde el año 2009 con el equipo SEDT, *TerraTEM*®, que ha sido utilizado para la realización de los sondeos analizados en este trabajo. Se trata de un equipo de la casa *Monex Geoscope* de diseño y fabricación australiana. La unidad principal se compone de una consola de mando compacta con pantalla táctil y varias opciones para la adquisición de sondeos en distintas áreas de investigación. El equipo permite investigar desde zonas someras a menos de 10 m a zonas profundas para, por ejemplo, la investigación de yacimientos minerales. Es uno de los dispositivos SEDT más avanzados actualmente en el mercado con una interfaz gráfica intuitiva y de los sistemas más amigables.

El equipo básico se compone de una consola de mando, un paquete de baterías capaz de suministrar un voltaje de ±24V y los conectores para el transmisor y receptor. Lleva incorporado algunos accesorios que permiten ampliar la señal de medida y reducir el tiempo de ejecución de sondeos con antenas receptoras compactas.

Fig. 6.1 Equipo *TerraTEM®* con el paquete de baterías a la derecha de la consola de mando y módulo GPS externo de sincronización transmisor/receptor

Como lazo transmisor y receptor se dispone de cable de 1,5mm² de sección con una resistencia por metro lineal de 0,01 ohm (Fig. 6.2). El tamaño de lazo utilizado para el desarrollo de los sondeos que se analizan en este trabajo ha sido de 25x25 y 40x40 metros de lado.

En la Fig. 6.3 se muestra la pantalla principal del equipo con las opciones de configuración para la adquisición de los sondeos. Algunas de estas opciones incluyen el número de repeticiones de cada ciclo de apagado-encendido, tamaño de los lazos y área efectiva de los lazos transmisor-receptor y ganancia incorporada. Estos parámetros añadidos en la consola de mando no influyen en la toma de datos, pero sí son incorporados a la base de datos y son tenidos en cuenta en el procesado posterior.

Fig. 6.2 Bobinas de cable utilizadas en el equipo SEDT

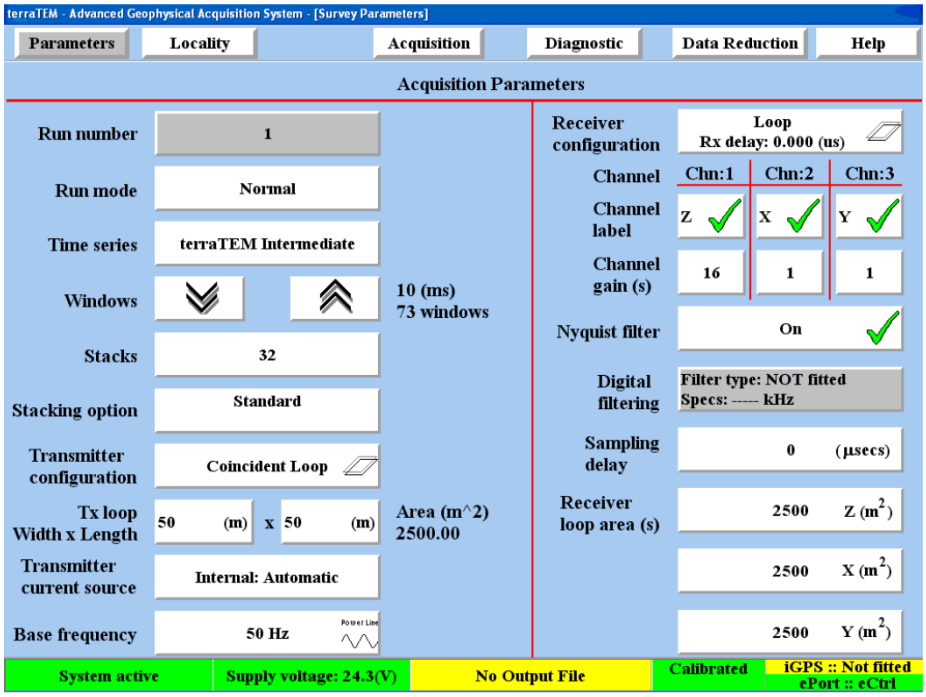


Fig. 6.3 Ventana principal del equipo *TerraTEM®* con las pestañas de configuración

6.2 DISEÑO DE LA CAMPAÑA

Una parte del trabajo realizado que se consideró importante incluir en esta memoria, fue todo lo referente al desarrollo de las campañas geofísicas de las que se obtuvieron los sondeos con los que se trabaja en este trabajo. Las contribuciones realizadas con la técnica geofísica SEDT han sido: la puesta en marcha del equipo *terraTEM*®, la planificación y ejecución de los sondeos en una campaña geofísica real y la obtención de los datos para su procesamiento.

En los siguientes apartados se describen los distintos procedimientos que se han considerado imprescindibles a tener en cuenta para el desarrollo de la campaña geofísica.

6.2.1 Recogida de información preliminar

El primer paso para llevar a cabo la campaña es la recolección de datos de la zona de estudio por medios digitales, ortofotos e imágenes de satélite, con el objeto de buscar localizaciones idóneas de muestreo, rutas de acceso, identificación de zonas con alta densidad de vegetación, orografía abrupta y posibles fuentes de ruido.

6.2.2 Ensayo

Previamente a la ejecución de los sondeos definitivos fue necesario visitar las zonas de estudio con el objetivo de verificar y reconocer otras posibles alteraciones que pudiesen afectar a la ejecución de los sondeos. Los factores que se tuvieron en cuenta en la viabilidad de la realización de los sondeos son:

- Espacio disponible para la colocación del lazo transmisor y receptor
- Torres de alta tensión próximos a la zona de estudio
- Elementos metálicos (vallas de ganado, tuberías)
- Topografía
- Cultivos inaccesibles

Una vez valoradas todas las posibles afecciones, se determina el tamaño de lazo y la localización exacta. En todas las campañas geofísicas se hizo esta prospección de prueba para determinar el nivel de ruido que pudiese afectar a los sondeos.

6.2.3 Configuración del dispositivo

El equipo *TerraTem*® permite investigar a distintas profundidades. Para ello es posible utilizar configuraciones de 1x1 m hasta cientos de metros. Según las dimensiones del terreno, la resolución superficial y la cobertura espacial a estudiar, la configuración óptima escogida para la realización de los sondeos descritos en este trabajo fue de lazo coincidente con dimensiones de 25x25 m y 40x40 m. Consiste en dos lazos del mismo tamaño dispuestos con una separación de un metro para evitar efectos de supermagnetismo (Buselli, 1982). Este tipo de configuración es la recomendada para tamaños de lazo menores de 50 m en cuestión de productividad y bajo nivel de ruido en comparación con otras configuraciones.

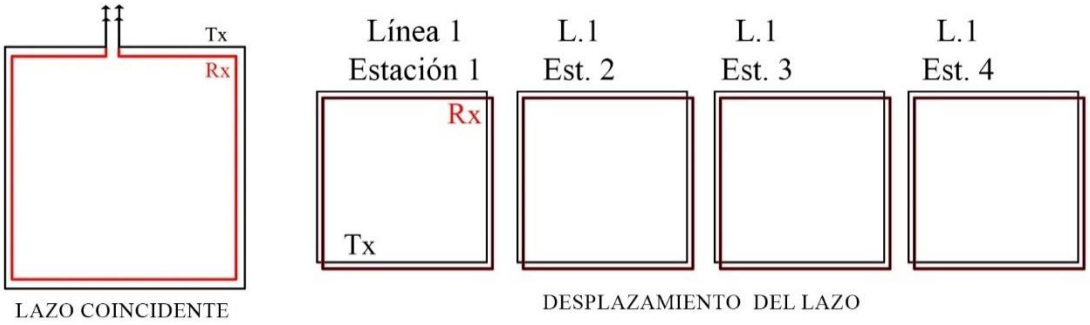


Fig. 6.4 A la zquierda, configuración de lazo coincidente en el que se colocan dos lazos desplazados 1 m uno respecto al otro. Esta configuración se utiliza en cada estación a lo largo de un perfil o malla en función de los objetivos a estudiar (derecha)

Este tipo de configuración se repite en cada una de las estaciones escogidas para los fines definidos en el estudio. Para ello, es posible realizar sondeos individuales o un conjunto de sondeos a lo largo de un perfil o una malla (Fig. 6.4). El tiempo de ejecución de una medida no supone más de 2 minutos, que se suma al tiempo que lleva disponer el lazo, recogerlo y desplazarse a la siguiente localización

6.2.4 Diseño del procedimiento en campo

Tras numerosos ensayos realizados, se llega a la conclusión que el método requiere de un estudio previo del procedimiento de campo ya que es clave para la optimización del tiempo y por tanto del éxito de la campaña. Este diseño supuso una reducción del tiempo de una hora a sólo 20 minutos en la ejecución de un SEDT.

A continuación, se describen los pasos del método desarrollado, teniendo en cuenta un equipo de tres personas (A, B y C) (Fig. 6.5):

1. Se divide el lazo transmisor y receptor en segmentos según las dimensiones a utilizar. A su vez, se marcan los vértices de los lazos en cada una de las esquinas para facilitar la disposición lo más cuadrada posible.
2. El miembro A fija el inicio del lazo transmisor. B camina de forma que se vaya disponiendo el cable sobre el terreno. Cuando se alcance el punto marcado como vértice del lazo se fija con la ayuda de C.
3. B comienza a extender el segundo segmento sujeto por C.
4. El miembro A que estaba sujetando el inicio del cable se desplaza a sujetar el extremo del segundo segmento de cable. De esta forma ya están dispuestas dos vértices del bucle.
5. B continua con la extensión del tercer segmento de lazo y C se desplaza a sujetar el tercer vértice del lazo. A se mantiene en el tercer vértice.
6. B extiende el último segmento del lazo hasta llegar al inicio bucle, completamente extendido sobre la superficie.
7. A, B y C estiran los vértices hasta que queden tirantes y formando diagonales con ángulo de 45º, para formar un cuadrado lo más recto posible.
8. Cuando los tres vértices estén colocados, el miembro C se desplaza al vértice que queda pendiente de extensión y con las referencias de A y B se acaba de colocar el lazo. De esta forma ya se tiene listo el lazo transmisor colocado sobre el terreno.
9. De igual forma se procede con el lazo receptor separándolo 1 m del cable transmisor.

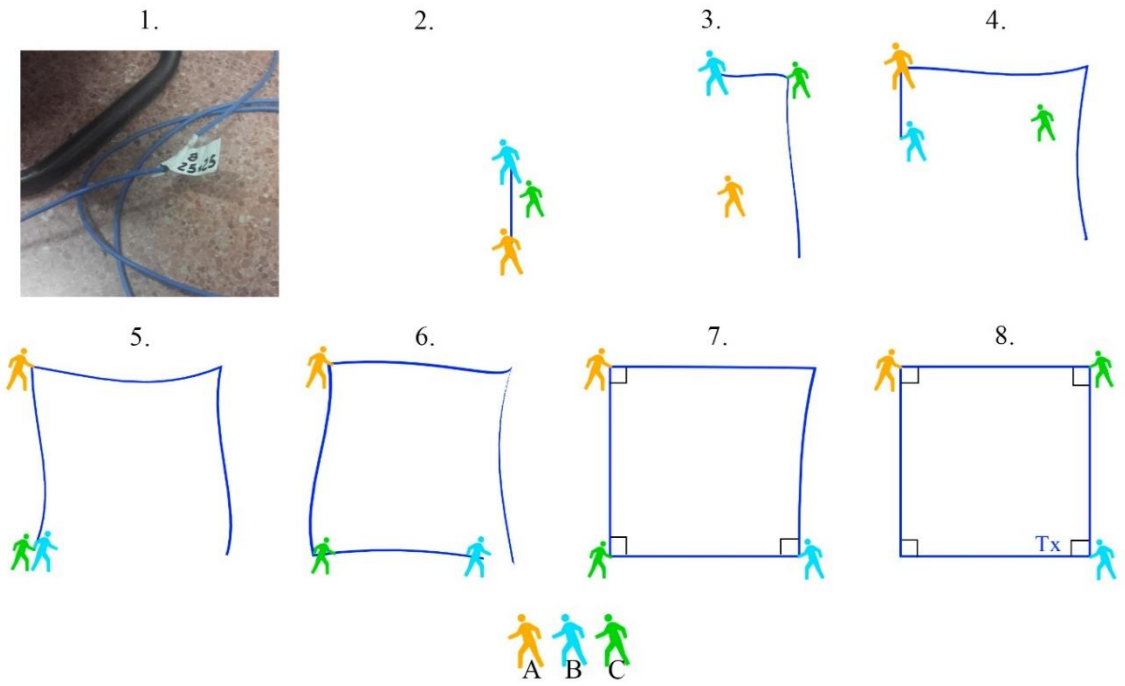


Fig. 6.5 Diseño del procedimiento de campo con un equipo de tres personas para la disposición de los lazos.

6.3 ADQUISICIÓN DE LOS DATOS

En este apartado se describen los parámetros de configuración que es necesario incluir en el equipo de campo previamente al registro de un sondeo y el modo de guardar los datos en el equipo para finalmente extraerlos por medio del puerto USB. Algunos de estos parámetros condicionan la capacidad del equipo de obtener una señal lo más limpia posible sin afecciones de ruido y la capacidad del método para obtener información a profundidades más someras o a más profundidad.

A pesar de que muchos de estos parámetros no influyen en la obtención de los datos. Es importante añadirlos para el procesamiento posterior ya que se almacenan en la base de datos junto con todos los datos del sondeo.

6.3.1 Parámetros de configuración

En este apartado se indican los parámetros más relevantes a la hora de adquirir el sondeo, accesibles en la ventana principal del equipo (Fig. 6.3) Los parámetros de cada sondeo se almacenan en una base de datos tal como se indica en el anexo I para los sondeos descritos en este trabajo.

- *Time series*: este icono define el número y ancho de las canales con las que se quiere muestrear la respuesta del terreno. Son tres las posibles opciones: *Hi-resolution*, *Intermediate* y *Long* (Fig. 6.6). Para los SEDT presentados en este trabajo se utilizó la opción *Hi-Resolution* que cuenta con un total de 147 canales y muestrea hasta un tiempo de 20 ms. En el caso de investigar en zonas someras, en las que es necesario registrar datos en los primeros tiempos después del apagado, es preferible utilizar esta opción con mayor resolución en los primeros canales de tiempo.
- *Windows*: se refiere al número de canales de muestreo dentro de cada opción de *Time Series*, se puede aumentar o reducir el número y por tanto el tiempo de medición. En los casos que se presentan se utilizó el mayor número de canales para la opción *Hi-Resolution.*
- *Stacking*: es una opción importante a la hora de la adquisición de los sondeos SEDT. El *stacking* o repetición indica el número de ciclos *on/off*, es decir, repeticiones del muestreo en cada sondeo. En función del ruido aleatorio presente en cada localización de muestreo, es necesario aumentar el número de *stacks*.

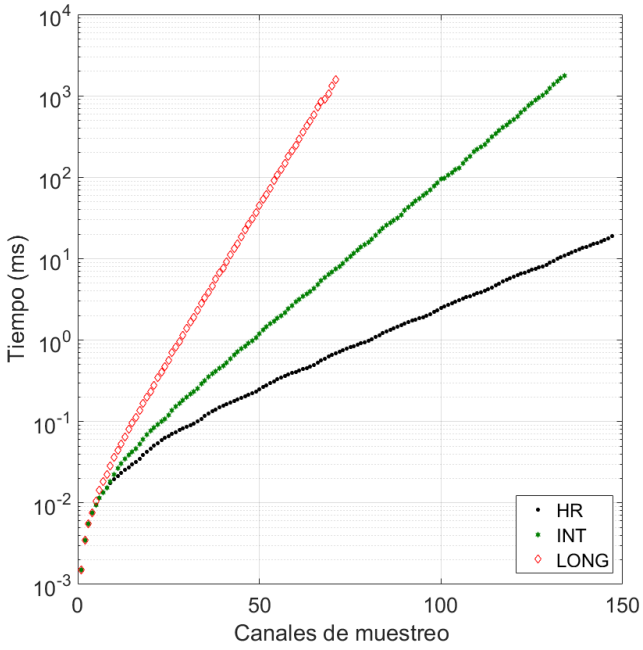


Fig. 6.6 Canales y tiempo de muestreo. La opción *Hi-resolution* presenta un mayor número de canales de muestreo en un tiempo máximo de 20ms. En el caso de investigar elementos con alta conductividad es necesario utilizar otro tipo de opciones que permiten investigar durante más tiempo.

En el momento que todos los parámetros de adquisición están indicados, ya es posible realizar el sondeo que se almacena en la propia memoria del equipo indicando el nombre del archivo y en caso de realizar una malla, el número de línea y estación. Los datos se extraen por medio de una memoria USB conectado directamente al equipo.

El formato nativo, *.BIN*, del equipo *terraTEM®* puede ser ejecutado desde el programa *TEMPlot* que permite visualizar los datos en bruto, los perfiles de voltaje-tiempo y los parámetros de ajuste de la campaña. Este software permite exportar los datos a otro tipo de archivos que permiten visualizar los datos en bruto y procesarlos a través de otros programas de cálculo y análisis de datos. El archivo "*.USF"* (*Universal Sounding Format*) es el tipo de archivo estandarizado a escala internacional que permite trabajar los datos en programas de modelización e inversión. En la Fig. 6.7 se muestra el formato de archivo con los distintos parámetros de configuración, la respuesta medida y los tiempos de muestreo.

El software *TEMPlot* lleva incorporada un tipo de transformación que permite visualizar los datos en forma de pseudosecciones con valores de conductividad frente a profundidad. En el apartado de representación de los datos se profundiza más en este tipo de trasformación.

```
//USF: Universal Sounding Format
//SOUNDINGS: 2
//END
/ARRAY: COINCIDENT LOOP TEM
/DATE: 20160518
/DAYTIME: 12.23
/INSTRUMENT: "terraTEM"
/LOCATION: 1.00, 1.00, 0.0
/VOLTAGE_UNITS: V/AMP
/POINTS: 73
/SOUNDING_NUMBER: 1
/SOUNDING_NAME: 1.0000
/SWEEPS: 1
/SWEEP_NUMBER: 1
/CURRENT: 3.44
/LOOP_SIZE: 25.00, 25.00
/RAMP_TIME: 1.8000E-05
/FREQUENCY: 25.000
/TIME_DELAY: 0.0
/END
INDEX,      TIME,          WIDTH,          VOLTAGE,        ERROR_BAR
1,      1.6500E-05,    2.0000E-06,    7.2641550E-01,  0.0000000E+00
2,      1.8500E-05,    2.0000E-06,    7.2582769E-01,  0.0000000E+00
3,      2.0500E-05,    2.0000E-06,    4.9678725E-01,  0.0000000E+00
4,      2.2500E-05,    2.0000E-06,    3.8503534E-01,  0.0000000E+00
5,      2.4500E-05,    2.0000E-06,    1.5251673E-01,  0.0000000E+00
.....
67,     5.3755E-03,    5.1200E-04,    1.6900000E-07,  4.6651068E-07
68,     5.8875E-03,    5.1200E-04,    1.0472870E-07,  4.4190457E-07
69,     6.3995E-03,    5.1200E-04,    9.1774069E-08,  4.7054324E-07
70,     6.9115E-03,    5.1200E-04,    3.7998155E-08,  4.5577326E-07
71,     7.4235E-03,    5.1200E-04,    -2.7191041E-09, 4.8500919E-07
72,     7.9355E-03,    5.1200E-04,    -1.6782226E-08, 5.2617610E-07
73,     8.7035E-03,    1.0240E-03,    3.6664598E-08,  5.0895298E-07
/END
```

Fig. 6.7 Archivo "*.USF"* de uno de los sondeos que se presentan en este trabajo. En la parte superior del archivo se indican los parámetros de cada SEDT individual precedidos de /. A continuación, en cinco columnas se presentan los datos medidos en cada ventana de muestreo: el tiempo de muestreo, el ancho de la ventana, el voltaje medido en V/Amp y la desviación estándar.

6.3.2 Organización de los archivos de datos

Por el volumen de datos adquiridos y el tipo de archivos almacenados fue necesario optimizar la forma de almacenar y organizar todos los datos de forma que sea fácil trabajar con ellos; así pues, se el uso de herramientas de información geográfica tipo GIS facilitó este tipo de trabajo tanto para el almacenaje como para el procesado posterior.

La selección de datos en las primeras etapas de las campañas geofísicas incluyó la búsqueda y recopilación de datos geográficos y el diseño de una base de datos con el software *ArcGis* de *Esri* cuya finalidad fue almacenar los datos obtenidos en cada uno de los sondeos para el análisis junto con los datos geofísicos y la información geológica.

Para la incorporación de los datos geofísicos se ha generado un archivo en formato *shape* y tres tablas relacionadas:

- SEDT : sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo
- SEDTRaw: tabla relacional que incorpora los datos en bruto de los SEDT
- SEDTApCSpi: tabla relacional con los datos procesados mediante algoritmo *Spiker*
- SEDTAppRes: tabla relacional de datos de resistividades aparentes

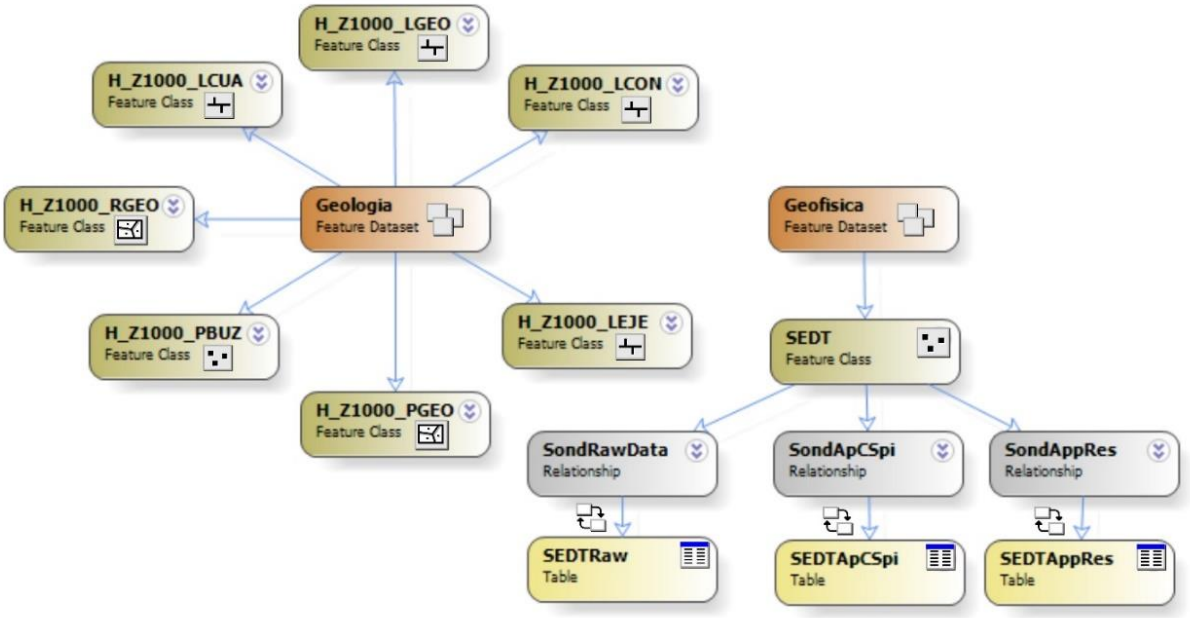


Fig. 6.8 Modelo de datos para la creación de una base de datos con los archivos generados a partir de los SEDT

7
Procesado y presentación de los datos

7.1 PROCESADO

Los datos obtenidos son medidas de voltaje en ventanas de tiempo previamente configuradas y representadas de diferentes modos que permiten su interpretación.

La denominada curva de decaimiento obtenida en cada sondeo representa el voltaje inducido en el eje de ordenadas frente al tiempo transcurrido desde el apagado de la corriente, en milisegundos, en el eje de abscisas (Fig. 7.1). La pendiente varía en función de las conductividades del subsuelo, considerando un medio homogéneo, la tasa de decaimiento –velocidad de disminución del voltaje inducido- es mayor en un medio resistivo que en uno conductivo donde la inducción generada es más elevada.

En la Fig. 7.1 izqda. se observa el perfil de voltajes frente a la posición de cada estación en un perfil en el que cada curva individual ha sido obtenida para un tiempo después del apagado. Las curvas situadas más arriba corresponden a muestreos tempranos después del apagado y las curvas inferiores contienen datos obtenidos cuando se ha dejado pasar más tiempo. Sobre las gráficas, indicados con puntos rojos, se muestran dos puntos de referencia en tres de las estaciones en comparación con las curvas de decaimiento de la Fig. 7.1 dcha. Este tipo de representación permite hacer una primera aproximación de la distribución espacial de conductividades en el terreno representada como cambios laterales en el perfil voltaje/tiempo.

Además de la observación de los parámetros de adquisición in situ y de las incidencias de la toma de datos en campo, ambas curvas son de utilidad para realizar un exhaustivo control de calidad de los datos que serán interpretados con posterioridad. Se identifican, en particular, aquellos datos que están afectados por el denominado tiempo de apagado, es decir, influenciados por limitaciones intrínsecas del propio dispositivo, y, también, aquellos que –por debilidad de la señal para tiempos largos- están demasiado corrompidos por el ruido.

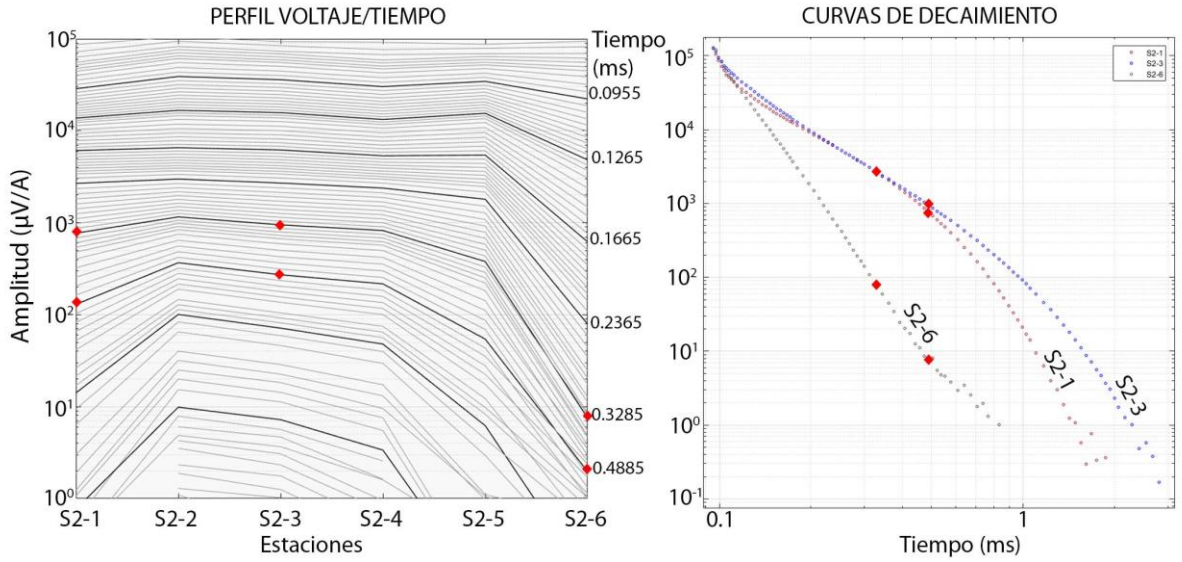


Fig. 7.1 A la derecha, curvas de decaimiento obtenidas en tres estaciones de muestreo. Nótese la variación en la tasa de decaimiento entre estaciones. A la izquierda se muestra el perfil en conjunto de todas las estaciones de muestreo. Indicados con puntos en rojo, se muestran los canales de muestreo en ambas representaciones gráficas. Analizando todo el perfil, se observa cómo varía la tasa de decaimiento para cada una de las estaciones.

El procesado de los datos incluye la eliminación de valores con un nivel de ruido elevado generado, posiblemente, como consecuencia de la proximidad a lugares en el que tienen lugar actividades antrópicas.

Como ya se comentó en el apartado 4.3, este tipo de instrumentación presenta ciertas limitaciones intrínsecas a la propia técnica. Una de ellas es la falta de resolución en el nivel más superficial. La corriente emitida por el transmisor cesa en un intervalo de tiempo muy corto (microsegundos) y no permite registrar la respuesta del nivel más superficial del terreno. La Fig. 7.2 representa la onda generada por la fuente emisora donde se visualiza la rampa de apagado ampliada en la parte inferior de la figura con un sombreado gris.

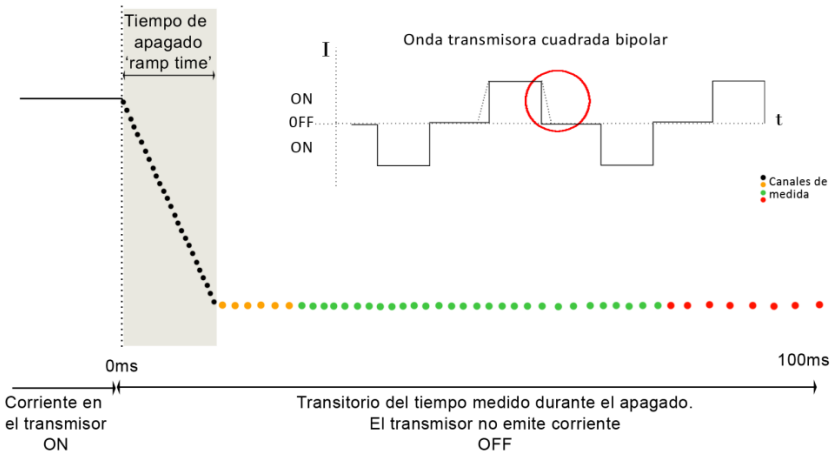


Fig. 7.2 Fuente del transmisor. En la parte superior derecha, simplificación de la onda cuadrada generada por el transmisor. En un círculo rojo, se indica el tramo que se muestra ampliado en la parte inferior de la figura. Se representa, con sombreado gris, la duración del tiempo de apagado. Durante este periodo de tiempo no es posible obtener información clara e interpretable de la conductividad del subsuelo.

7.2 PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

En esta sección se presentan y describen, en general, las tipologías de gráficas que serán empleadas para la presentación de los resultados electromagnéticos. Hacerlo ahora permite comprender el valor interpretativo de los métodos de presentación elegidos, evita repetir innecesariamente explicaciones metodológicas individualizadas para cada figura y permite focalizarse, posteriormente, en la interpretación.

7.2.1 Perfiles Voltaje-tiempo

Las curvas de decaimiento por sí solas no aportan información cuantitativa interpretable sobre la distribución de conductividades dentro de la balsa. La representación de los perfiles de voltaje-tiempo aporta una primera interpretación desde un punto de vista cualitativo al permitir comparar el comportamiento de los decaimientos de potencial para puntos distintos de un mismo perfil.

En la Fig. 7.3 se presenta un ejemplo de este tipo de presentación en la que se observa variación en la tasa de decaimiento en las estaciones laterales respecto a las zonas centrales, véase la diferencia, indicada con trazo punteado rojo, entre las estaciones 5 y 6. Una primera aproximación, desde un punto de vista cualitativo, permite definir una zona más conductiva en la zona central del perfil.

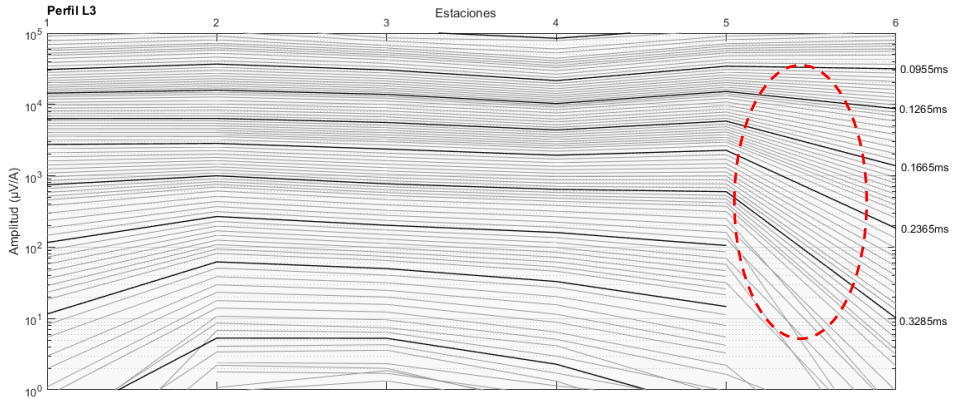


Fig. 7.3 Perfil de voltaje-tiempo. En el eje de abscisas superior se indica la estación y en el eje de ordenadas el voltaje en canales temporales. Se observa un decaimiento más rápido en las partes inicial y final lo que parece indicar una zona más resistiva. Nótese el cambio lateral indicado con línea punteada roja entre las estaciones 5 y 6.

7.2.2 Algoritmo de *Spiker*

El pre-procesado de los datos incluye la transformación del voltaje en valores de resistividades aparentes en función de la profundidad según el denominado algoritmo de *Spiker* (Smith et al., 1994) (Fig. 7.4). Este tipo de transformación permite obtener una pseudosección y visualizar de una forma rápida y sencilla posibles anomalías a lo largo de todas las estaciones realizadas en la campaña geofísica. Este tipo de transformación sirve como modelo de entrada para el análisis posterior cuantitativo de los datos en la etapa de modelización.

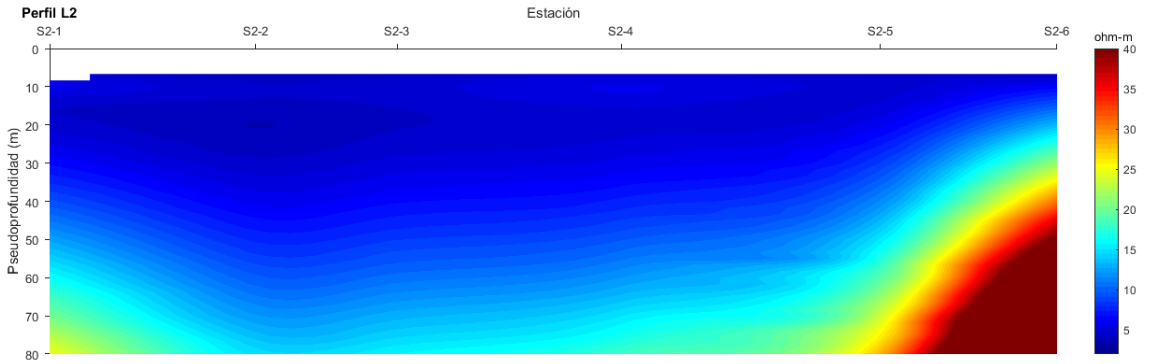


Fig. 7.4 Pseudosección longitudinal a la balsa realizada con el procesado de Spiker.

7.3 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS SEDT

Los datos obtenidos con los SEDT se interpretan analizando las variaciones espaciales y temporales en las respuestas obtenidas. En los perfiles de voltaje-tiempo los cambios laterales indican una variación de la respuesta medida según la posición del sondeo. Desde un punto de vista cualitativo, las características que permiten caracterizar esta anomalía son la amplitud, la forma y el ancho, es decir, la distribución en el espacio del objeto que genera la respuesta anómala en comparación con los demás sondeos.

El análisis de las curvas de decaimiento de forma individual proporciona información sobre el tipo de conductor, confinado o no confinado y su conductancia, producto entre el espesor y conductividad de una capa. Teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo y los materiales que se pretenden investigar, se toma como supuesto de partida un modelo de partida homogéneo, es decir, aquel en el que el único contraste de resistividades es la interfaz aire-subsuelo.

Para profundizar en el análisis cuantitativo de los datos obtenidos en la campaña geofísica que permitan determinar las propiedades físicas que generan variaciones espaciales en los perfiles obtenidos es necesario introducir la modelización dentro del flujo de trabajo de la campaña geofísica.

7.3.1 Modelización

La representación de los datos geofísicos en perfiles de voltaje-tiempo permite hacer una primera aproximación de la distribución de resistividades de la zona de estudio. Con el objeto de profundizar en la interpretación y capacidad de definir la profundidad y la geometría de las fuentes que generan la anomalía es necesario la utilización de modelos numéricos que ajusten la respuesta observada en campo a la calculada con un software de simulación numérica. Este tipo de procesado permite simplificar la geología de una zona en concreto, por lo general compleja, en un modelo simple.

Un modelo de este tipo se define según el espesor y la resistividad de las capas que lo conforman. El más sencillo es el que queda definido por una sola capa, en el que el único contraste de resistividad es el contacto entre la superficie del terreno y el aire, este tipo de modelo se define como modelo homogéneo. En términos geológicos, las interacciones eléctricas generadas en el terreno son múltiples y hace que la respuesta obtenida sea más compleja que hace necesario reducirlo a un modelo manejable con un número reducido de parámetros.

El proceso de modelización e inversión con el programa *ZondTEM1D*, consiste en un proceso iterativo en el que se busca el mejor grado de ajuste entre un modelo numérico obtenido, con la respuesta medida con la técnica geofísica. Los modelos no pretenden alcanzar un ajuste perfecto entre la respuesta calculada y observada ya que la complejidad de las variaciones en las propiedades eléctricas en el medio geológico y las interacciones en la respuesta electromagnética hace difícil que se produzca un ajuste perfecto.

7.3.2 No unicidad

Es necesario entender, cuando se modelizan datos geofísicos, que no existe una única solución matemática, un único modelo para una respuesta observada. Este efecto de modelos equivalentes hace necesario incluir toda la información disponible que amplíe el conocimiento de la zona de estudio y complemente la respuesta geofísica limitando el número de modelos posibles.

Estas restricciones impuestas pueden proceder de varias fuentes: por ejemplo, la intersección de un sondeo mecánico con el modelo proporciona un punto de ajuste que limita las posibilidades obtenidas. Otra forma de limitar las posibilidades es la utilización de análisis petrofísicos que limiten el rango de la resistividad de los niveles modelizados. Una tercera restricción, que el modelador añade al modelo con precaución, es lo que se espera geológicamente. En la práctica, la información geológica de la que se dispone se limita a zonas superficiales lo que hace difícil obtener información a-priori y además las propiedades físicas pueden variar en cortas distancias en el espacio.

El fenómeno de la no unicidad se produce como consecuencia del propio fundamento de la técnica geofísica empleada donde la respuesta obtenida es característica de la fuente conductora y esta puede ser reproducida por diferentes combinaciones de localización de la fuente, forma, geometría y contraste en las propiedades electromagnéticas. Sin más información que la respuesta medida en campo, es difícil distinguir entre un nivel conductor de un determinado espesor o varios niveles con espesores menores. Es imposible resolver un parámetro sin conocer el otro.

Por otra parte, un concepto erróneo sobre la ambigüedad en la modelización geofísica hace pensar que, dado un conjunto de datos, las posibilidades de modelos son infinitos. La capacidad del intérprete, a través de la experiencia, permite observar cuales son los efectos que se generan al variar los parámetros del modelo. La tarea del modelador consiste en encontrar el modelo que ofrece una mayor consistencia con la geología de la zona de estudio. Una vez incluidas todas las limitaciones impuestas por el intérprete y las asunciones adoptadas al construir el modelo, es un hecho que todos los modelos son una representación simplificada de la realidad pero que son útiles para comprender la distribución de las respuestas geofísicas.

En el capítulo siguiente se trata el tema de la no unicidad con el estudio de un caso real en la determinación del nivel freático en una balsa de lodos sellada basal y superficialmente.

8
Problema de equivalencia en los SEDT

Se presenta, con un caso real, uno de los problemas a los que se enfrenta la interpretación de datos geofísicos, el problema de la no unicidad, es decir, la obtención de varios modelos para unos mismos datos de campo. En este capítulo se presentan los resultados de una campaña de campo realizada para determinar el grado de saturación y el nivel freático de unos lodos almacenados en una balsa clausurada centrando la interpretación de los resultados en el problema de no unicidad o problema equivalente.

8.1 INTRODUCCIÓN

En general, un conjunto de datos geofísicos no permite por sí solo hacer una interpretación directa que permita asociar una respuesta de una determinada tipología de materiales, estructuras o cuerpo de interés geológico.

La fase previa a la interpretación geológica conlleva un proceso de análisis cualitativo y cuantitativo que permita analizar las anomalías obtenidas con el método geofísico. Un problema reiterativo en la modelización de la mayoría de técnicas geofísicas es el fenómeno de la 'no unicidad', la obtención de varios modelos que se ajustan de igual manera a los datos medidos con el método geofísico.

En este capítulo se profundiza en este problema y cómo es necesario tenerlo en cuenta cuando se modelizan datos geofísicos, en este caso, datos obtenidos con la técnica SEDT.

Los SEDT se obtuvieron en el marco del proyecto *'Estudio hidrogeofísico: Balsa de lodos de la mina de oro Valle-Boinás'*. La zona de estudio consta de una balsa de lodos de mina clausurada en el año 2008 en la que actualmente se monitorizan los caudales drenados y la química de las aguas. Se realizó un estudio hidrogeofísico en el que se utilizó la técnica SEDT con el objetivo de determinar el estado de los lodos almacenados y determinar la posible evolución de la balsa en los próximos años.

Se ha estimado, a partir de los levantamientos topográficos un relleno de base de unos 7.000.000 m^3 de material estéril hasta una cota de 427 m.s.n.m sobre el que se construyó la balsa de almacenamiento de lodos con un volumen de 4.000.000 m^3. Las dimensiones de la balsa en superficie son de 170.700 m^2, 415 m de ancho en la parte más próxima al dique de contención y 460 m de longitud desde el dique de contención al fondo del valle. La cota en superficie es de 487 m.s.n.m con un terreno prácticamente llano. (Fig. 8.1)

La campaña geofísica constó de un total de 22 sondeos distribuidos en 5 líneas orientadas en la dirección SW-NE abarcando toda la superficie del área objeto de estudio. Para la adquisición de los datos se utilizó el equipo *TerraTEM®* con un dispositivo en configuración de lazo coincidente de 40x40 m dos lazos transmisor y receptor del mismo tamaño superpuestos. La configuración ha sido escogida en función de la profundidad de investigación, estimada en un máximo de 63 m de lodos en la parte central y próxima al dique. Cada medición fue tomada desplazando el dispositivo sobre la superficie de la balsa con un tiempo promedio de 45 minutos en cada sondeo.

En la Fig. 8.1 se muestra la distribución de los sondeos con la nomenclatura utilizada y seguida en la interpretación de los resultados. El número de línea va precedido de la letra 'S', y el número de estación separado por un guion. Ej. S1-1: línea 1, estación 1. En el anexo I se presentan los parámetros de configuración de todos los SEDT.

Fig. 8.1 En la parte superior imagen aérea de la zona de estudio con la balsa clausurada objeto de estudio con unas dimensiones de 17 ha, 415 m de ancho y 460 m de longitud. En la parte inferior izquierda localización de los sondeos electromagnéticos sobre superficie de la balsa de lodos. Se han realizado un total de 22 sondeos distribuidos a lo largo de 5 líneas con dirección NW-SE utilizando la configuración lazo coincidente de 40 m de lado. Se indica en amarillo, el centro del lazo transmisor. En la parte inferior derecha, fotografía tomada el día de la toma de datos.

8.2 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA AL ESTUDIO GEOFÍSICO

Complementario al estudio geofísico, con el objeto de ampliar la información de la zona y como base para reducir las incógnitas en la resolución de los modelos geofísicos probables se realizaron los siguientes estudios:

- Revisión bibliográfica del proceso constructivo de la balsa: estos datos permitieron reconstruir la geometría interna de la balsa y sus fases de llenado hasta su clausura.
- Análisis químicos de los drenajes en el dique: los datos aportados por los análisis químicos de las aguas drenadas permiten hacer una estimación de la conductividad que se espera encontrar en los materiales almacenados.
- Análisis de los datos de caudal: basado en la reconstrucción de la evolución geométrica interna de la balsa y en la posición de los drenajes, se ha analizado la evolución de los caudales muestreados a lo largo del tiempo desde la clausura de la misma. Este análisis permite extraer conclusiones importantes en relación a los volúmenes existentes, a los tiempos de drenaje futuro que pueden esperarse y a la situación más probable del contenido en agua que aún está en el interior.

Este conjunto de datos servirá como información a tener en cuenta a la hora de reducir los modelos probables obtenidos en los análisis cuantitativos de los datos.

8.2.1 Información a priori proveniente del proceso constructivo

De forma simplificada, la estructura de la balsa desde la superficie hasta la base sobre la que se asienta, se compone de los siguientes niveles:

- Nivel de tierra vegetal (zona de pasto)
- 50 cm de arcillas compactadas impermeables
- Geomembrana HDPE aislante (sello superior)
- Recubrimiento de arcilla compactas
- Lodos almacenados
- Arcillas
- Geomembrana HDPE aislante (sello inferior)

La revisión del proceso constructivo proporcionó información consistente respecto a la posición topográfica de la base de la balsa de lodos y sobre la superficie del valle original. La posición de estos dos elementos ha podido ser obtenida, con el auxilio de un sistema de información geográfica GIS, bajo cada una de las localizaciones elegidas para los sondeos electromagnéticos. (Fig. 8.2).

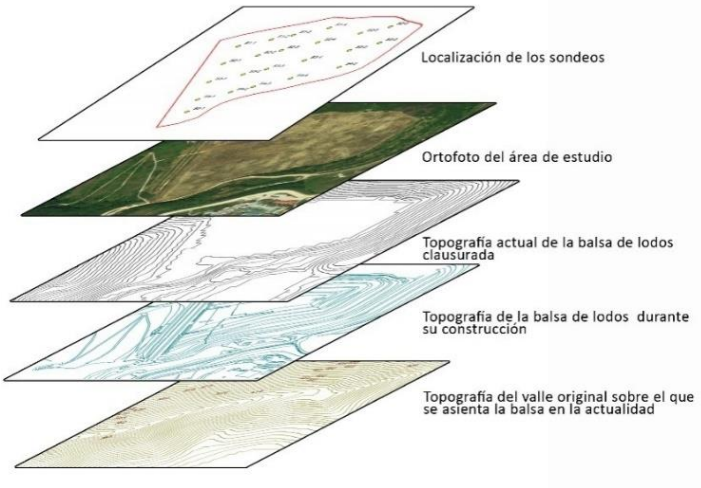
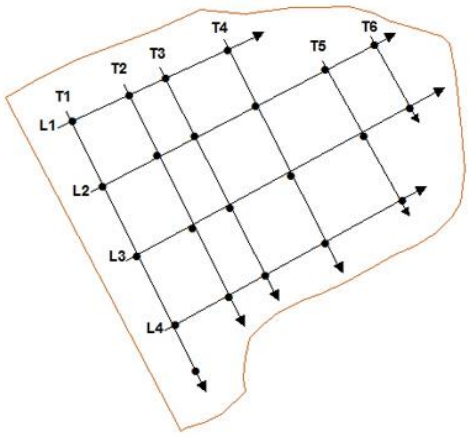


Fig. 8.2 La revisión exhaustiva comparada del proceso constructivo ha resultado en la construcción de capas de Información relevante que actúan de información a-priori para la inversión de los resultados geofísicos.

Para la visualización e interpretación de los datos, los SEDT se presentan en pseudoperfiles longitudinales (L) y transversales (T) según la nomenclatura presentada en la Fig. 8.3. En total se realizaron 4 perfiles longitudinales: L1, L2, L3 y L4 y 6 perfiles transversales: T1, T2, T3, T4, T5 y T6.



Perfiles	SEDT en cada perfil
L1	S1-1; S1-2; S1-3; S1-4
L2	S2-1; S2-2; S2-3; S2-4; S2-5; S2-6
L3	S3-1; S3-2; S3-3; S3-4; S3-5; S3-6
L4	S4-1; S4-2; S4-3; S4-4; S4-5
L5	S5-1
T1	S1-1; S2-1; S3-1; S4-1; S5-1
T2	S1-2; S2-2; S3-2; S4-2
T3	S1-3; S2-3; S3-3; S4-3
T4	S1-4; S2-4; S3-4; S4-4
T5	S2-5; S3-5; S4-5
T6	S2-6; S3-6

Fig. 8.3 Situación de los perfiles donde ha sido realizada la interpretación electromagnética y nomenclatura utilizada para describirlos al ser presentados como resultados.

La Fig. 8.4 representa un corte longitudinal de la balsa, realizado a lo largo del perfil L3, donde se ha situado el fondo de la balsa y el valle original tal como se han calculado a partir de la revisión del proceso constructivo. Estas figuras serán de gran utilidad en la interpretación cualitativa y cuantitativa de los modelos resultantes de la inversión.

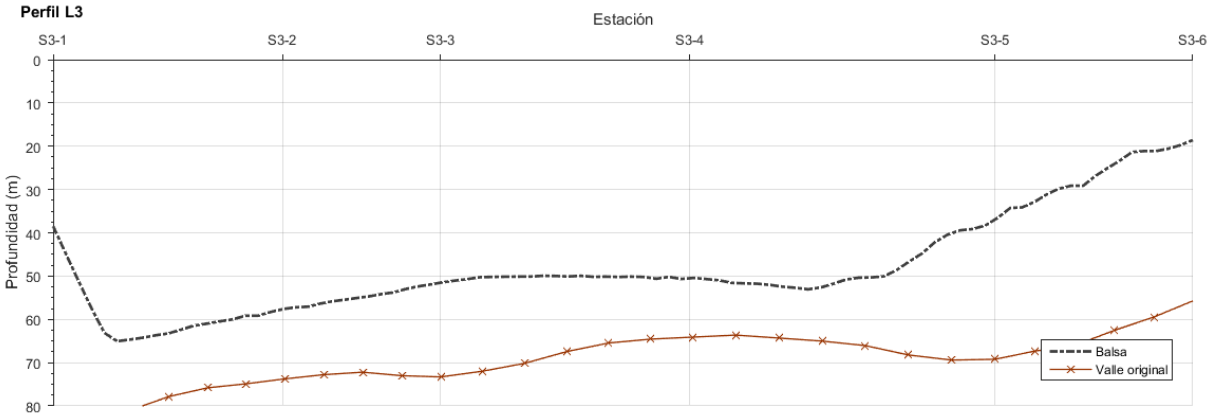


Fig. 8.4 Perfil L3 longitudinal a la balsa de lodos desde el sondeo S3-1 al S3-6. El eje horizontal en la parte superior se representa el número del sondeo. En trazo negro, el perfil topográfico que corresponde a la base de la balsa. En rojo la superficie del valle original. Ej: Bajo el sondeo S3-2 se estima un espesor de 60 m de lodos aproximadamente.

A partir de este tipo de resultado para todos los perfiles es posible estimar la profundidad a la que se encuentra la base de la balsa bajo cada sondeo electromagnético (véase Tabla 8.1). Estas profundidades se tuvieron en cuenta como valores máximos para las potencias de lodos admisibles.

Tabla 8.1 Profundidad a la que se encuentra la base de la balsa

Sondeo	Prof. Balsa (m)	Sondeo	Prof. Balsa (m)	Sondeo	Prof. Balsa (m)	Sondeo	Prof. Balsa (m)
S1-1	31,75	S2-3	56,64	S3-3	50,23	S4-3	25,17
S1-2	28,93	S2-4	55,22	S3-4	51,39	S4-4	17,59
S1-3	27,48	S2-5	37,90	S3-5	36,97	S4-5	17,5
S1-4	24,37	S2-6	15,99	S3-6	19,43	S5-1	15,75
S2-1	47,07	S3-1	37,86	S4-1	27,36		
S2-2	58,44	S3-2	58,09	S4-2	20,91		

8.2.2 Información proveniente del análisis químico de las aguas drenadas.

El método SEDT permite medir variaciones espaciales de conductividad en los materiales del subsuelo. Esta magnitud mide la capacidad que tiene un material para permitir o impedir la circulación eléctrica a través de él.

No es posible establecer una correspondencia unívoca entre material y conductividad, pues ésta depende de varios factores que pueden cambiar para el mismo material. Por otro lado, en los materiales rocosos, la conductividad se entiende desde dos puntos de vista: conducción electrónica a través de la matriz y conducción a través de los fluidos. El primer caso requiere minerales conductivos interconectados, como ocurre en yacimientos metálicos donde la alta concentración de minerales metálicos genera una red de interconexión que permite la circulación de corriente eléctrica. Por otra parte, y mucho más frecuente, la conducción eléctrica de los materiales rocosos se realiza a través de los fluidos que ocupan los poros.

Las medidas de conductividad en laboratorio se realizan de modo estandarizado en régimen saturado. Son varios los autores (Kalinski and Kelly, 1993) que relacionan linealmente el contenido de agua con el valor de resistividad de la formación en la que aparece lo que indica que el grado de saturación de la muestra condiciona directamente el valor de resistividad. La conductividad eléctrica es la propiedad física que más varía dependiendo de las condiciones, por ejemplo Kuranchie et al., (2015) a partir de sus experimentos con lodos de una mina de hierro, obtiene valores desde 11 kΩ-m en estado seco hasta 20 ohm-m en régimen saturado.

En el caso que nos ocupa se han obtenido valores de conductividad de las aguas drenadas del interior de la balsa de 10.330 µS/cm (1,03 S/m-0.97 Ω-m) que correspondería con valores típicamente asignados a aguas salobres (Ming Huang et al., 2011) (Tabla 8.2)

Tabla 8.2 Valores de conducción eléctrica del agua (Weast, 1989)

	Conductividad (µS/cm)	Resistividad (Ω-m)
Agua destilada	5,5 x 10^{-2}	1,81 x 10^{5}
Agua potable	50-500	200-20
Agua salobre	2500-20000	4-0.5
Agua del mar	50000	0,2

Los resultados de laboratorio de las aguas drenadas de la balsa permiten analizar las causas de tan elevada conductividad. El total de sólidos disueltos supera las 5000 ppm y es de gran relevancia el alto contenido en sulfatos (4735 mg/l) detectado, un 0.47 % en peso de una solución acuosa. La conductividad equivalente para este tipo de aniones es de 5,4 mS/cm (véase Fig. 5.1), que explica la mitad de la alta conductividad encontrada en las aguas drenadas de la balsa.

Este valor elevado de conductividad condiciona de forma directa los modelos geoeléctricos que se obtienen con la técnica geofísica SEDT.

8.2.3 Información de los caudales drenados

Como información complementaria a los estudios geofísicos, se analizaron los caudales drenados de la balsa en el momento de la campaña geofísica.
El estudio contó con el análisis de 13 drenes conectados a distintas alturas sobre el dique de contención de la balsa con el objeto de estudiar la recesión temporal de agua almacenada en el interior. (Fig. 8.5)

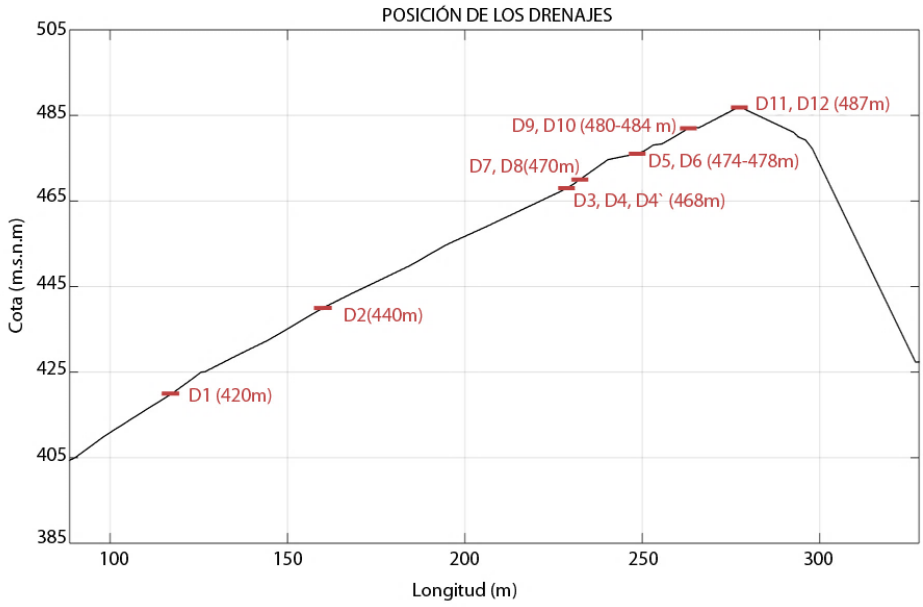


Fig. 8.5 Posición de los drenajes colocados en el dique de contención de la balsa de lodos.

La Tabla 8.3 resume el caudal drenante medido el mes previo a la ejecución del estudio geofísico.

Tabla 8.3 Caudal medido en los drenajes el mes anterior a la campaña geofísica

Dren	D1	D2	D3	D4	D4'	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	TOTAL
Cota (m.s.n.m)	420	440	468	468	468	474-478	474-478	470	470	480-484	480-484	487	487	
Q (l/min)	---	0.48	0.72	0.01	0.26	2.66	---	1.04	0.3	0	---	0	0	5.47

El estudio de los caudales drenados permite delimitar cuatro zonas en el interior de la balsa.

- Un nivel superior con una cota desde 480 m.s.n.m que corresponde con los drenes 9,10 y 11 en los que el caudal es nulo.
- Un nivel intermedio, donde los drenes 5,6,7 y 8 contribuyen en su mayoría al total del agua drenada.
- Un nivel inferior a cota 440-468 en los que el caudal es menor.
- El dren inferior D1 situado en la base de la balsa con caudal nulo.

8.3 DETECCIÓN DE LA NO-UNICIDAD

La técnica SEDT es especialmente eficaz para caracterizar zonas con altos valores de conductividad (El-Kaliouby and Abdalla, 2015; Sørensen et al., 2005, 2000). La información de los análisis de las aguas drenadas, convertida a valores de conductividad, sirve como información a-priori para el procesado de los datos por inversión.

Toda la información complementaria a la geofísica se utiliza como información a priori en la futura interpretación. Se establece un modelo de partida para el análisis cuantitativo de los SEDT compuesto por tres niveles:

- Nivel superior no saturado
- Nivel saturado conductivo
- Basamento resistivo

En este sentido se consideran admisibles valores de resistividad en el nivel conductivo comprendidos en el rango entre 1-10 Ω-m. El problema en la interpretación radica en delimitar con exactitud la cota a la que aparece el nivel conductivo (saturado) que varía en función del valor de resistividad asignado a los lodos saturados.

8.4 RESULTADOS

Los perfiles de voltaje-tiempo describen cualitativamente el comportamiento en la respuesta del transitorio a lo largo de cada uno de los perfiles. Sirva de ejemplo la Fig. 8.6 donde se muestra el perfil L1T transversal a la balsa, paralelo y próximo al dique de contención.

En la parte superior del perfil, en el canal de tiempo 0.955 ms, los sondeos 1, 2, 3 y 4 muestran una tasa de decaimiento similar lo que indica que no varía lateralmente de manera sustancial el valor de conductividad ni la geometría de los materiales. Contrasta esto con el sondeo 5 donde se observa un cambio en la tendencia de las líneas que indica que el espesor de lodos almacenados en esa zona es menor. Los canales de tiempo entre 0.1665 ms y 0.328 ms reflejan un decaimiento mayor en los sondeos 1 y 4 en relación a los sondeos 2 y 3 lo que indica un mayor espesor de lodos en la zona central. Por lo tanto los datos nos estarian indicando de forma cualitativa la distribución de lodos dentro de la balsa, resultados esperados según la información aportada a partir de la reconstrucción geométrica de la balsa.

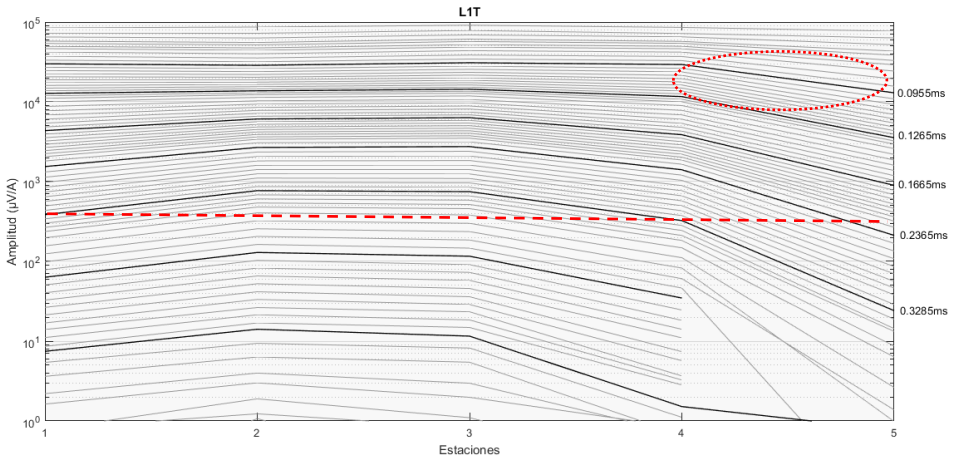


Fig. 8.6 Perfil de voltaje-tiempo transversal a la balsa próximo al dique de contención. En la parte superior derecha de la imagen se observa un cambio lateral en el comportamiento de la línea de voltaje, indicando un mayor contraste en los valores de conductividad. La causa es debida a la menor acumulación de lodos en esa zona. Se indica con línea punteada el cambio lateral que se produce entre los sondes 1, 4 y 2,3.

Los perfiles de voltaje-tiempo han sido analizados para cinco perfiles longitudinales y seis perfiles transversales. Esto ha servido de orientación inicial sobre el comportamiento general de los voltajes y ha proporcionado una evaluación gruesa de la distribución de geometrías y conductividades. Se adjuntan en el Anexo II los perfiles voltaje tiempo para toda la balsa.

8.4.1 La transformación de *Spiker*

El análisis cuantitativo de los datos se obtiene mediante la transformación de *Spiker* que sirve como modelo de entrada en la inversión. Esta información junto con los datos aportados en la revisión del proceso constructivo de la balsa y el análisis de las aguas drenadas de su interior permitió restringir el número de modelos posibles incorporando estos datos como información a-priori.

En la Fig. 8.7 se representa uno de los perfiles longitudinales obtenidos con este tipo de transformación sobre el que se superpone la superficie del fondo de la balsa. Se observa una clara consistencia entre la forma del fondo de la balsa y de la respuesta obtenida con este procesado. Todos los perfiles realizados se incluyen en el Anexo III.

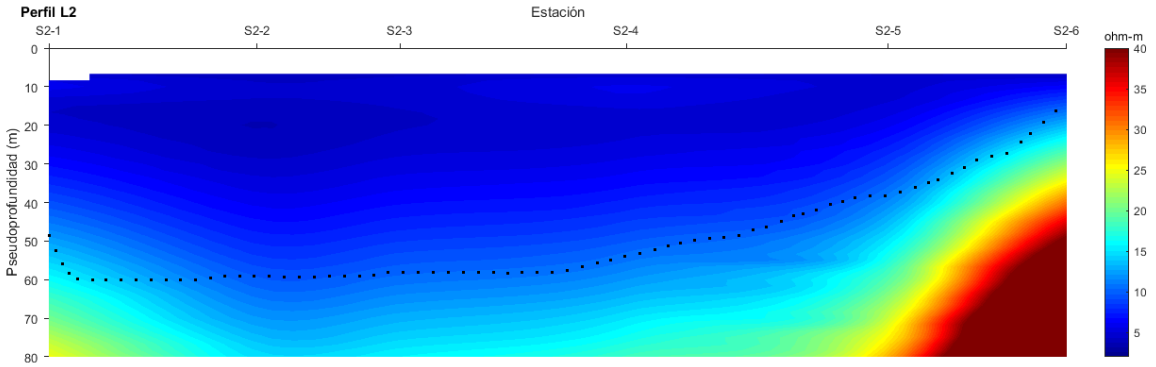


Fig. 8.7 Perfil obtenido con la transformación de *Spiker* sobre el que se representa la superficie del fondo de la balsa. Queda patente como en las estaciones S2-5 y S2-6 donde el espesor de lodos es menor, los valores mayores de resistividad se encuentran más cerca de la superficie que en el centro de la balsa. La respuesta es similar en el sondeo S2-1, próximo al dique de contención.

Una mejor comprensión en conjunto con este procesado se visualiza en la Fig. 8.8 en la que se representa los valores de resistividad obtenidos con el procesado de *Spiker* a distintas profundidades. Se observa una

zonación claramente definida de la distribución de lodos en el interior de la balsa. A profundidades de más de 50 m, los lodos se concentran solamente en la zona central.

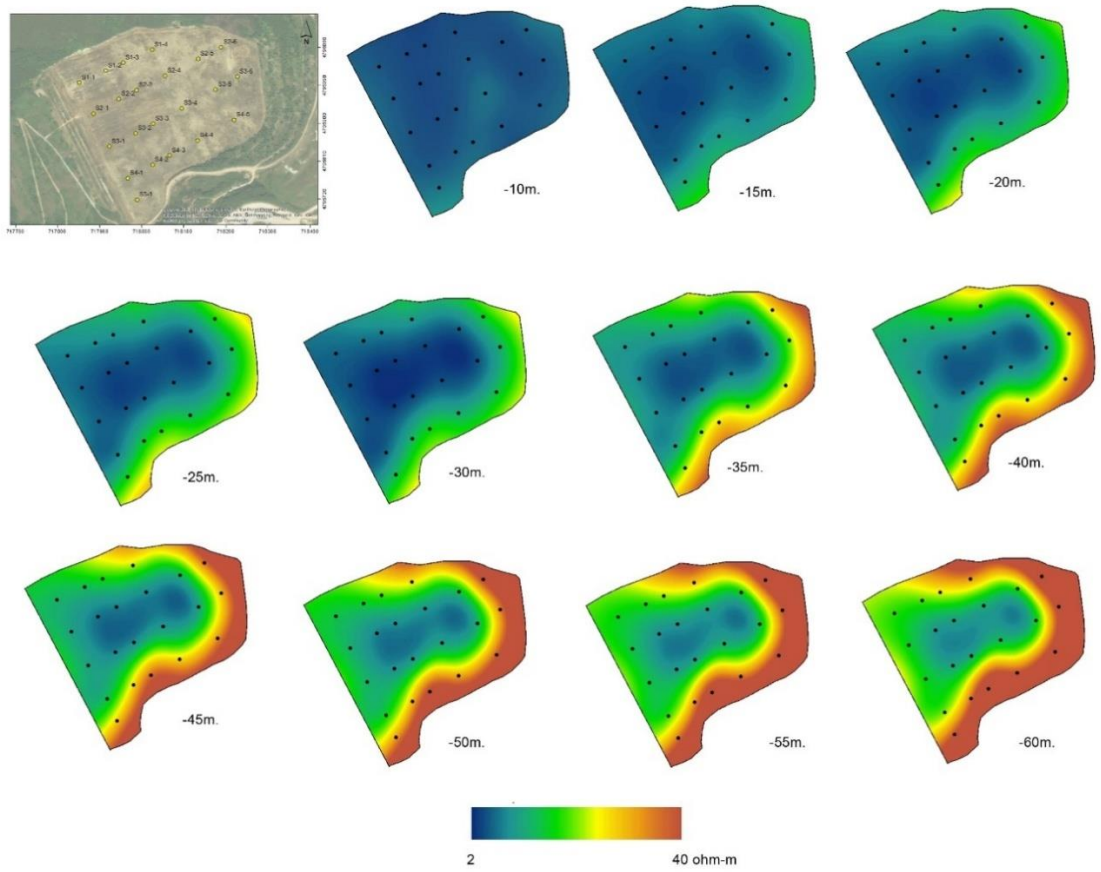


Fig. 8.8 Representación de la balsa a distintas profundidades con el procesado de Spiker. Se observa claramente definida una zonación que representa la distribución de lodos en el interior de la balsa. Los laterales, donde el espesor de lodos es menor, los valores de resistividad obtenidos a menores profundidades aumentan sustancialmente. A mayores profundidades se observa como los valores de resistividad bajos se concentran en el centro de la balsa.

8.4.2 Modelización e inversión

La transformación de *Spiker* permitió determinar la distribución de los lodos en la balsa de forma general. Con el objetivo de establecer con mayor precisión la potencia y la resistividad de estos materiales es necesario ajustar los datos observados a unos calculados a partir de modelos numéricos. Para ello se tomarán como referencia los sondeos sobre el perfil longitudinal L2 y transversal T2.

En una primera fase de simulación se obtuvieron modelos partiendo de dos capas con un nivel superior conductivo del orden de 10 **Ω**-m y un basamento resistivo (>100 **Ω**-m). Este primer modelo permitió hacer una aproximación inicial a la distribución de resistividades de los lodos en el interior de la balsa.

Como se observa en la parte inferior de la Fig. 8.9 los modelos de dos capas son consistentes con las profundidades limitadas por el sellado inferior de la balsa representado en trazo discontinuo negro en la parte superior. Estos datos concuerdan con la información aportada con la transformación de *Spiker* en la que se visualiza la estructura interior de la balsa.

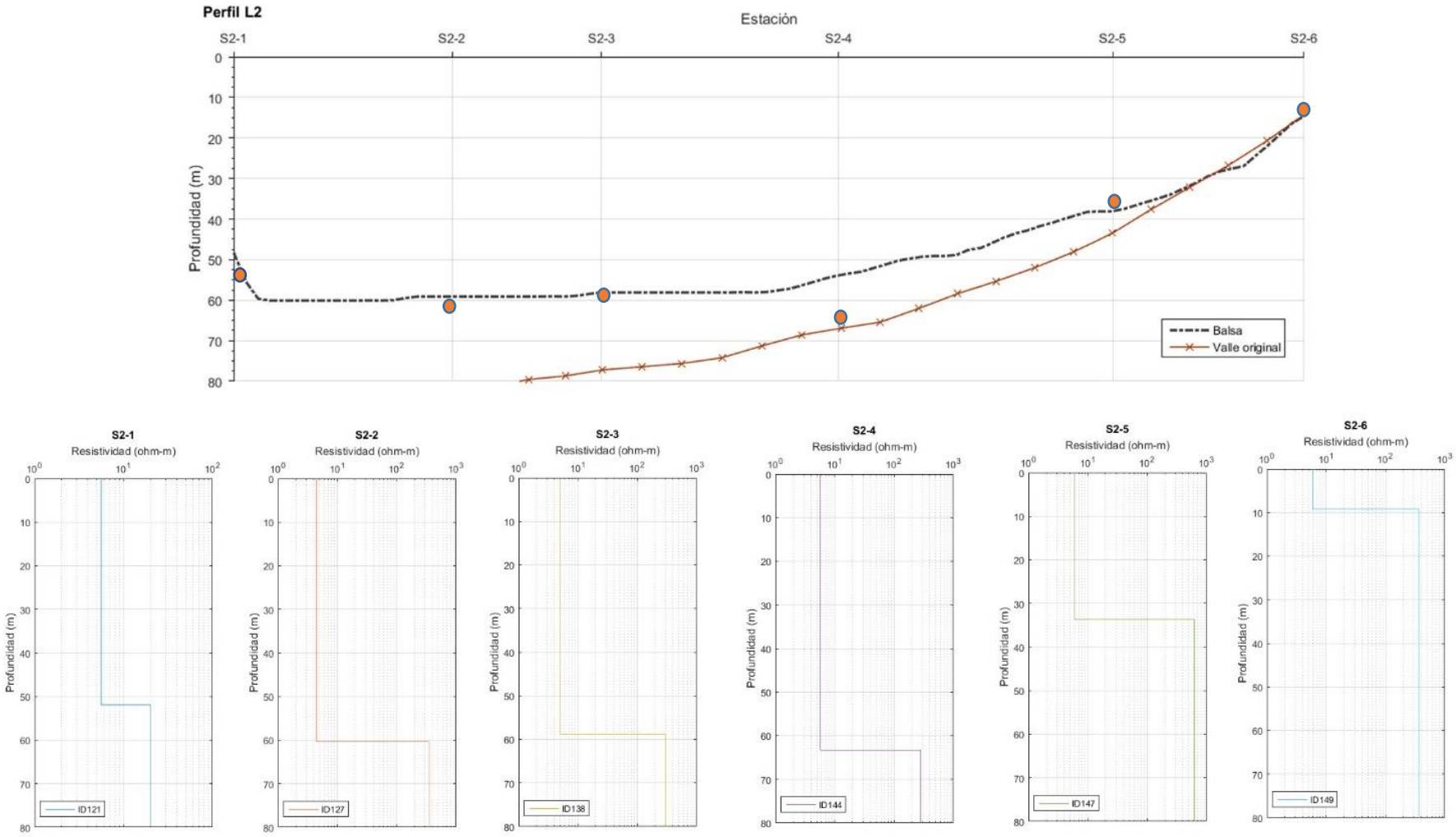


Fig. 8.9 Ajuste de modelos con dos capas en el perfil L2. En la parte superior se muestra el perfil de la balsa con trazo negro indicando el contacto obtenido por medio de la inversión. En la parte inferior los modelos de ajuste de dos capas. Un nivel superior conductivo y un basamento resistivo.

A partir de esta primera fase de modelización se concluye:

1. El ajuste de las respuestas obtenidas en campo a un modelo de dos capas permite observar una consistencia clara con la información aportada también con el procesado de *Spiker*.
2. La calidad del ajuste no es muy buena pero sí el patrón general. Se observan dos zonas claramente diferenciadas: un nivel conductivo con valores de resistividad mayores de los esperados y uno resistivo que comienza en el sellado de la balsa y se extiende en profundidad. Esto indica una buena estimación cualitativa para la que puede buscarse todavía una mayor resolución en vertical.

A partir de los modelos de dos capas, se incluye un tercer nivel con la finalidad de obtener un mayor ajuste en la respuesta de los datos observados. Como se observa en la Fig. 8.10 son varios los modelos obtenidos que tienen varias características comunes: una capa superior ligeramente resistiva del orden de 10 **Ω**-m, bajo esta, un nivel conductivo del orden de 1-4 **Ω**-m y como límite inferior un basamento resistivo (>200 **Ω**-m)

En este rango de valores son varios los modelos obtenidos que permiten interpretar la distribución de resistividades dentro de la balsa. Como criterio de ajuste se han utilizado para la interpretación aquellos modelos con un RMS por debajo de 5.

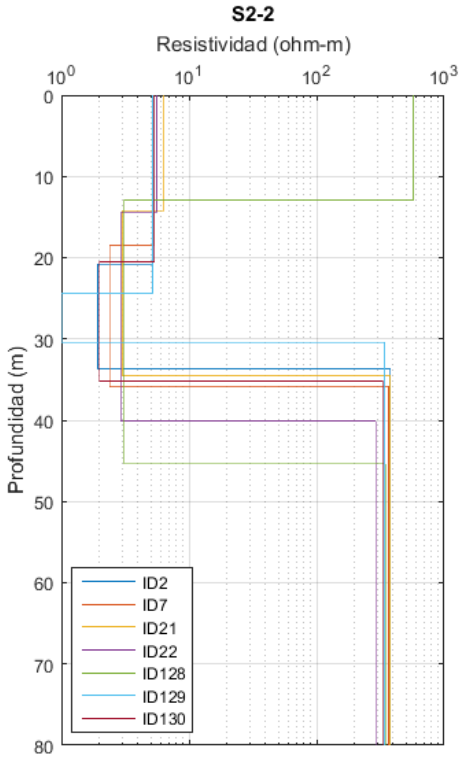


Fig. 8.10 Modelos obtenidos para la estación S2-2 con un RMS < 5. Obsérvese cómo pueden obtenerse diferentes resistividades (aunque muy bajas) y profundidades compatibles con las medidas tomadas.

8.4.3 Definición de la no unicidad

No es posible limitar la respuesta de los datos obtenidos en campo a un solo modelo con valores absolutos de profundidad y resistividad. Por ello fue necesario hacer un análisis de los modelos obtenidos en cada sondeo y estudiar su comportamiento.

Con la finalidad de ilustrar el fenómeno de la no unicidad se representan los modelos adquiridos para cuatro sondeos SEDT y la correlación entre los parámetros de ajuste. Queda patente el concepto de conductancia, producto entre los parámetros de conductividad y potencia, y cómo es posible ajustar varios modelos variando el valor de sus parámetros.

En las gráficas presentadas en la Fig. 8.11 se observa una correlación entre los valores de resistividad del nivel intermedio y su potencia para cuatro SEDT con un RMS<5. Se observa cómo valores bajos de resistividad se ajustan con espesores pequeños en el rango entre 0,5 **Ω**-m y 4 **Ω**-m.

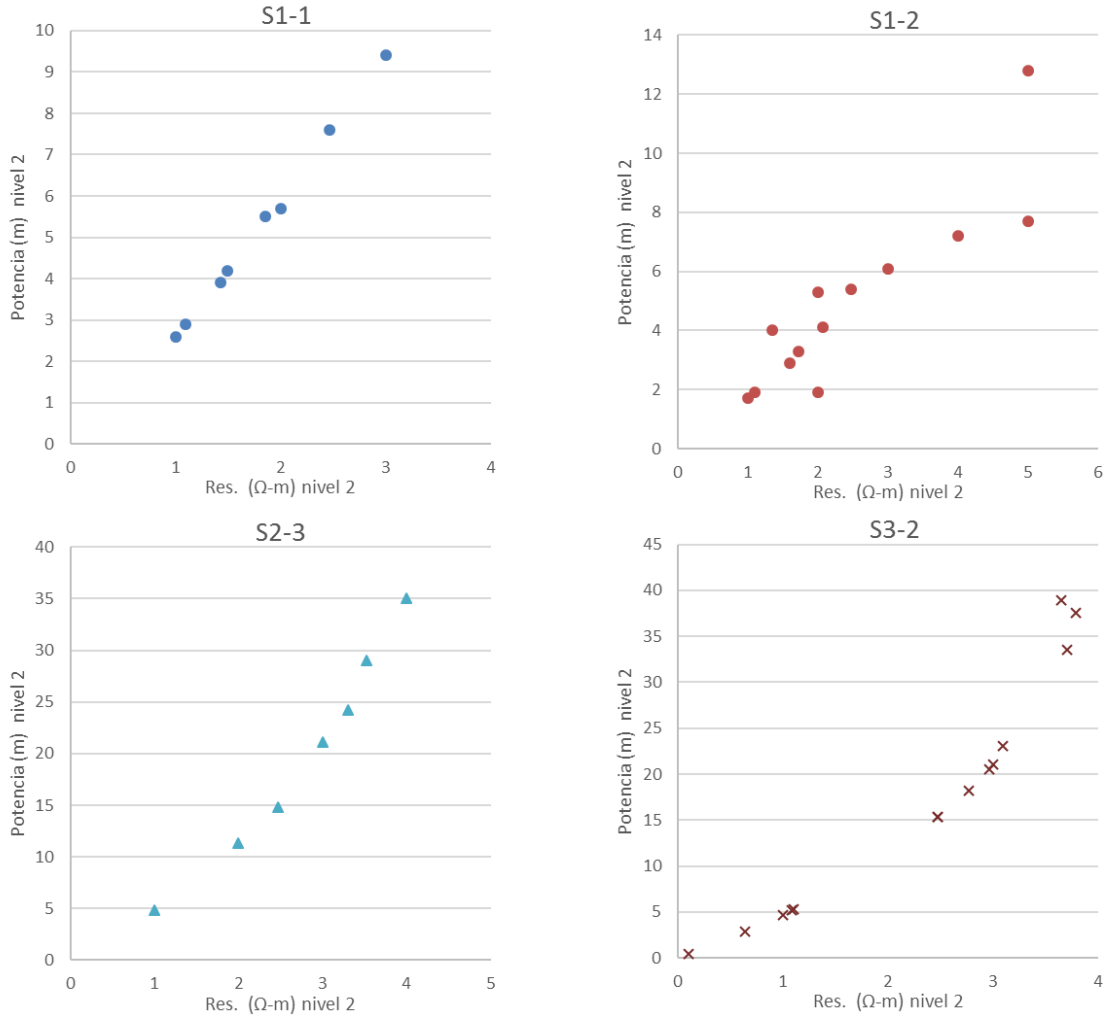


Fig. 8.11 Correlación entre la potencia y la resistividad del nivel intermedio conductivo. Modelos RMS < 5

En las gráficas de la Fig. 8.12 se representa la correlación entre el muro del nivel conductivo y la resistividad de este nivel. Se observa una correlación positiva donde modelos con un nivel intermedio más resistivo alcanzan mayores profundidades. Este análisis permitió estimar un rango de máxima profundidad de la capa conductiva.

El límite inferior del nivel conductivo en los modelos obtenidos no alcanza la base de la balsa que se estimó a partir de la revisión del proceso constructivo. El análisis de estos modelos permite inferir la existencia una capa resistiva situada entre el sellado inferior de la balsa y la capa conductiva superpuesta.

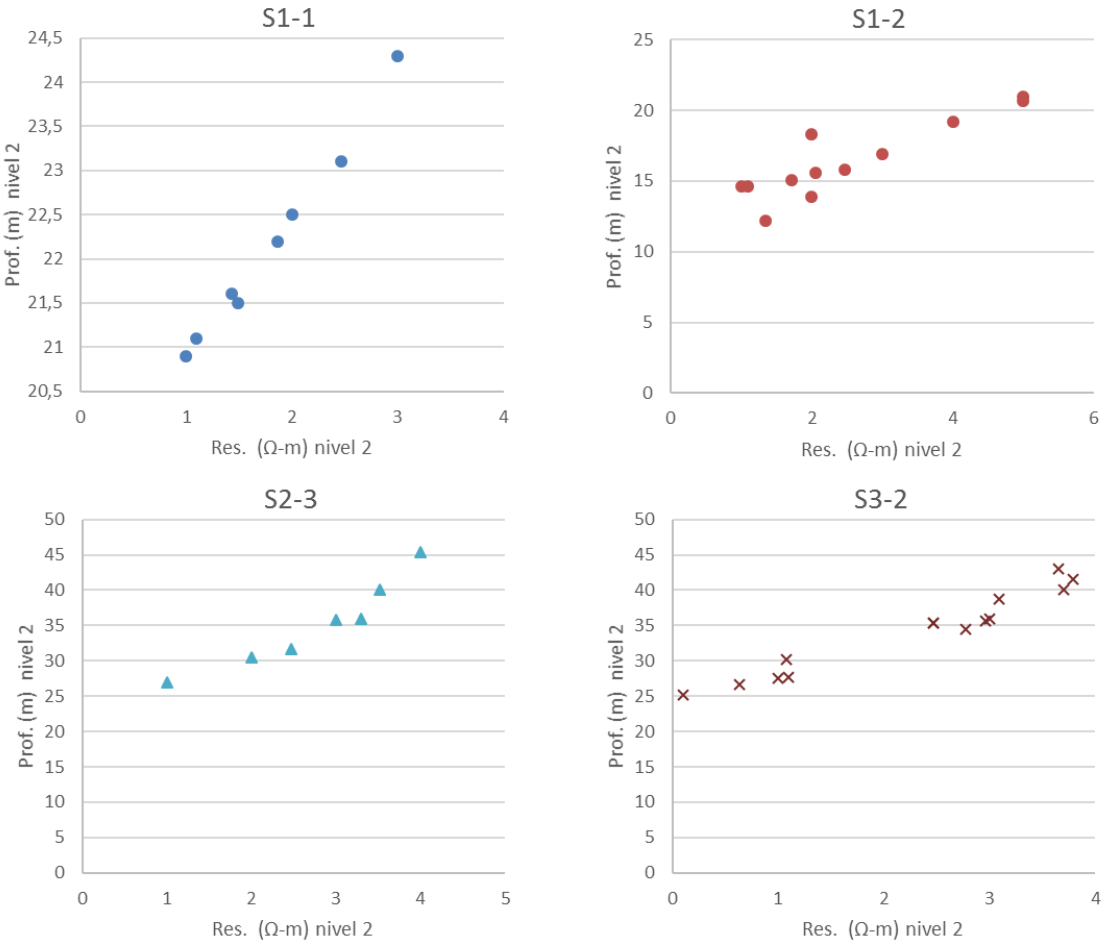


Fig. 8.12 Correlación entre la profundidad del nivel conductivo y la resistividad del nivel 2. Modelos RMS < 5

La delimitación del nivel superior conductivo se interpretó a partir de la gráfica que se presenta en la Fig. 8.13. En ella se observa una correlación negativa entre la profundidad del nivel superior y la resistividad del nivel medio. Los valores de resistividad altos se ajustan a modelos con el techo del nivel intermedio próximo a la superficie.

La conductividad del agua drenada del interior de la balsa es de 9ms/cm, en términos de resistividad, aproximadamente 1 **Ω**-m. Este valor permitió limitar el rango de valores obtenidos en los modelos ya que la resistividad de los materiales está influenciada en gran medida por el electrolito que ocupa los poros.

Esta limitación permitió estimar una profundidad del nivel superior en un rango de unos 15-25m.

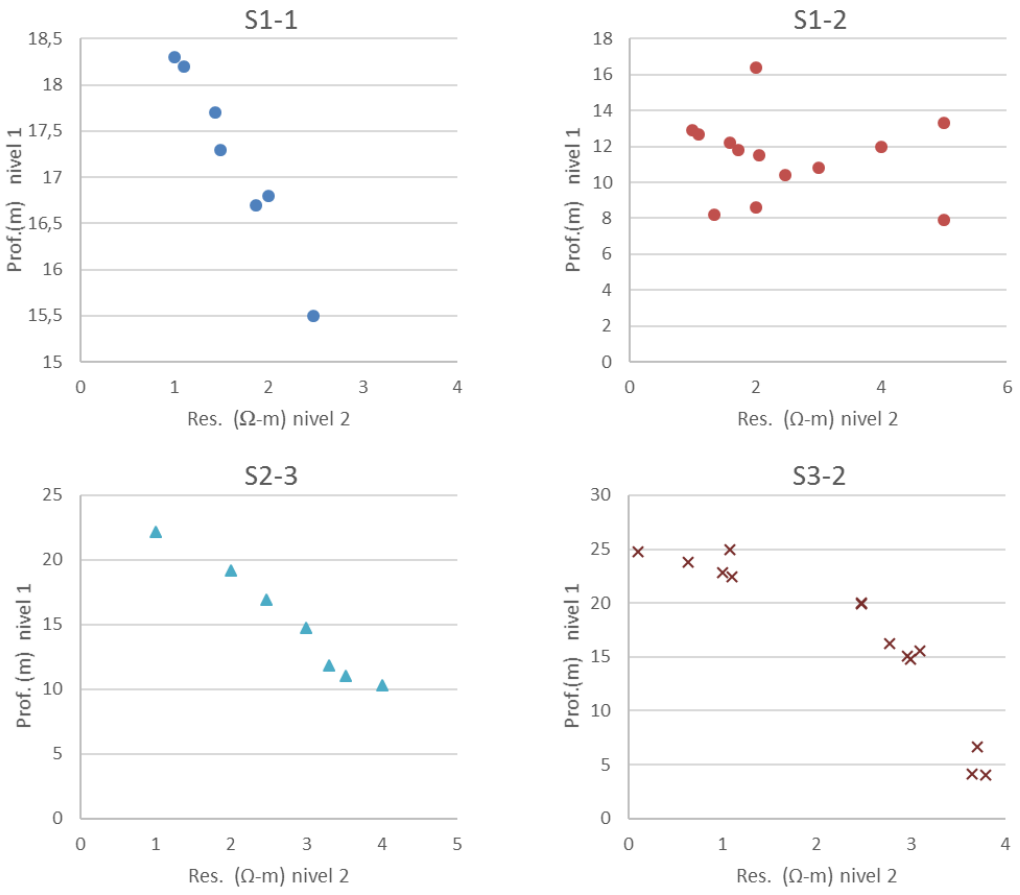


Fig. 8.13 Correlación entre la profundidad del nivel 1 y la resistividad del nivel 2. Modelos RMS < 5

8.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Son varios los modelos que se ajustan a los datos observados en campo con un RMS<5. En el caso de las estaciones más próximas a los laterales de la balsa, los modelos no presentan un buen ajuste debido a la elevada tasa de decaimiento y la incapacidad del método de resolver zonas de baja conductividad. A pesar de esto ha sido posible obtener un número de modelos que muestran consistencia con el procesado de *Spiker*.

En las Fig. 8.14 y Fig. 8.15 se presentan los modelos de tres capas obtenidos para los perfiles L2 y T2 en comparativa con el procesado de *Spiker*. Ha sido posible ajustar la distribución de resistividades a un modelo consistente en: una capa intermedia con un valor de resistividad que varía en el rango de 0,5-4 **Ω**-m y que indica una zona saturada en el interior de la balsa con una potencia posible entre 5 y 20 m. Este rango de valores varía en función de la resistividad del nivel intermedio como consecuencia del fenómeno de "no unicidad". Sobre ésta, un nivel ligeramente más resistivo (5-10 **Ω**-m) que se interpreta como un nivel que incluso pudiera estar no saturado –aunque esto no sería necesario- y un límite inferior con resistividades altas (>100 **Ω**-m) que es probable que se deba a una mayor compactación de los lodos almacenados.

La Fig. 8.16 sintetiza el conjunto de modelos posibles en cada estación. Ha sido posible obtener modelos donde la resistividad del nivel intermedio es de 4 **Ω**-m y la potencia de 30 m indicado sobre la figura en trazo discontinuo negro y el caso contrario, modelos con resistividades por debajo de 1 **Ω**-m que ajustan con potencias de menos de 4 m, representado con trazo discontinuo azul.

Si se considera como información a-priori la conductividad aportada en el análisis químico de los drenajes, profundidad a la que se encuentra el techo del nivel saturado es de 25 m y una potencia de 6 m (Fig. 8.16). Este dato ha de tomarse con cautela ya que la correlación directa ente los valores de conductividad de las aguas no corresponde exactamente con los valores de resistividad obtenida con el método geofísico.

En resumen, se puede concluir que la campaña geofísica permitió, junto con la información aportada en el análisis de los drenajes y la revisión del proceso constructivo delimitar una zona saturada con valores de resistividad muy bajos asociados a lodos saturados. Los modelos obtenidos a partir de los datos geofísicos se ajustan en buen grado a un modelo de 3 capas donde el rango de resistividades de la capa central varía de 0,5 a 4 **Ω**-m. con potencias correspondientes de 5 a 20 m.

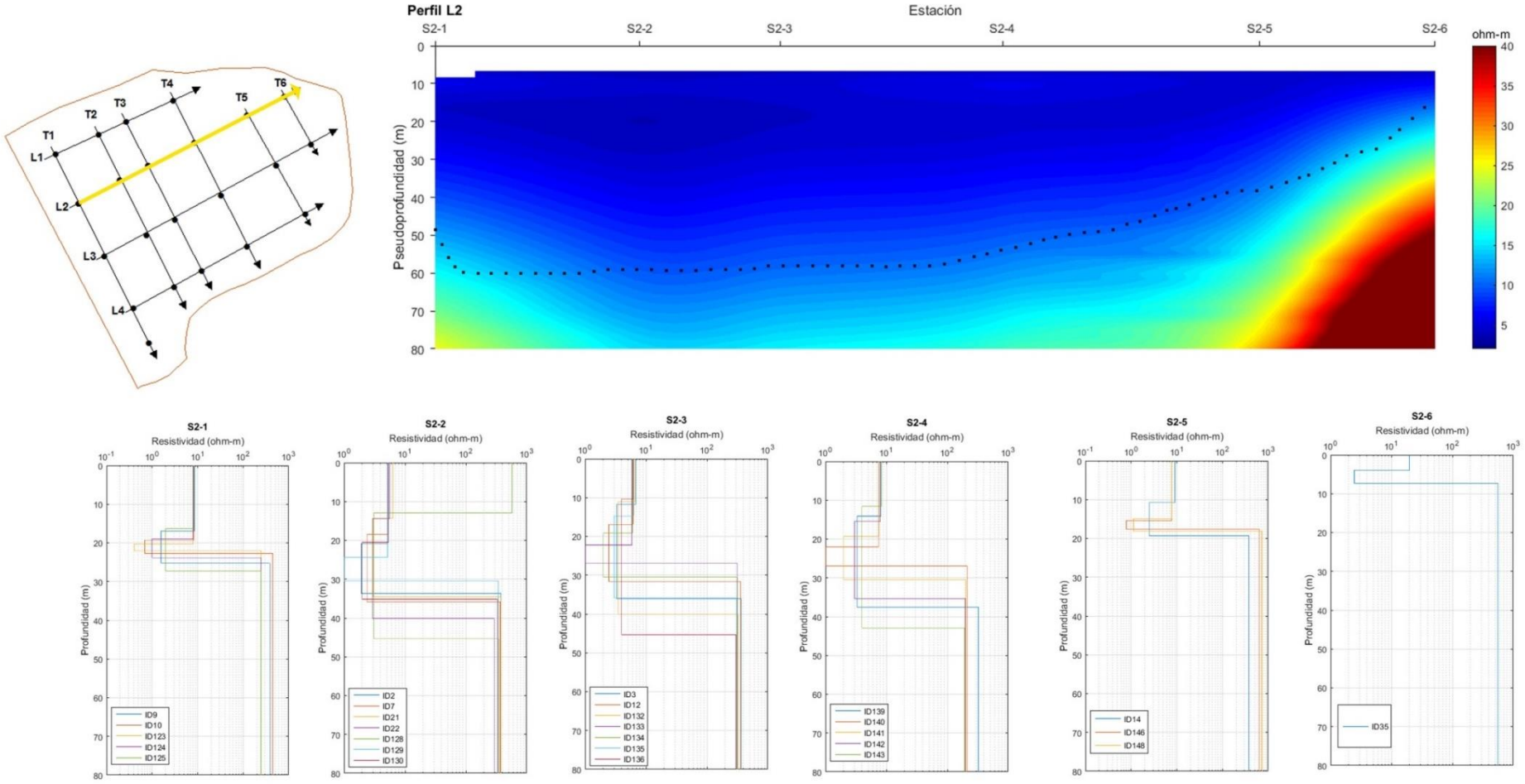


Fig. 8.14 Perfil longitudinal L2 con los modelos obtenidos en cada una de las seis estaciones representadas de izquierda a derecha en la parte inferior. Son varios los modelos equivalentes que se ajustan con un RMS<5. Nótese la similitud entre los modelos obtenidos y el procesado de *Spiker*

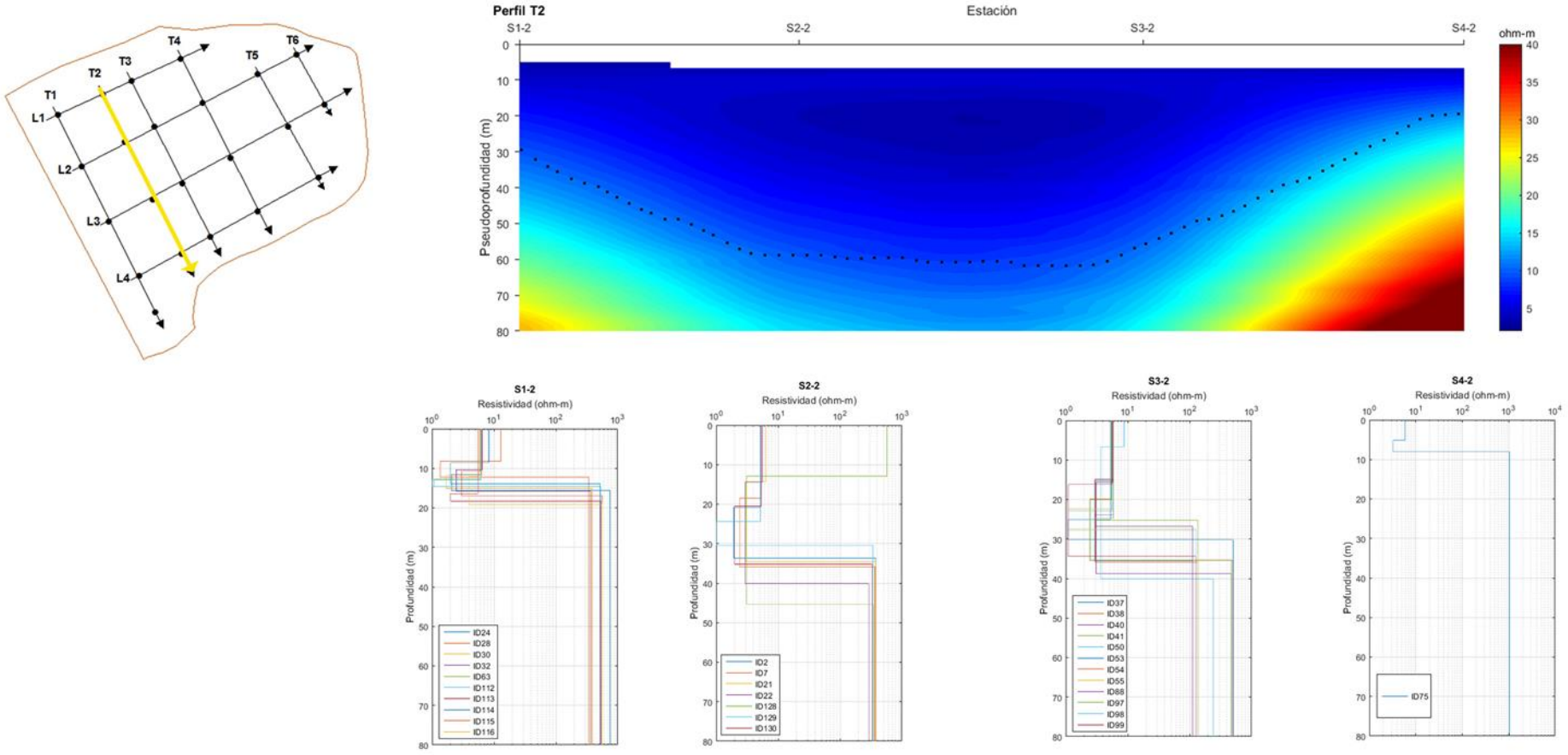


Fig. 8.15 Perfil transversal T2 con los modelos obtenidos en cada una de las cuatro estaciones y su comparación con el perfil de la transformación de *Spiker*.

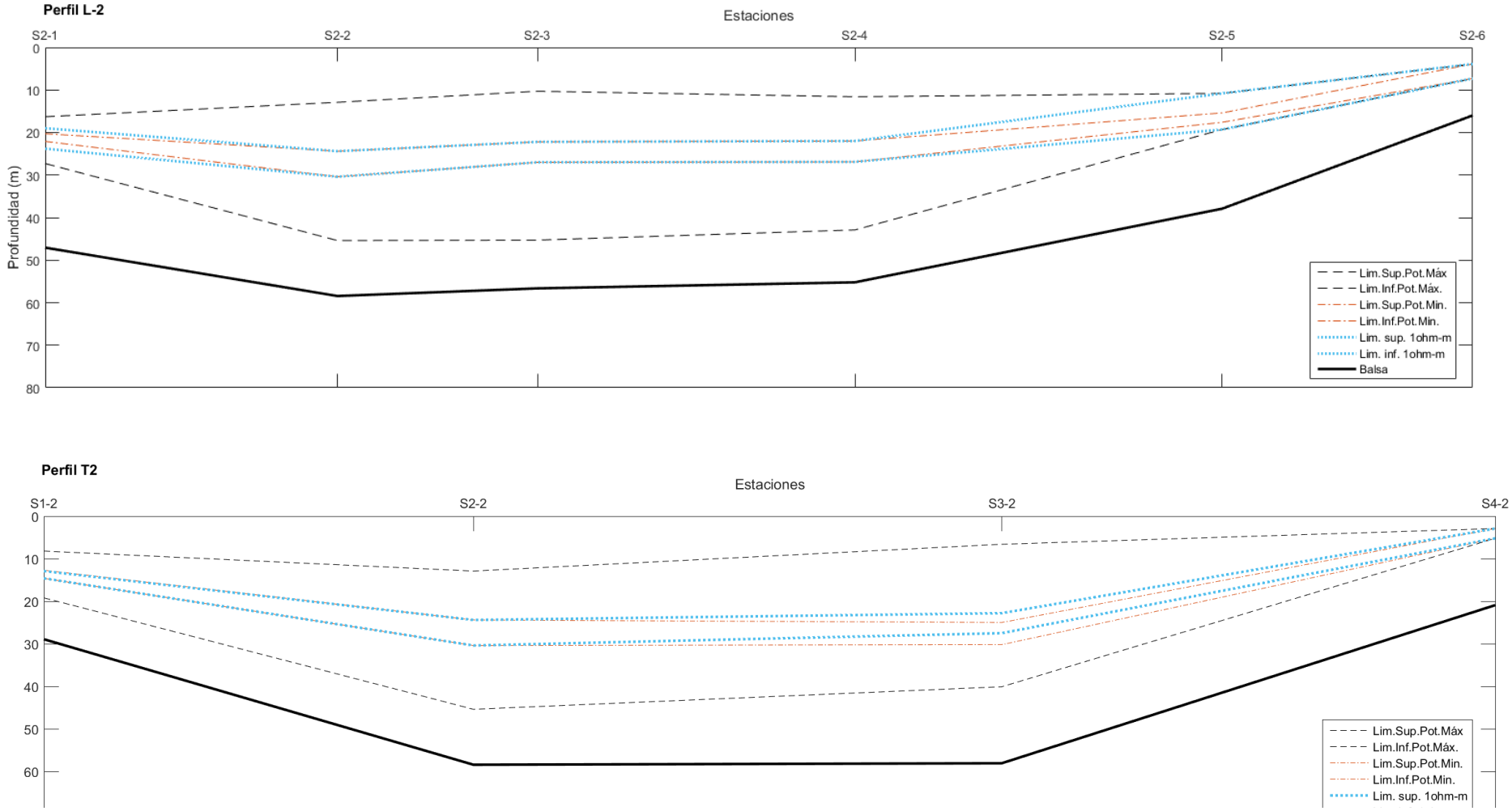


Fig. 8.16 Perfil longitudinal L2 (superior) y T2 (inferior) en el que se delimitan los posibles niveles saturados de lodos en función de la resistividad y el espesor de los modelos. En trazo azul, tomando como referencia la conductividad del total de los drenajes se representa el modelo obtenido incorporando un nivel conductivo de 1 Ω-m. En trazo discontinuo negro el modelo de mayor potencia posible. En naranja el nivel de mínima potencia. En trazo negro continuo la superficie de la balsa original.

9
Análisis comparativo de varios SEDT en materiales con diferentes propiedades físicas

9.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan seis sondeos SEDT realizados en diferentes localizaciones con variación en las características geológicas con el objetivo de definir la fiabilidad y la capacidad del método en la resolución de problemas de tipo medioambiental o geotécnico que afectan a zonas poco profundas. Se utilizaron transmisores y receptores de 25x25 m que según estimaciones groseras alcanzarían una profundidad de exploración de 75 m ya que la utilización de transmisores de pequeño tamaño resulta efectivo con un alcance aproximadamente tres veces el tamaño del lazo (Sørensen et al., 2005).

El empleo de esta técnica se debe a que responde con mayor precisión y fiabilidad para la detección de objetivos conductores, a diferencia de otras técnicas que son capaces de detectar variaciones en materiales resistivos como los métodos eléctricos convencionales de corriente directa. (Fitterman and Stewart, 1986)

Se analizan los resultados de seis sondeos en conjunto con el objeto de definir problemas que surgen tanto en la toma de datos como en la interpretación final. Mientras que el capítulo anterior se centró la discusión en el problema de la no unicidad, en este caso se plantean otros problemas que han surgido en algunos de los SEDT.

La presentación de los datos no se limita a mostrar el resultado de los modelos numéricos, sino que se presentan las curvas de decaimiento en bruto y todo el procesado hasta conseguir una interpretación final. Se ha considerado así ya que en muchas de las publicaciones e informes consultados se omiten este tipo de análisis lo que impide analizar la fiabilidad de los datos y hace difícil entender todo el proceso que conlleva la modelización.

De igual forma que en el capítulo anterior, se incorpora a la interpretación toda la información conocida sobre la zona de estudio proveniente de cartografía geológica, sondeos geotécnicos y otras fuentes.

9.2 ADQUISICIÓN DE LOS SEDT

Los SEDT analizados forman parte de un conjunto de varios sondeos realizados en el marco de diferentes proyectos cuyos objetivos de investigación diferían unos de otros (ver apartado 3.1)

El dispositivo utilizado (Fig. 9.1) fue de lazo coincidente de 25 m de lado, dispositivo recomendado para tamaños de lazo menores de 50 m con el que se consigue una alta productividad y es poco sensible al ruido (Monex Geoscope, 2009). Los lazos Tx y Rx se dispusieron separados entre sí un metro de distancia para evitar efectos de ruido entre ellos (Buselli, 1985).

Las indicaciones del equipo no permiten una resistencia menor de 2 ohm-m en el cable transmisor por lo que fue necesario incorporar una resistencia en serie al lazo, en este caso de 4,7 ohmios, dando una corriente de aproximadamente 3,5 Amperios y tiempos de apagado de aproximadamente 20 μs.

En el Anexo I se incluyen los parámetros de cada uno de los sondeos. Se hicieron varias pruebas variando la ganancia para determinar la configuración idónea y una medición de ruido en cada una de las localizaciones.

Esta configuración ha resultado ser la más efectiva para la realización de SEDT en zonas con topografía abrupta en algunos casos y parcelas de pequeño tamaño que no permitían realizar lazos mayores. Con esta

configuración la profundidad de investigación estimada es de aproximadamente 75 m suficiente para los objetivos de la investigación planteados.

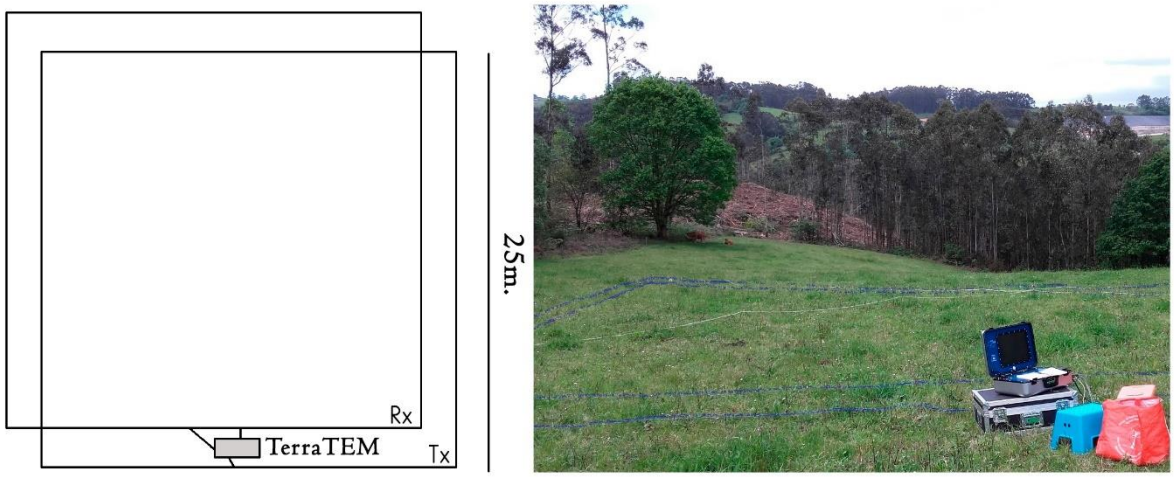


Fig. 9.1 A la izquierda esquema del dispositivo utilizado con el lazo Tx y Rx separados entre sí. A la derecha, fotografía de una de las áreas de estudio con una reconstrucción del dispositivo resaltando los lazos Tx y Rx.

9.3 DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA A-PRIORI

La información complementaria a la geofísica se ha obtenido mediante revisión cartográfica, sondeos geotécnicos próximos a la localización de los SEDT y a la información aportada por otras técnicas geofísicas.

La recopilación de toda esta información permite realizar una columna estratigráfica esquemática (Fig. 9.2) para cada uno de los sondeos definiendo las incertidumbres en cada uno de ellos que se pretenden resolver con la aplicación de la técnica geofísica SEDT. Estas columnas sirven como modelo de partida para analizar los datos geofísicos y analizar las diferencias en la respuesta obtenida. A continuación, se describe la geología sobre las que se hicieron los SEDT, con la nomenclatura utilizada en este capítulo, junto al nombre de los sondeos originales indicados en la Fig. 3.1 del apartado 3 y las coordenadas UTM.

- ***SEDT S1*** *(COG5) (X 272962.4; Y 4818714.7):* Se realizó al W del vertedero de R.S.U gestionado por COGERSA. Forma parte de un conjunto de SEDT realizados en el entorno del vertedero central de Asturias cuya finalidad fue caracterizar la sucesión Jurásica-Cretácica aflorante en esta zona. El modelo se realiza a partir de los datos obtenidos por un sondeo geotécnico que se realizó en el año 2001, próximo a la localización del SEDT (Fig. 3.5).

En la parte superior se definen 40 m de conglomerados y arenas correspondientes, según los últimos estudios, a la formación Pola de Siero del Cretácico Inferior (Aptiense Superior-Albiense). A muro, unas lutitas con intercalaciones de areniscas calcáreas pertenecientes a las facies Purbeck del Jurásico Superior de la formación Vega. En la testificación del sondeo se indican el nivel freático a una profundidad de 16 m.

- ***SEDT S2*** *(COG3)* (X *270771.9; Y 4818868.5):* Se realizó al SW del vertedero de R.S.U. La columna modelo se realizó a partir de la información aportada por el mapa geológico continuo GEODE (Merino-Tomé et al., n.d.). En el techo de la columna se definen conglomerados de la formación Ñora (Dogger-Jurásico Medio) y a muro a cota desconocida calizas de la formación Gijón (Lias-Jurásico Inferior) (Fig. 3.5).

- ***SEDT S3*** *(SOL7-Stn1)* (X 292548.2; Y 4805139.6) y ***SEDT S4*** *(SOL7-Stn6)* (X 291838.2; Y 4804804.3): Forman parte de un conjunto de SEDT realizados en el marco del proyecto "*GEOCANTÁBRICA: Procesos modeladores de la Cordillera Cantábrica"*, en el que se realizaron varios perfiles transversales al trazado de la falla de Ventaniella descrita en la cartografía geológica actual. Los sondeo S3 y S4 corresponde al perfil realizado en las proximidades de la localidad de El Solanu en el concejo de Nava (Asturias). En esta localidad, la falla de Ventaniella pone en contacto materiales permotriásicos sobre los que se realizó el SEDT S3 con

materiales de la sucesión cretácica (Formación Ullaga y Pola de Siero) sobre la última se realizó el SEDT S4. La sucesión permotriásica está caracterizada por materiales con arcillas y areniscas rojas con niveles de yesos y la formación Pola de Siero se compone de conglomerados y arenas.

- ***SEDT S5*** *(BOINAS25_S3-3) (X 718028; Y 4795898):* Este sondeo forma parte de los ensayos previos realizados para el proyecto "*Estudio hidrogeofísico: Balsa de lodos de la mina de oro Valle-Boinás"*. De forma complementaria al estudio geofísico, como se indica en el capítulo 8, se realizó una revisión del proceso constructivo de la balsa lo que permitió realizar una reconstrucción geométrica y generar un modelo de partida muy preciso situando la base de la misma a 50 m de profundidad (Fig. 3.3).

- SEDT S6 *(PER18) (X 278202.1; Y 4829264.1):* Este sondeo forma parte de un conjunto de SEDT realizados próximos a la línea de costa en la zona de Perlora, concejo de Carreño, Asturias. La geología de interés para el estudio se limita a un espesor como mínimo de 200 m de caliza micrítica tableada (Formación Barcaliente) que forma parte del núcleo de una estructura sinclinal (Fig. 3.6). El SEDT se realizó a menos de 30 m de la línea de costa a 25 m de altura por lo que cabe la posibilidad de reconocer un nivel afectado por aguas salobres.

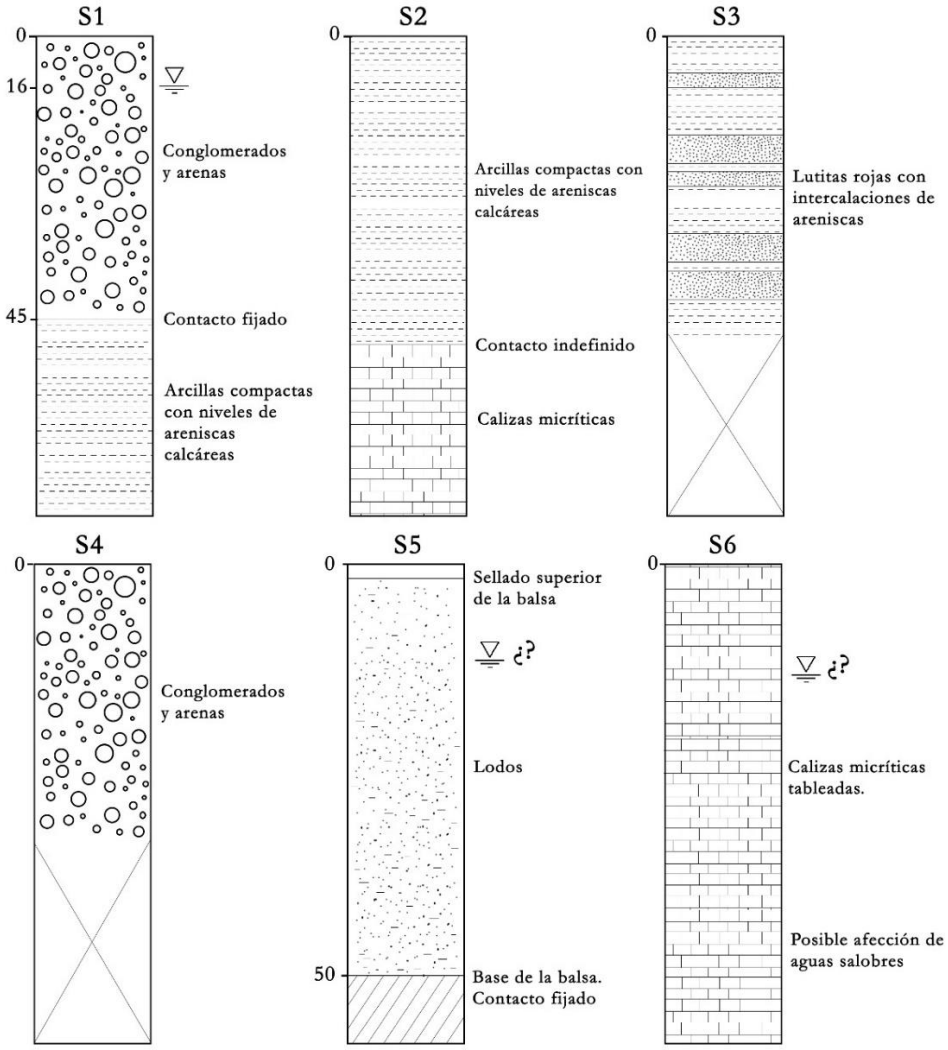


Fig. 9.2 Columnas estratigráficas sintéticas descriptivas de cada uno de los sondeos con las profundidades de contactos delimitados a-priori.

9.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS

El equipo *terraTEM®* es capaz de registrar datos de alta resolución que revelan por sí mismos características en la conductividad del terreno. Si se analiza cualquier curva SEDT en bruto, por ejemplo, las de la Fig. 9.3, se observan determinados factores característicos del método que se consideran importantes para una mejor comprensión en el procesado previo a la modelización. En este apartado se hace especial atención a este tipo de análisis debido al componente metodológico del trabajo ya que, durante la ejecución de la campaña geofísica, permitió desestimar registros SEDT anómalos debidos a fuentes de ruido, malas conexiones en el equipo, etc.

Por otro lado, se examinan los datos a partir de la trasformación de *Spiker* que aporta una primera aproximación de la distribución de resistividades en el terreno que será comparada con la obtenida en los modelos de simulación.

9.4.1 Análisis de las curvas de decaimiento

La curva de decaimiento es la representación fundamental de las características del terreno en un lugar concreto que, a pesar de no proporcionar una interpretación geológica directa, permite hacer un análisis de los datos y ver si factores externos pueden estar afectando al registro del SEDT. Como ya se describió en el apartado 4 a través de la Fig. 4.3, la curva SEDT teórica se divide en tres tramos diferenciados por el comportamiento de la respuesta electromagnética.

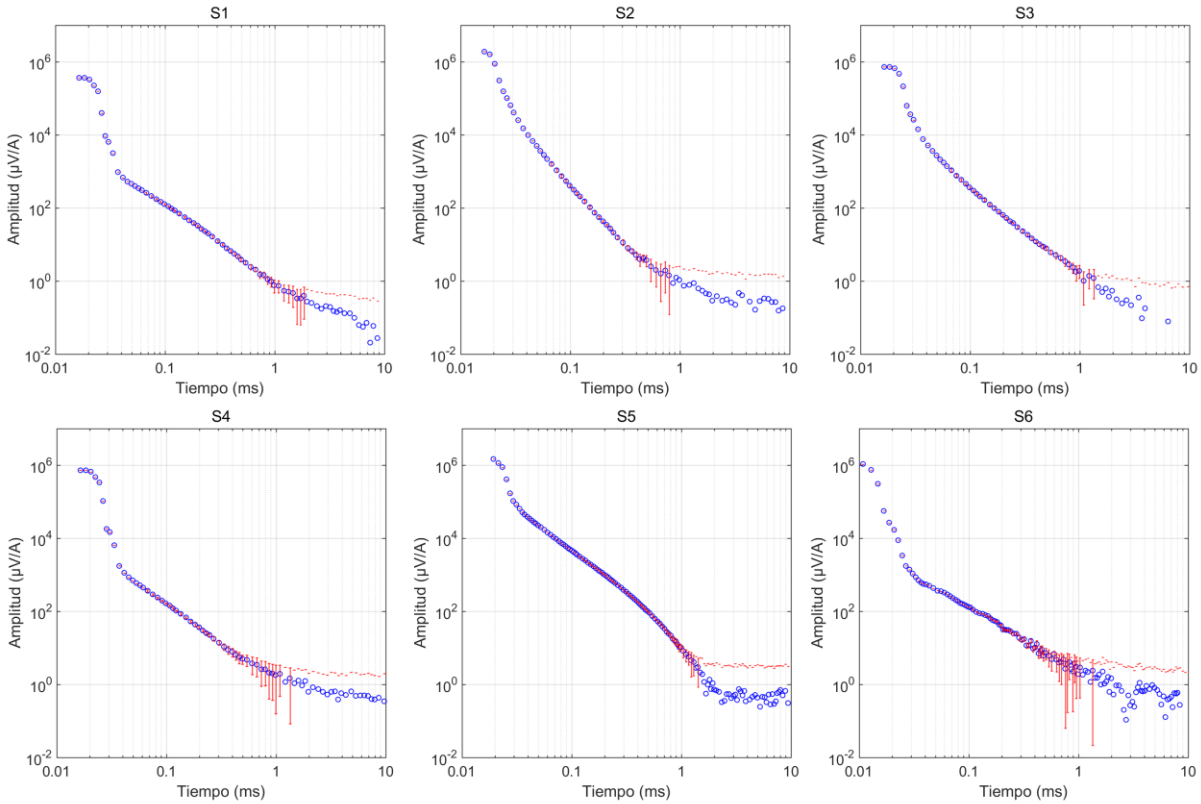


Fig. 9.3 Curvas de decaimiento en escala logarítmica de la amplitud en μV/Amp frente a tiempo en ms obtenidas en cada uno de los sondeos sobre las que se representa las barras de error en trazo rojo que en caso de tener valores negativos solamente se representa la parte positiva de esta. Nótese la limitación de los datos por debajo de 1 μV/A donde aparece la señal aparece influenciada por el nivel de ruido.

Observando la Fig. 9.3, en la que se representan las curvas de decaimiento y sobre ellas las barras de error, (en trazo rojo), en líneas generales, se observan dos tendencias en las curvas claramente definidas: un primer tramo que abarca un corto periodo de tiempo de 0,03 ms aproximadamente con amplitudes altas y un segundo tramo que abarca hasta 1 ms aproximadamente. A tiempos posteriores los datos se ven afectados

por ruido con valores dispersos de amplitud. En el caso de los SEDT S1, S3 y S5 se obtienen datos por encima de 1 ms, mientras que en los demás sondeos se ven afectados por ruido a tiempos más tempranos.

Otra de las diferencias observables en los SEDT es el tiempo que abarca el primer tramo de la curva. Los SEDT S2 y S5 muestran una clara diferencia con el resto de sondeos donde la tasa de decaimiento del campo magnético es más lenta. Esto parece indicar una mayor conductividad en el nivel más superficial provocando un amortiguamiento en la respuesta electromagnética. La información aportada con las curvas se verá reforzada con la interpretación final de los datos.

A continuación, se describe un segundo análisis donde se ajusta cada uno de los tramos a una recta de forma que permita analizar la tasa de decaimiento en cada uno de ellos y delimitar los distintos tramos de la curva que serán utilizados en la fase de modelización.

Como se explicó en el apartado 4, la ecuación (6) para el tramo final de la curva, en el supuesto de un modelo homogéneo la corriente en el receptor decae a una tasa de $t^{-5/2}$. Cualquier desviación de esta tendencia se presume que es consecuencia de una geología compleja que genera corrientes adicionales y hacen que las curvas obtenidas no se ajusten a los planteamientos teóricos. Este tipo de ajuste permite hacer una valoración de los datos y ver cuáles son las posibles causas que generan estas anomalías.

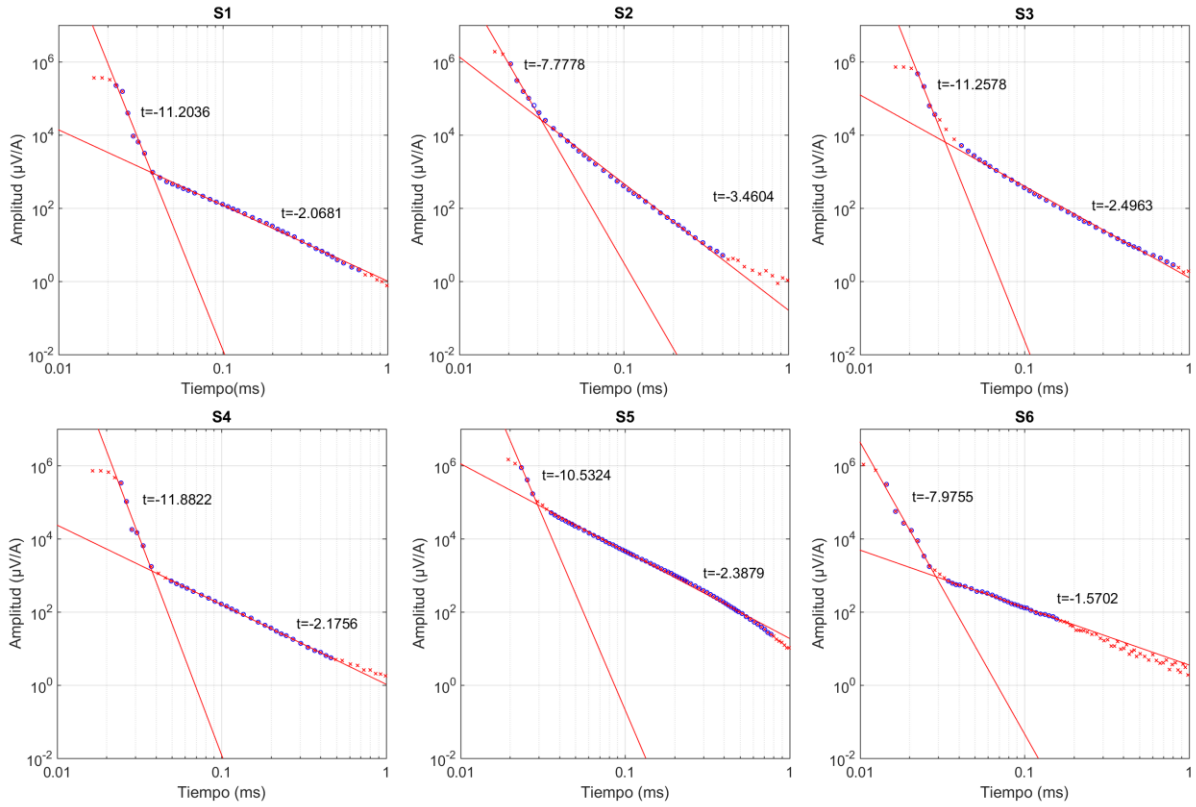


Fig. 9.4 Ajustes de las curvas de decaimiento en escala logarítmica eliminando el tramo considerando ruido. El tramo de interés para lo modelización posterior es el que se ajusta a un decaimiento de aproximadamente $t^{-5/2}$.

La Fig. 9.4 representa los ajustes obtenidos en los 6 SEDT para los tramos definidos según la Fig. 4.3 como tramo intermedio y final. La resistividad elevada del nivel más superficial hace que las curvas obtenidas contrasten significativamente con la curva teórica. Con lo que se deduce que este tipo de dispositivo no permite resolver las zonas superficiales cuando la resistividad es elevada. A partir de estos ajustes, se observa como los SEDT S1, S3, S4 y S5 se desvían ligeramente del decaimiento teórico. En el caso del S2 presenta $t^{-3.46}$ que dista ligeramente de $t^{-5/2}$ como consecuencia, probablemente, de corrientes adicionales en el terreno. El SEDT S6 muestra un decaimiento anómalo comparado con la respuesta de los demás sondeos, debido posiblemente, a la alta resistividad del material estudiado.

A partir de estos ajustes y teniendo en cuenta que la expresión de resistividad aparente es válida para el tramo final (*late stage*), se toman solamente esos valores para el proceso de modelización que se presenta en el apartado 9.5.

9.4.2 Obtención de pseudoperfiles

Para analizar las curvas en términos de resistividad, se procesaron los datos con el algoritmo de conductividades aparentes de *Spiker* (Smith et al., 1994), explicado en el apartado 8.4.1, que a pesar de no ser un método de modelización en sentido estricto, resulta efectivo para hacer la conversión de las curvas de voltaje/tiempo en conductividades aparentes en función de la profundidad. Las curvas fueron procesadas evitando picos con contrastes altos de conductividad. Este procesado en formato nativo en el *software TEMPlot* convierte los datos en unidades de conductividad, mS/cm. Con el fin de homogeneizar las unidades en todo el trabajo se representan estos datos en unidades de resistividad ohm-m. Este tipo de transformación aporta una primera aproximación a la distribución de resistividades en el perfil geoeléctrico y se utiliza como modelo entrada para los modelización y obtención de resistividades reales.

Los datos son representados como perfiles 1D en escala de color mostrando los contrastes de resistividad en el terreno (Fig. 9.5). Nótese en la figura la diferencia en la escala de color en cada uno de los sondeos con el fin de obtener mayor contraste en la distribución de resistividades. También destacar la incapacidad del dispositivo utilizado en caracterizar las zonas más someras que varía según la resistividad de este nivel por lo que los pseudoperfiles no comienzan a cota 0.

Este tipo de representación permite observar algunas características que se ajustan a las hipótesis planteadas a partir de las curvas representadas en la Fig. 9.4. Se observó en las curvas de los SEDT S1, S4 y S6 un tramo inicial muy pronunciado que como se observa en la transformación de *Spiker* corresponde con materiales de resistividad elevada. Según la información a priori de la que se dispone, en el caso de los SEDT S1 y S4, los materiales pertenecen a conglomerados de la formación Pola de Siero y el S6 con calizas mícritas de la formación Barcaliente, con resistividades, a-priori, elevadas.

Destaca también del S5 la baja resistividad entre los 15-50 m de profundidad. Es de suponer debido a la baja consolidación de los lodos almacenados en el interior de la balsa en la que se realizó el SEDT. Respecto al SEDT S2 se define un nivel conductivo superior asentado sobre un nivel más resistivo lo que hace pensar que la desviación en la tasa de decaimiento de $t^{-3.46}$ sea consecuencia del nivel conductivo que genera corrientes adicionales. En el caso del S3, los valores de resistividad obtenidos en torno a 30 **Ω**-m en la parte superior son consistentes con la litología de la zona de estudio con alto contenido en arcillas.

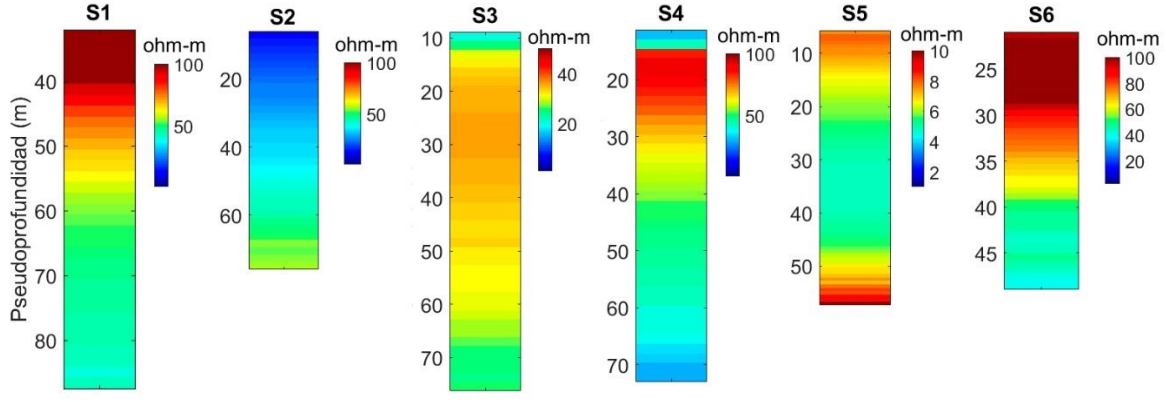


Fig. 9.5 Perfiles geoeléctricos obtenidos con la transformación de *spiker* en cada uno de los sondeos. Nótese la diferencia en la escala de color en cada uno de ellos. La diferencia en la profundidad de inicio se debe a la eliminación de las primeras ventanas de tiempo después del apagado.

9.5 INTERPRETACIÓN DE LOS SEDT

Como se comentó en el apartado de procesado de los datos, la interpretación de los sondeos a través de un proceso de modelización e inversión no permite utilizar la curva en bruto obtenida en campo. Los códigos de simulación son válidos para modelizar el tramo final de la curva por lo que es necesario eliminar el primer tramo y los canales de muestreo finales afectados por ruido. Para cada sondeo se presenta la curva de resistividad aparente obtenida a partir de la curva de decaimiento y se indica el rango temporal utilizado para la interpretación.

En todos los casos se utilizó el modelo más simple, de forma que el desajuste obtenido fuese con un RMS menor de un 4%. En general, a excepción del SEDT S6 todos los sondeos se ajustan a modelos de 3 capas.

No es objeto en este capítulo, redefinir el problema de los modelos equivalentes, analizado en el capítulo anterior, sin embargo, en la interpretación de los resultados se verá como es un fenómeno recurrente y por tanto los valores obtenidos en los modelos, varían en un rango determinado de resistividad y espesor como consecuencia de este fenómeno. En el anexo IV se incluyen los ajustes de todos los sondeos, en rojo el modelo inicial obtenido, y con trazo negro sus modelos equivalentes.

A continuación, se describe la interpretación de cada uno de los sondeos con las singularidades de cada uno de ellos.

SEDT S1

Para la modelización del sondeo SEDT1 se utilizaron los datos en los canales de tiempo comprendidos entre 0,0495 ms-0,400 ms (Fig. 9.6). La Fig. 9.6 representa la interpretación realizada para el sondeo, que permite definir un nivel superior resistivo con un rango de resistividades de 200-400 **Ω**-m y un espesor de 10-20 m que se ajusta a un nivel rocoso no saturado. A una profundidad de 10-20 m se identifica un posible nivel piezométrico, con una disminución en la resistividad de los materiales, que coincide con el definido a partir de un sondeo geotécnico realizado contiguo al SEDT a una profundidad de 16m.

A partir de esta profundidad la resistividad de los materiales decae a un valor de 100-150 **Ω**-m. cómo es de esperar por el contenido en agua de la formación. El contacto con las arcillas, interpretado a partir del sondeo geotécnico y fijado en los modelos en el rango de 40-50 m permite establecer un valor de resistividad para estas de 25 **Ω**-m, valor que se ajusta a los valores esperados de unas arcillas saturadas en agua no salobre.

El ajuste de los modelos con un RMS menor del 4% permite dar cierto grado de fiabilidad a los modelos obtenidos.

Como se observa en la Fig. 9.5, la transformación de *Spiker* se ajusta en buen grado a la interpretación obtenida a partir de los modelos. La Fig. 9.6 muestra la interpretación para el SEDT S1 con la columna tipo, en este caso obtenida a partir de la testificación del sondeo geotécnico contiguo. En el anexo IV se presentan los modelos equivalentes de este SEDT.

En la Tabla 9.1 se resumen los parámetros del modelo obtenido para el SEDT S1.

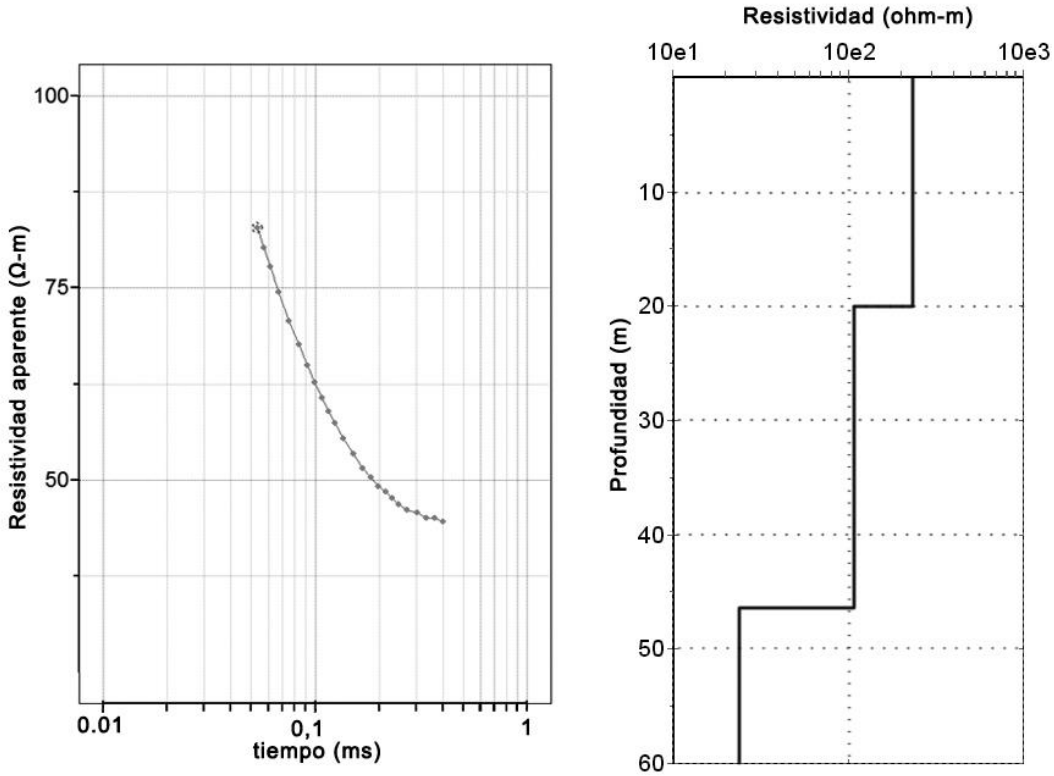


Fig. 9.6 Interpretación del SEDT S1 a partir de la resistividad aparente en el tiempo 0,0495 ms-0,400 ms (izqda.). En la imagen derecha, modelo de ajuste obtenido. Véase Anexo IVa con los modelos equivalentes.

Tabla 9.1 Parámetros obtenidos en el SEDT S1 y litologías asociadas

SEDT S1			
Nivel	**Espesor (m)**	**Res. (Ω-m)**	**Litología a-priori**
1	10-20	200-400	Conglomerados (nivel no saturado)
2	43-48	100-150	Conglomerados (nivel saturado)
3		25	Arcillas

SEDT S2

En la modelización del sondeo SEDT S2 se utilizaron los datos en los canales de tiempo comprendidos entre 0,0265 ms-0,336 ms (Fig. 9.7). En los datos analizados en el apartado 9.4.1 se observó un decaimiento más atenuado en los primeros canales de tiempo, que se reflejó con una mayor amplitud del voltaje recibido, que hace pensar que los materiales en superficie son más conductivos. La cartografía geológica de la zona y la toma de datos permiten definir un nivel arcilloso sobre materiales calcáreos de la formación Gijón a cierta profundidad, sin estar delimitado este contacto.

Los modelos obtenidos en este SEDT permiten definir un nivel con un valor de resistividad de 25 **Ω**-m en la parte superior y un contacto bien definido a una profundidad de 20 m aproximadamente. Este contacto separa un nivel de baja resistividad de un nivel inferior con valores de resistividad de 200-400 **Ω**-m con espesor que varía en el rango de 20-50 m.

La profundidad obtenida para el nivel resistivo está condicionada por el fenómeno de no unicidad, que supone un rango de variación según los valores de resistividad asignadas al nivel intermedio. A partir de estos datos es posible concluir que existe el nivel de calizas que comienza a 20 m de profundidad y que a aproximadamente 60 m se encuentra un nivel menos resistivo debido a condiciones de saturación o mayor fracturación. En la Tabla 9.2 se resumen los parámetros del sondeo S2.

La transformación de *Spiker*, en este caso, define un nivel superior conductivo que se ajusta a los obtenidos en los modelos. Sin embargo, no muestra el cambio brusco a valores más altos de resistividad a 20 m de profundidad como se interpreta en los modelos. Sin más información disponible, es posible que otros modelos permitan otros ajustes de los obtenidos en este trabajo que se deberían de analizar con más profundidad.

En la Tabla 9.2 se resumen los parámetros del modelo obtenido para el SEDT S2

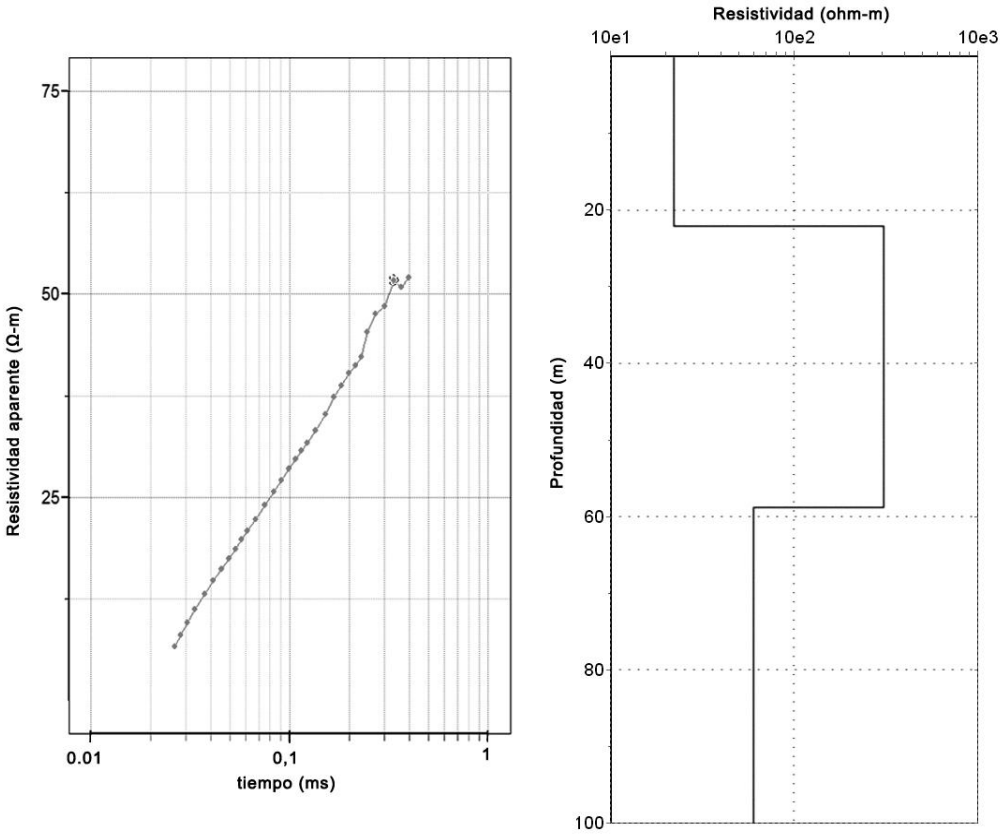


Fig. 9.7 Interpretación del SEDT S2 a partir de la curva de resistividad aparente en el tiempo 0,0265 ms-0,336 ms (izquierda). En la imagen derecha, modelo de ajuste obtenido. Véase Anexo IVb con los modelos equivalentes.

Tabla 9.2 Parámetros obtenidos en el SEDT S2 y litologías asociadas

SEDT S2			
Nivel	**Espesor (m)**	**Res. (Ω-m)**	**Litología a-priori**
1	22	25	Arcillas (Facies Purbeck) ??
2	20-50	200-400	Calizas Fm. Gijón
3		50-80	??????

SEDT S3

En la modelización del sondeo SEDT S3 se utilizaron los datos en los canales de tiempo comprendidos entre 0,0375 ms-0,0672 ms (Fig. 9.8). Este sondeo se ejecutó sobre materiales del Pérmico que se caracterizan por presentar niveles arcillosos intercalados entre niveles arenosos compactos previsiblemente con valores bajos de resistividad.

Los modelos obtenidos permiten definir un nivel de 50 m de espesor con un valor de resistividad de 40 **Ω**-m para los materiales permotriásicos. Este valor coincide con el obtenido en el informe del ITGE, (1994) en el reconocimiento con sondeos SEDT en los acantilados próximos a Tazones, en los que describen los materiales permotriásicos con valores de 50 **Ω**-m .

A una profundidad de 50 m, con un valor ligeramente menor de resistividad, el modelo permite identificar un nivel que puede ser debido a mayor contenido en agua o mayor contenido en arcilla Para conseguir un ajuste óptimo en los modelos, ha sido necesario incorporar un nivel superior conductivo de pocos metros en la parte superior, aun teniendo en cuenta las limitaciones del método en el reconocimiento más superficial. Es posible que este nivel se trate únicamente de un simple artefacto necesario para ajustar los datos observados.

Este sondeo junto con el SEDT S4 se realizó en el marco del proyecto Geocantábrica con la finalidad de caracterizar el trazado de la falla de Ventaniella. Si se comparan las dos curvas obtenidas en campo, se observa una diferencia clara en la tasa de decaimiento de ambas curvas. A partir de los modelos se interpreta esta variación en la resistividad de los materiales a un lado y otro de la falla.

En este SEDT, la transformación de *Spiker*, coincide con un buen grado de ajuste a los valores obtenidos en el modelo que se describe en la Fig. 9.8.

En la Tabla 9.3 se resumen los parámetros del modelo obtenido para el SEDT S3

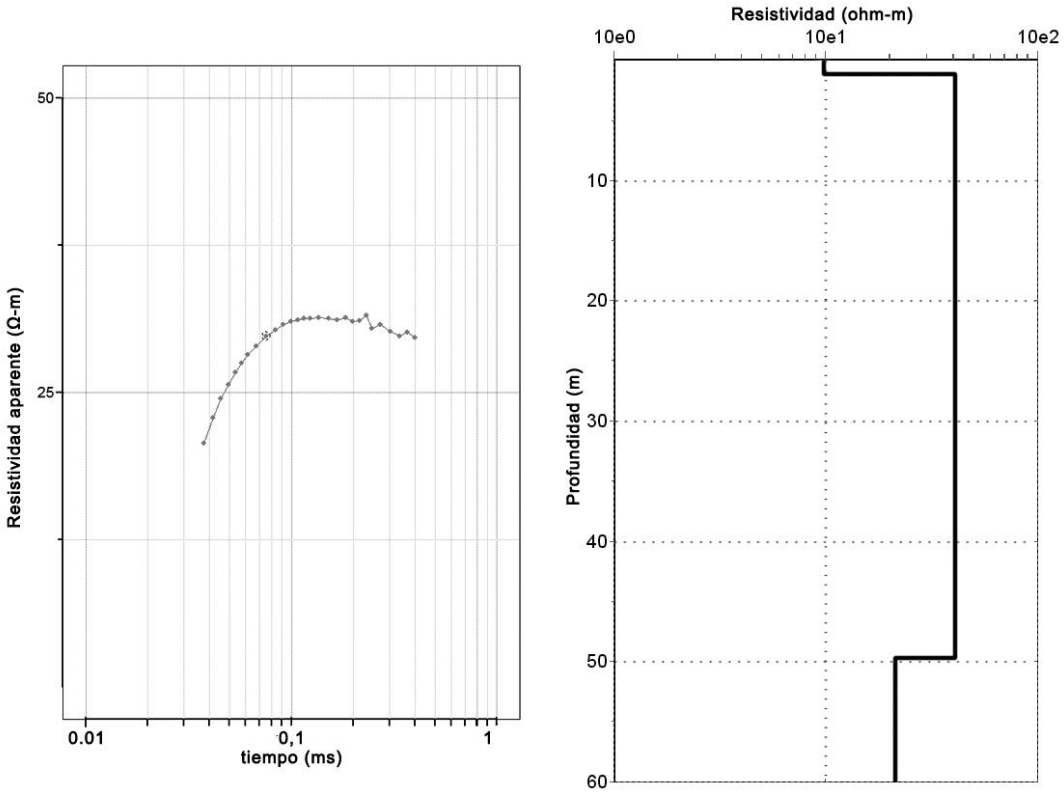


Fig. 9.8 Interpretación del SEDT S3 a partir de la curva de resistividad aparente en el tiempo 0,0375 ms-0,0672 ms (izqda.). En la imagen derecha, modelo de ajuste obtenido. Véase el Anexo IVc con los modelos equivalentes.

Tabla 9.3 Parámetros obtenidos en el SEDT S3 y litologías asociadas

SEDT S3			
Nivel	**Espesor (m)**	**Res. (Ω-m)**	**Litología a-priori**
1	3	10	Permotriásico
2	45-55	40	Permotriásico
3		20	??????

SEDT S4

En la modelización del sondeo SEDT S4 se utilizaron los datos en los canales de tiempo comprendidos entre 0,0455 ms-0,400 ms (Fig. 9.9). Según la cartografía geológica (Merino-Tomé et al., n.d.) se realizó sobre materiales cretácicos de la formación conglomerática Pola de Siero. En los modelos obtenidos en el SEDT S1, con un nivel superficial de 45 m de conglomerados de esta misma formación, los valores de resistividad obtenidos fueron de 200-400 **Ω**-m. A partir de esta información, se fija un rango de resistividades entre 100-600 **Ω**-m obteniendo un modelo con un nivel superior de 100-200 **Ω**-m. El espesor resultante de este nivel resistivo es entre 30-35 m.

Bajo este nivel, a una profundidad de 30 m, se interpreta un nivel de resistividad menor con un rango de 40-70 **Ω**-m y un espesor de 10 m. Para conseguir un buen ajuste de los datos, es necesario incorporar un nivel inferior con un valor de resistividad de 20 **Ω**-m. Sin más datos de los disponibles, es posible interpretar los contrastes de resistividad como una zona con mayor contenido en agua o, a partir de los datos geológicos, un contacto con los materiales del carbonífero discordante. Como se observa en la Fig. 9.5, el procesado de *Spiker* para el SEDT S4 es representativo del modelo obtenido, con un contraste de resistividad a una profundidad de 40 m.

Este sondeo, junto con el SEDT S3, forma parte del conjunto de sondeos realizados, de forma transversal a la falla de Ventaniella. A partir de los modelos, se observa un cambio lateral en los valores de resistividad que permite identificar un contacto de falla.

En la Tabla 9.4 se resumen los parámetros del modelo obtenido para el SEDT S4.

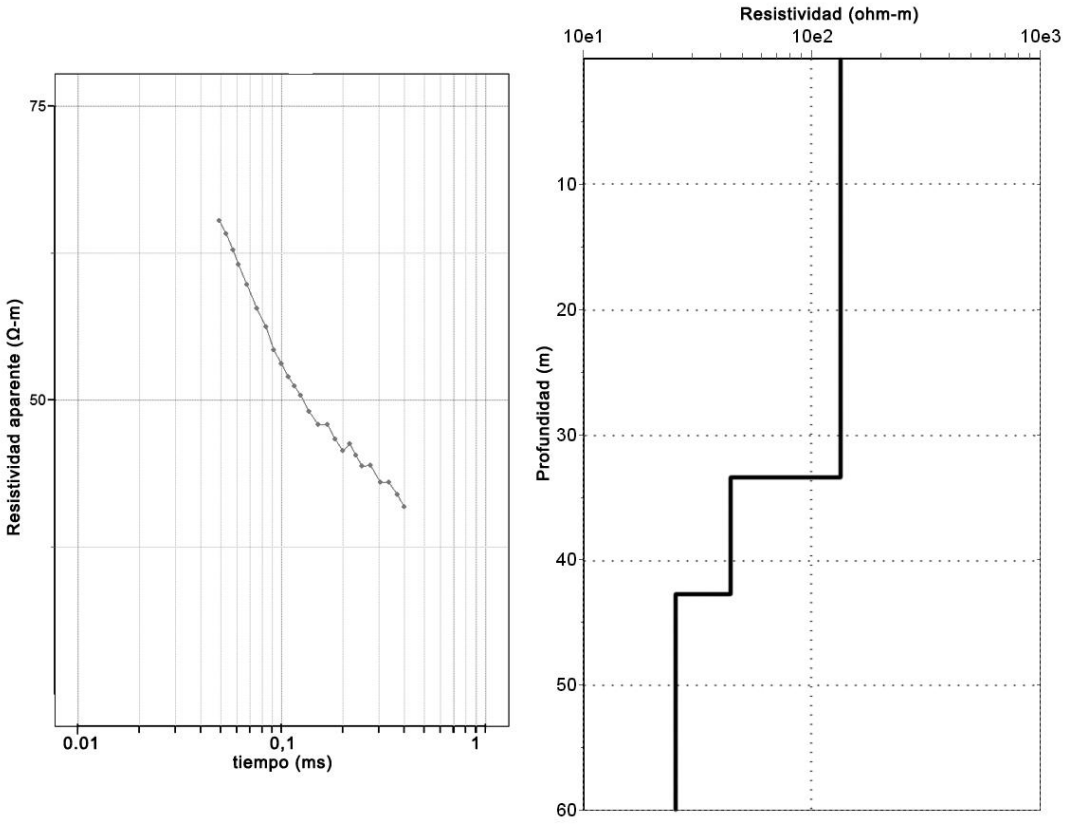


Fig. 9.9 Interpretación del SEDT S4 a partir de la curva de resistividad aparente en el tiempo 0,0455 ms-0,4 ms (izqda.). En la imagen derecha, modelo de ajuste obtenido. Véase el Anexo IVd con los modelos equivalentes.

Tabla 9.4 Parámetros obtenidos en el SEDT S4 y litologías asociadas

SEDT S4			
Nivel	**Espesor (m)**	**Res. (Ω-m)**	**Litología**
1	30-35	100-200	Conglomerados
2	10	30-60	Conglomerados saturados
3		20	Carbonífero ???

SEDT S5

En la modelización del sondeo SEDT S5 se utilizaron los datos en los canales de tiempo comprendidos entre 0,0295 ms-0,899 ms (Fig. 9.10). Un primer modelo obtenido para este sondeo parte trató de incorporar la información sobre la profundidad a la que se encuentra el sellado inferior de la balsa asentada sobre materiales de relleno previsiblemente con valores de resistividad elevados que ha sido definida a 50 m de profundidad. Los errores obtenidos, 8.1%, son superiores a lo estimado como aceptable por lo que se intentó ajustar esta cota a una profundidad menor. En el anexo IVf se adjunta el resultado de este modelo.

Teniendo en cuenta los resultados del primer modelo, se modificó la profundidad a la que se encuentra este nivel, reduciéndose el error obtenido a un 2,3% lo que se considera dentro de los límites aceptables. Los resultados muestran un nivel superior de 5-12 m con un valor entre 10-50 Ω-m que correspondería con el nivel superior de recubrimiento y un nivel no saturado. El segundo nivel de 35-40 m de espesor presenta valores de resistividad de 4 Ω-m, aceptables para unos lodos de mina saturados (Kuranchie et al., 2015). A una profundidad de 40 m aproximadamente se delimita un nivel resistivo que dista 10 m de la base de la balsa estimada, que se interpreta, como se comentó en el capítulo 8, a una compactación de los lodos en el fondo de la balsa. La transformación de *Spiker*, es también, en este caso, muy representativa.

En la Tabla 9.5 se resumen los parámetros del modelo obtenido para el SEDT S5

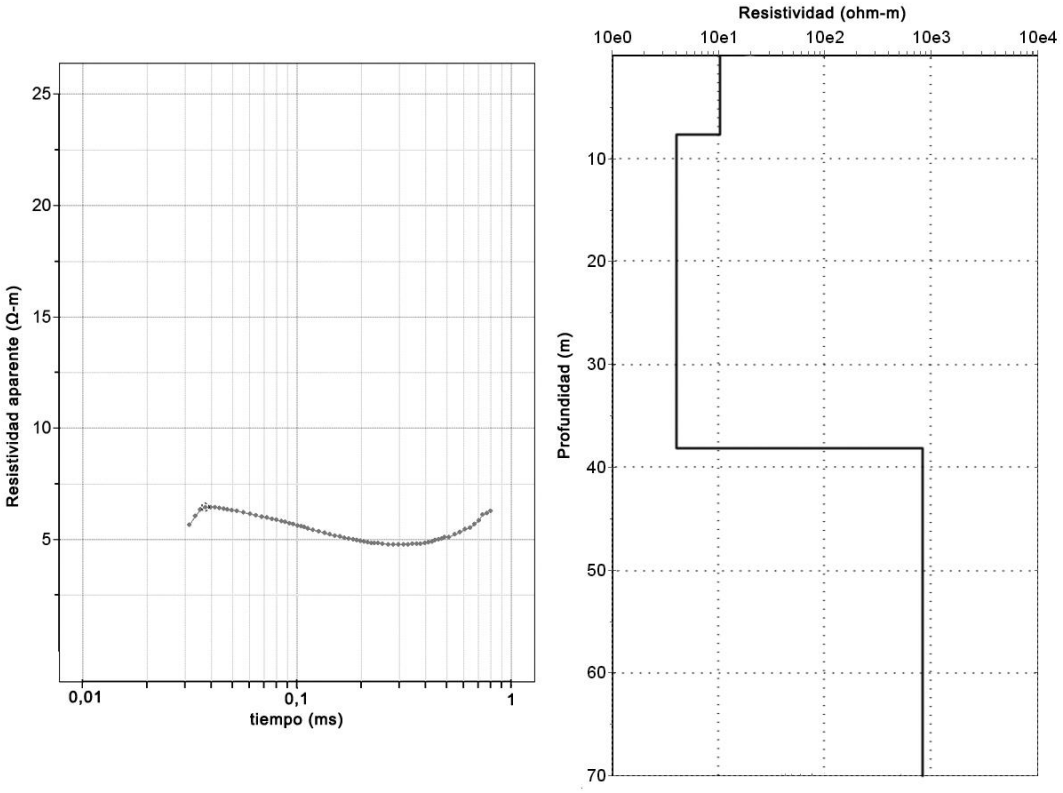


Fig. 9.10 Interpretación del SEDT S5 a partir de la curva de resistividad aparente en el tiempo 0,0295 ms-0,899 ms (izqda.). En la imagen derecha, modelo de ajuste obtenido. Véase el Anexo IVe con los modelos equivalentes.

Tabla 9.5 Parámetros obtenidos en el SEDT S5 y materiales asociados

SEDT S5			
Nivel	**Espesor (m)**	**Res. (Ω-m)**	**Litología**
1	5-12	10-50	Arcillas de recubrimiento
2	35-40	4	Lodos
3		>100	Escombrera

SEDT S6

En la modelización del sondeo SEDT S6 se utilizaron los datos en los canales de tiempo comprendidos entre 0,0369 ms-0,306 ms (Fig. 9.11). En este caso un modelo de dos capas ha sido suficiente para conseguir un buen ajuste. A partir de los datos de partida, son esperables, valores muy altos de resistividad para las calizas. En este caso el valor obtenido es de 600-1000 Ω-m que pasa a un nivel relativamente conductivo de 20 Ω-m a 40m de profundidad. En este caso, como se observa en el análisis de decaimiento de las curvas de la Fig. 9.4, se aleja ligeramente del comportamiento teórico. Lo que hace suponer que debido a los materiales con resistividades tan altas el método no responde de forma adecuada.

De todas formas, analizando el modelo con el algoritmo de *Spiker* (Fig. 9.5), se observa una variación en los valores de resistividad a una profundidad de 40 m, por lo que parece posible delimitar un contacto que pueda ser debido a un nivel saturado e incluso afectado por aguas salinas.

Goldman and Kafri, (2004) utilizaron el método SEDT en la detección de intrusión salina en Israel, describiendo modelos de intrusión con valores de resistividad de 10 Ω-m en materiales carbonatados. En su trabajo indican la dificultad de reconocer en algunos casos la afección de aguas salobres, debido a la heterogeneidad de este tipo de acuíferos.

En la Tabla 9.6 se resumen los parámetros del modelo obtenido para el SEDT S6.

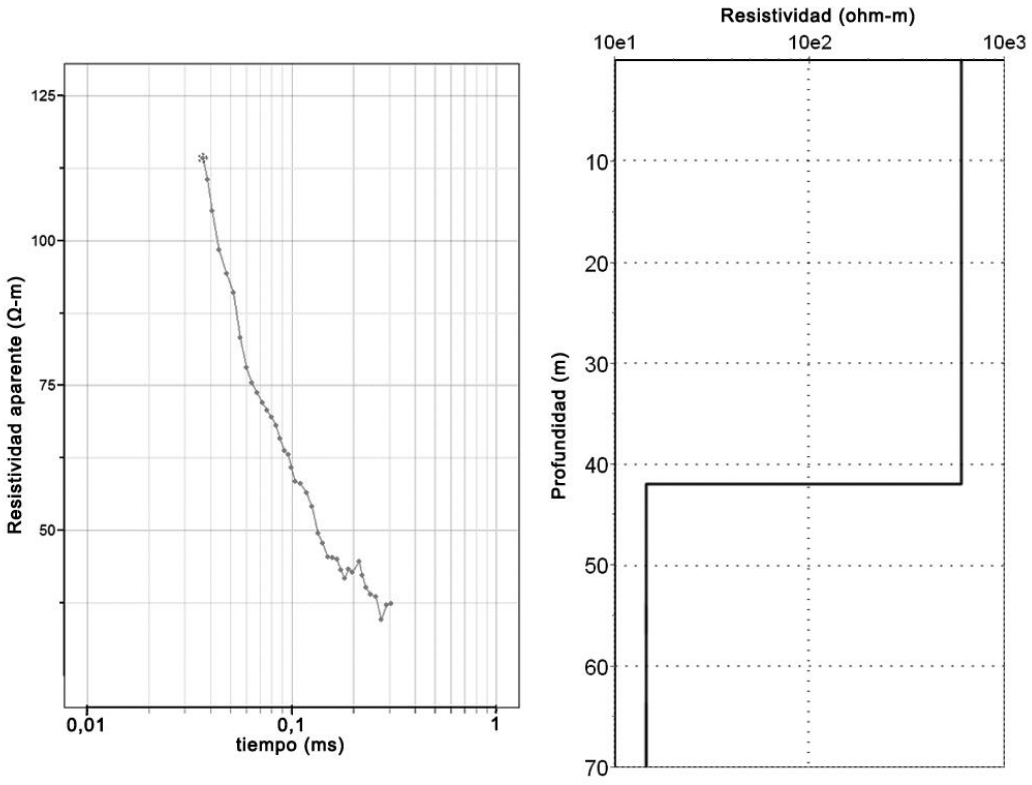


Fig. 9.11 Interpretación del SEDT S6 a partir de la curva de resistividad aparente en el tiempo 0,0369 ms-0,306 ms. En la imagen derecha, modelo de ajuste obtenido. Véase el Anexo IVg con los modelos equivalentes.

Tabla 9.6 Parámetros obtenidos en el SEDT S6 y materiales asociados

SEDT S6			
Nivel	**Espesor (m)**	**Res. (Ω-m)**	**Litología**
1	40	100-600	Calizas
2		20	Calizas saturadas ¿??

9.6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis y modelización de varios sondeos obtenidos con la técnica SEDT ilustran la capacidad de la técnica geofísica para caracterizar los materiales en distintas localizaciones.

Los resultados obtenidos para el sondeo S1 se ajustan a lo observado en el sondeo geotécnico contiguo determinado unos valores de resistividad para los conglomerados en la zona saturada de 200-400 Ω-m y la no saturada de 100-150 Ω-m asentados sobre las arcillas del Purbeck más conductivas con valores de 25 Ω-m. Estos resultados se correlacionan con la curva analizada en el apartado 9.4 en donde la tasa de decaimiento en el primer tramo de la curva contrastaba con otra obtenidas en materiales en los que los modelos mostraron resistividades menores.

En el caso del sondeo S2, a diferencia del sondeo S1 realizado en la misma zona, se define un nivel conductivo superior de 25 Ω-m sobre un nivel resistivo. Este hecho se pone en evidencia por un cambio en la tendencia de la curva de decaimiento en los primeros tiempos de muestreo lo que hizo pensar que existe un nivel conductivo superior asentado sobre materiales resistivos, análisis confirmado con los modelos obtenidos.

Los SEDT S3 y S4 realizados próximos a la localidad del Solanu, indican un contraste en las resistividades entre ellos lo que confirma el trazado de la falla. Sin más información disponible, no es posible asociar los materiales infrayacentes en estos dos sondeos a una formación en concreto, pero si se observa un cambio en la respuesta electromagnética.

Resaltar los buenos resultados obtenidos en el S5, como es de esperar en materiales muy conductivos y la información a-priori aportada al estudio lo que reduce las incertidumbres de los modelos.

Los datos resultantes del sondeo S6, no muy fiables, a partir del análisis del decaimiento. Sería necesario en este caso, teniendo en cuenta la elevada resistividad de los materiales, ampliar el momento magnético con el fin de alcanzar mayores profundidades de investigación.

Por lo tanto, a la vista de los sondeos interpretados, los resultados sugieren, en síntesis, la viabilidad del uso del método SEDT para la caracterización de zonas poco profundas, debiendo tomarse con precaución la respuesta en materiales muy resistivos, en los que el tiempo de muestreo se reduce debido a la alta tasa de decaimiento del voltaje inducido. Por otro lado, se ha visto, como la transformación de *Spiker*, permite interpretar los sondeos en términos de resistividad, que lo hace interesante, como método "rápido" de procesado para la identificación de anomalías en una zona amplia de estudio. Esta información sería utilizada como información de entrada para la obtención de valores reales de resistividad en la modelización.

10 Conclusiones

En líneas generales, el TFM ha evaluado la capacidad del método geofísico SEDT como método indirecto de prospección para la resolución de zonas poco profundas. Se ha realizado una revisión metodológica de la técnica, el procedimiento a seguir en una campaña geofísica y la interpretación de varios SEDT a partir de modelos numéricos.

Las principales conclusiones y aportes realizados son las siguientes:

- Se ha presentado el desarrollo de una metodología de trabajo con la técnica SEDT que incluye: la planificación y ejecución de la campaña de campo que permitió optimizar los tiempos de ejecución de un SEDT de una hora a 20 minutos, el procesado y almacenamiento de los datos y su presentación e interpretación.

- La utilización de programas específicos para la representación y análisis de datos en conjunto con datos geológicos y geográficos se ha mostrado como herramienta fundamental en el flujo de trabajo de una campaña geofísica.

- Se ha puesto en valor la capacidad de la técnica SEDT como técnica de prospección geofísica para la resolución de problemas de tipo hidrogeológico, como se ha visto en el estudio de la balsa de lodos, en el capítulo 8, y para el mapeo geológico de distintas formaciones rocosas a partir del análisis de varios sondeos SEDT, en el capítulo 9.

- La utilización de los SEDT junto con otro tipo de técnicas de investigación complementarias permitió definir con pequeño grado de incertidumbre, como consecuencia del problema de equivalencia, el nivel freático de los lodos almacenados en la balsa de lodos del Valle-Boinás que no fue posible investigar por medios de investigación directos.

- Se ha determinado, a partir de los modelos obtenidos para los sondeos realizados en la balsa del Valle-Boinás, un valor de resistividad de 4 **Ω**-m para los lodos almacenados.

- Los modelos obtenidos para los SEDT realizados en la zona del vertedero central de Asturias definen con un buen grado de ajuste, el contacto entre la formación conglomerática superior resistiva y el nivel arcilloso infrayacente más conductivo en el SEDT S1. El SEDT S2 permite definir el posible contacto entre el nivel arcilloso, más conductivo y las calizas de la formación Gijón de mayor resistividad

- No fue objetivo de este trabajo determinar la capacidad de los SEDT para evaluar la detección de fallas, sin embargo, el análisis comparativo entre dos sondeos realizados a un lado y otro del trazado de la falla de Ventaniella en la zona de El Solanu (Nava) determinan las diferencias existentes entre ellos y los modelos obtenidos permiten concretar los valores de resistividad para los materiales a un lado y otro del trazado en 60 **Ω**-m para los materiales permotriásicos con el SEDT S3 y 200 **Ω**-m para los materiales cretácicos en el SEDT S4

- A partir de los sondeos realizados sobre materiales con valores de resistividad elevados los datos obtenidos dejan algunas dudas sobre la capacidad del método de medir sobre este tipo de materiales, al menos con este tipo de configuración, como se observa en el SEDT S6.

-REFERENCIAS-

Archie, G., 1941. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, in: Dallas Meeting. pp. 54–62.

Auken, E., Jørgensen, F., Sørensen, K., 2003. Large-scale TEM investigation for groundwater 34, 188–194.

Barringer, A.R., 1962. The INPUT electrical pulse prospecting system. Min. Congr. J. 48, 49–52.

Bedrosian, P. a., Burgess, M.K., Nishikawa, T., 2013. Faulting and groundwater in a desert environment: constraining hydrogeology using time-domain electromagnetic data. Near Surf. Geophys. 11, 545–555. doi:10.3997/1873-0604.2013043

Buselli, G., 1985. Stratigraphic mapping applications of TEM, in: ASEG CONFERENCE. pp. 177–179.

Buselli, G., 1982. The effect of near-surface superparamagnetic material on electromagnetic measurements. Geophysics 47, 1315–1324. doi:10.1190/1.1441392

Buselli, G., O'Neill, B., 1977. SIROTEM: A new portable instrument for multichannel transient electromagnetic measurements. Expl. Geophys. 8, 82–87.

Danielsen, J.E., Auken, E., Jørgensen, F., Søndergaard, V., Sørensen, K., 2003. The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. J. Appl. Geophys. 53, 181–198. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.08.004

Dennis, Z.R., Cull, J.P., 2012. Transient electromagnetic surveys for the measurement of near-surface electrical anisotropy. J. Appl. Geophys. 76, 64–73. doi:10.1016/j.jappgeo.2011.10.014

Dolan, W.M., 1970. Geophysical detection of deeply buried sulfide bodies in weathered regions. Min. Groundw. Geophys. 44, 336.

El-Kaliouby, H., Abdalla, O., 2015. Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman. J. Appl. Geophys. 115, 59–64. doi:10.1016/j.jappgeo.2015.02.003

Fitterman, D. V., Anderson, W.L., 1987. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings. Geoexploration 24, 131–146. doi:10.1016/0016-7142(87)90087-1

Fitterman, D. V., Stewart, M.T., 1986. Transient electromagnetic sounding for groundwater. Geophysics 51, 995–1005.

Goldman, M., Arad, A., Kafri, U., 1988. Detection of fresh-water intrusion seawater interface by the time domain electromagnetic (TDEM) methos in Israel, in: 10th SWIM.

Goldman, M., Kafri, U., 2004. The use the time domain electromagnetic (TDEM) method to evaluate porosity of saline water saturated aquifers, in: Araguás, Custodio, Manzano (Eds.), 18 SWIM. Cartagena 2004, Spain. pp. 327–340.

Gómez-Ortiz, D., Fernández-Remolar, D.C., Granda, Á., Quesada, C., Granda, T., Prieto-Ballesteros, O., Molina, A., Amils, R., 2014. Identification of the subsurface sulfide bodies responsible for acidity in Río Tinto source water, Spain. Earth Planet. Sci. Lett. 391, 36–41. doi:10.1016/j.epsl.2014.01.022

Granda Sanz, Á., Tereñes, A.P., Plata Torres, J.L., 1987. Los sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos (SEDT). Aspectos más significativos y primeras experiencias en España. Boletín Geológico y Min. 98–3, (392-403).

Hallbauer-Zadorozhnaya, V.Y., Stettler, E., 2009. Time Domain Electromegnetic Soundings to Delineate Hydrocarbon Contamination of Ground Water, in: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2009. pp. 242–251.

ITGE, 1994. Reconocimiento mediante SEDT en la zona de Villaviciosa-Tazones (Asturias).

Julivert, M., 1971. Décollement tectonics in the Hercynian cordillera of NW Spain. Am. J. Sci. 270.

Kafri, U., Goldman, M., 2006. Are the lower subaquifers of the Mediterranean coastal aquifer of Israel blocked to seawater intrusion? Results of a TDEM (time domain electromagnetic) study. Isr. J. Earth Sci. 55, 55–68. doi:10.1560/Q567-832K-0420-067V

Kalinski, R.J., Kelly, W.E., 1993. Estimating water content of soils from electrical resistivity.

Keller, G. V., 1988. Rock and mineral properties, in: Nabighian, M.N. (Ed.), In Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. pp. 427 – 520.

Kuranchie, F.A., Shukla, S.K., Habibi, D., 2015. Electrical resistivity of iron ore mine tailings produced in Western Australia. Int. J. Mining,Reclamation Environ. 29, 191–200. doi:10.1080/17480930.2014.941551

Loke, M.H., 2004. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Lotze, F., 1945. Zur gliederung der varisziden der Iberischen Meseta. Geotektonische Forschungen 6, 78–92.

Mcneill, J.D., 1997. The application of electromagnetic techniques to environmental geophysical surveys 103–112.

Mcneill, J.D., 1994. TN-27. Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. Mississauga,Ontario.

Mcneill, J.D., 1980. TN-10. EM37 Ground transient electromagnetic system: calculated depth of exploration. Mississauga,Ontario.

Merino-Tomé, O., Rodríguez Suárez, A., Alonso Alonso, J.L., n.d. Mapa Geológico Digital continuo. E. 1:50000, Zona Cantábrica (Zona-1000) in GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España.[10/05/2017]. [WWW Document]. URL http://www.info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1000

Migliano Quintana, E., 2012. Análisis de los valores de resistividades verdadera obtenidos a partir del método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo. Nacional Autónoma de México.

Ming Huang, P., Li, Y., E. Sumner, M. (Eds.), 2011. Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes., Second Edi. ed. CRC Press.

Monex Geoscope, 2009. terraTEM Operations Manual.

Nabighian, M.N., 1988. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists.

Nabighian, M.N., 1979. Quasi-Static transient response of a conducting half-space.An approximate representation. Geophysics 44, 1700–1705.

Palacky, G.J., 1988. 3.Resistivity Characteristics of Geologic Targets, in: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Volume 1. pp. 52–129. doi:10.1190/1.9781560802631.ch3

Pérez-Estaún, A., Bastida, F., Alonso, J.L., Marquínez, J., Aller, J., Alvarez-Marrón, J., Marcos, A., Pulgar, J.A., 1988. A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrust belt: the Cantabrian Zone (Variscan Ibero-Armorican Arc). Tectonics 7, 517–537.

Rachel Dennis, Z., 2011. Electromagnetic Mapping for Crustal Structure Undercover in North Central Victoria. Monash University.

Reynolds, J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.

Samouëlian, A., Tabbagh, A., Cousin, I., Bruand, A., 2005. Electrical resistivity survey in soil science : A review. Soil Tillage Res. doi:10.1016/j.still.2004.10.004

Sanz, G., Calzada, C., 2000. Reflexiones sobre la experiencia de más de diez años de utilización del método de los sondeos electromagnéticos de dominio de tiempos (SEDT) en España . Boletín Geológico y Min.

Smith, R.S., Edwards, R.N., Buselli, G., 1994. An automatic technique for presentation of coincident-loop, impulse-response, transient, electromagnetic data. Geophysics 59, 1542–1550. doi:10.1190/1.1443543

Sørensen, K., Auken, E., Christensen, N.B., Pellerin, L., 2005. An integrated approach for hydrogeological investigations: New technology and a case history. Near-Surface Geophys. Vol. 2 Appl. Case Hist. 583–603.

Sørensen, K., Auken, E., Thomsen, P., 2000. TDEM in groundwater mapping- a continuous approach, in: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. pp. 485–491.

Velikin, A.B., Bulgakov, Y.I., 1967. Transient method of electrical prospecting (one-loop version): Presented at Internactionaal Seminar onGeophysical Methods of prospecting for Ore Minerals, Moscow.

Wait, J.R., 1956. Method of geophysical exploration. 2.735.980.

Wait, J.R., 1951. A conducting sphere in a time varying magnetic field. Geophysics 16, 666–672.

Weast, R.C., 1989. CRC Handbook of Chemistry, and Physics. Boca Raton, FL.

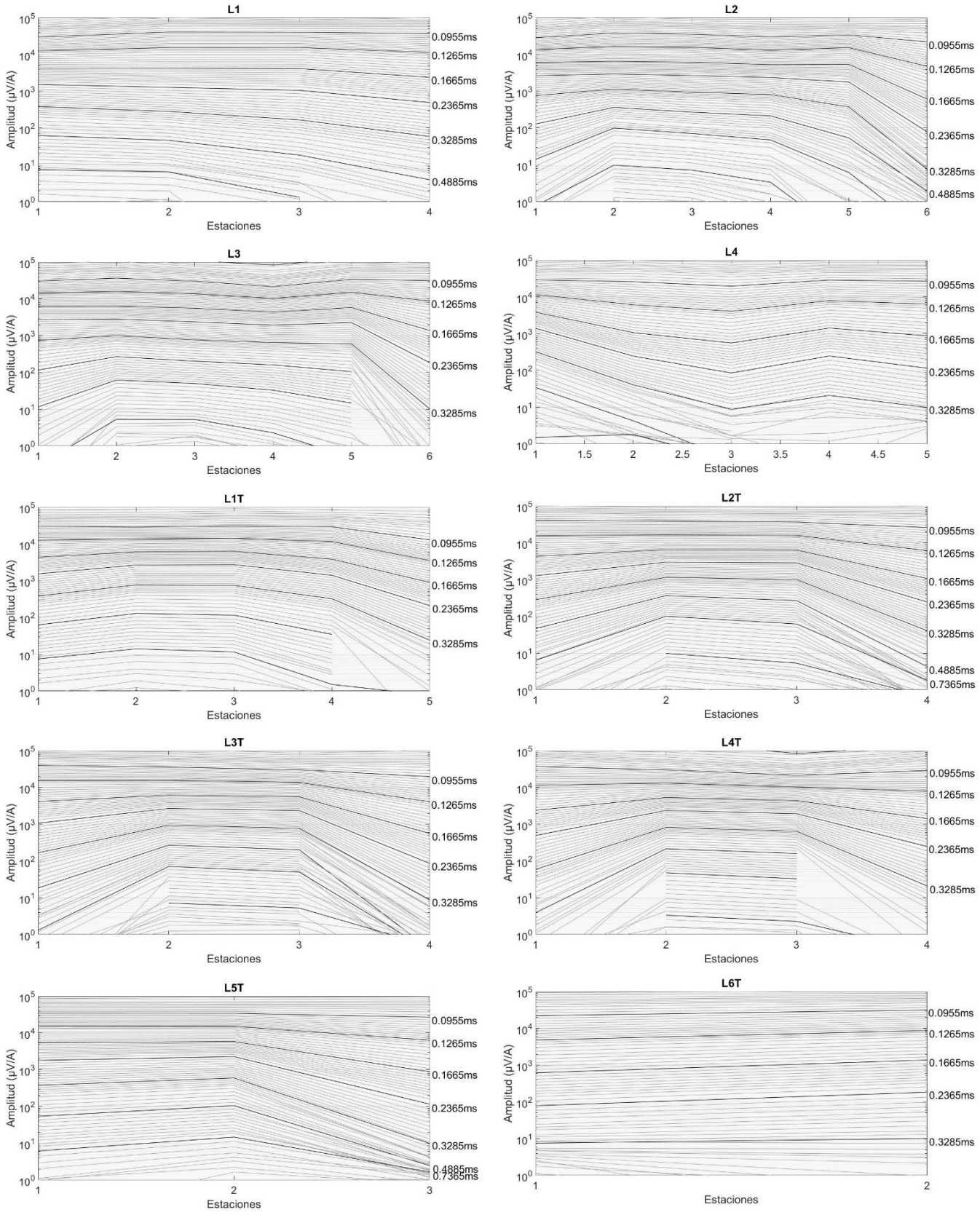
Weber, M., Helwig, S.L., Bauer, K., Haberland, C., Koch, O., Ryberg, T., Maercklin, N., Ritter, O., Schulze, a., 2012. Near-surface properties of an active fault derived by joint interpretation of different geophysical methods – the Arava/Araba Fault in the Middle East. Near Surf. Geophys. 10, 381–390. doi:10.3997/1873-0604.2012031

-ANEXOS-

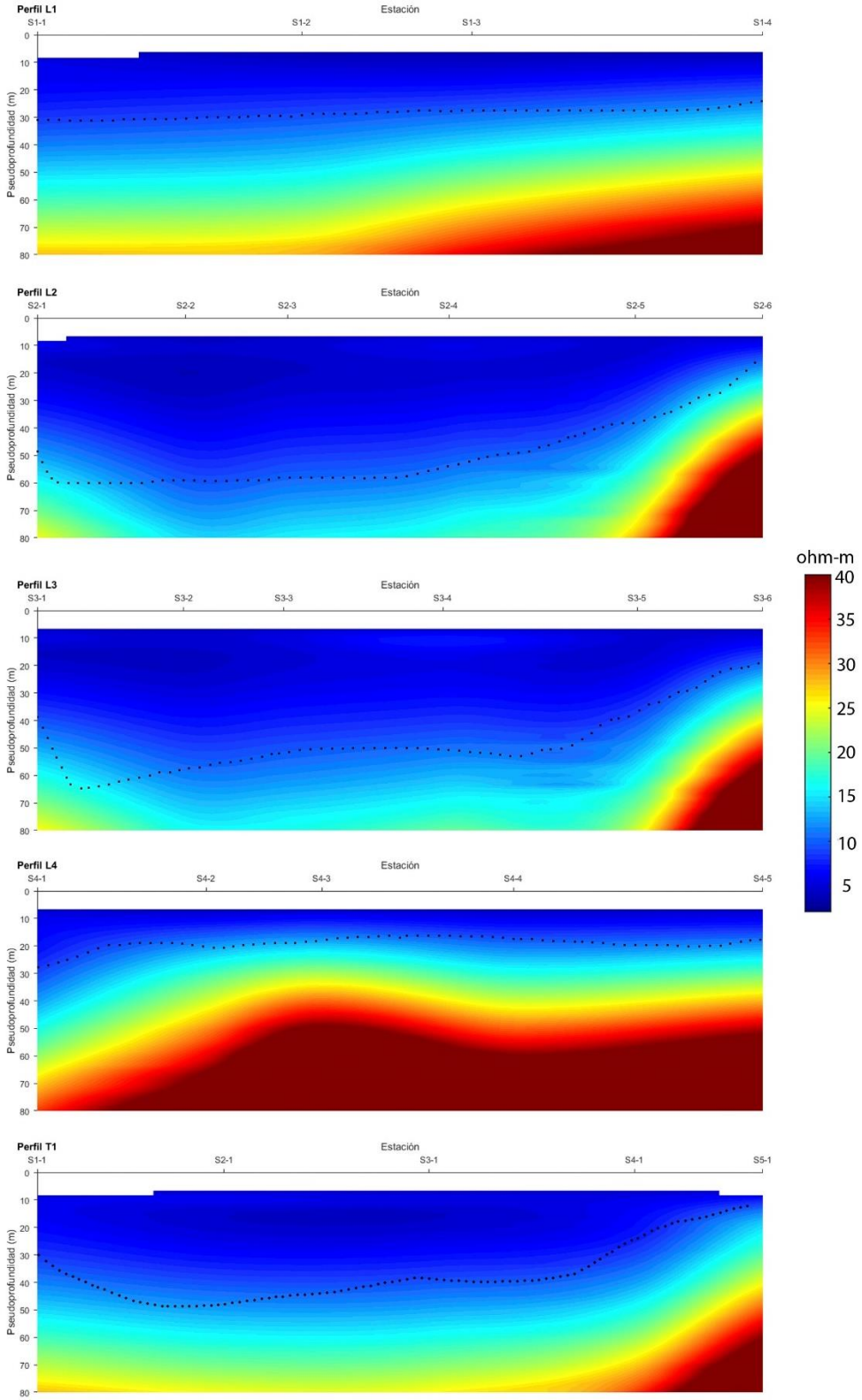
ANEXO I. Parámetros de configuración de los sondeos

Nombre_TFM	Ref_proyecto	Stacks	#Channels	System_Voltage	RxDelay_ms	TxConfig	Tx_Ohms	Tx_Area	Ramp_ms	Tx_Amps	Binning_Protocol	RxConfig	TotalSamplingDelay_ms	Rx_ChnLabel	Rx_Gain	Rx_PercClipped	Rx_Area	Rx_Ohms
S1-1	S1-1	1024	1	24.2	0.08	Coincident Loop	2.6	1600	0.084	9.17186	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.6	1600	2.91587
S1-2	S1-2	1024	1	24.2	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.082	9.07742	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.62	1600	2.98075
S1-3	S1-3	1024	1	24.3	0.08	Coincident Loop	2.8	1600	0.079	8.86447	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.64	1600	3.11872
S1-4	S1-4	1024	1	24.4	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.082	9.01616	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.74	1600	2.92918
S2-1	S2-1	1024	1	24.1	0.08	Coincident Loop	2.6	1600	0.084	9.14453	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.72	1600	3.01998
S2-2	S2-2	1024	1	24.2	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	9.11276	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.64	1600	3.00413
S2-3	S2-3	1024	1	24	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	8.92102	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.8	1600	3.00853
S2-4	S2-4	1024	1	24.3	0.08	Coincident Loop	2.6	1600	0.085	9.26147	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.8	1600	2.87595
S2-5	S2-5	1024	1	23.8	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	8.85592	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.7	1600	2.96514
S2-6	S2-6	1024	1	23.8	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	8.87944	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.68	1600	3.07488
S3-1	S3-1	1024	1	24.1	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	9.0755	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.76	1600	2.94911
S3-2	S3-2	1024	1	24	0.08	Coincident Loop	2.6	1600	0.082	9.11642	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.66	1600	2.91873
S3-3	S3-3	1024	1	24.1	0.08	Coincident Loop	2.8	1600	0.08	8.80118	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.78	1600	3.02409
S3-4	S3-4	1024	1	24.3	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	9.0919	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.78	1600	2.96393
S3-5	S3-5	1024	1	23.7	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.082	8.80312	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.74	1600	3.01766
S3-6	S3-6	1024	1	23.7	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.082	8.90831	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.78	1600	3.02018
S4-1	S4-1	1024	1	24	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	9.02152	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.82	1600	2.95748
S4-2	S4-2	1024	1	24	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.082	8.92115	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.78	1600	3.02387
S4-3	S4-3	1024	1	24.2	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.081	8.87528	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.76	1600	3.01298
S4-4	S4-4	1024	1	24.2	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.082	9.03731	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.76	1600	3.00723
S4-5	S4-5	1024	1	23.6	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	8.81475	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.78	1600	2.97338
S5-1	S5-1	1024	1	23.9	0.08	Coincident Loop	2.7	1600	0.083	8.92979	TH	Loop	8.59E-05	Z	1	0.8	1600	3.02138
S1	COG5-2INT	2500	1	24.1	0.015	Coincident Loop	7.2	625	0.018	3.40673	TI	Loop	0.00002093	Z	8	0.2	625	1.96907
S2	COG3-2INT	6500	1	24.1	0.015	Coincident Loop	6.6	625	0.019	3.68512	TI	Loop	0.00002093	Z	1	0	625	2.01758
S3	SOL7-Stn1	1024	1	24.3	0.015	Coincident Loop	7.2	625	0.018	3.44406	TI	Loop	2.09E-05	Z	4	0.1	625	2.14427
S4	SOL7-Stn2	1024	1	24.1	0.015	Coincident Loop	7.1	625	0.018	3.45274	TI	Loop	2.09E-05	Z	4	0.1	625	2.13607
S5	BOINAS25	1024	1	24	0.018	Coincident Loop	7	625	0.018	3.45217	TH	Loop	2.393E-05	Z	1	0.12	625	2.16969
S6	PER18	2000	1	24.4	0.0094	Coincident Loop	12.8	625	0.009	1.90032	TH	Other	1.53E-05	Z	4	0.1	625	0

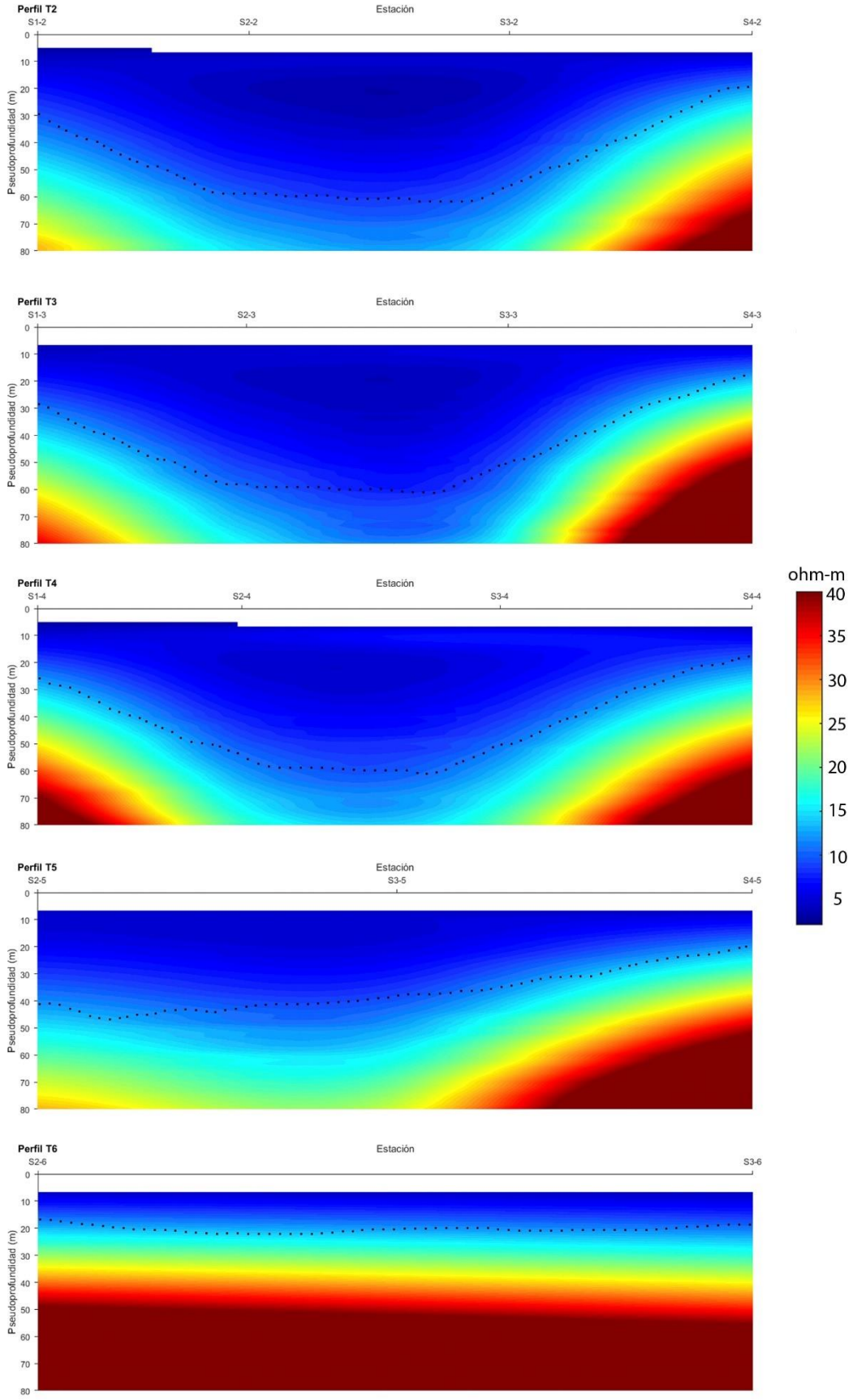
ANEXO II. Perfiles Voltaje/Tiempo de cada uno de los perfiles



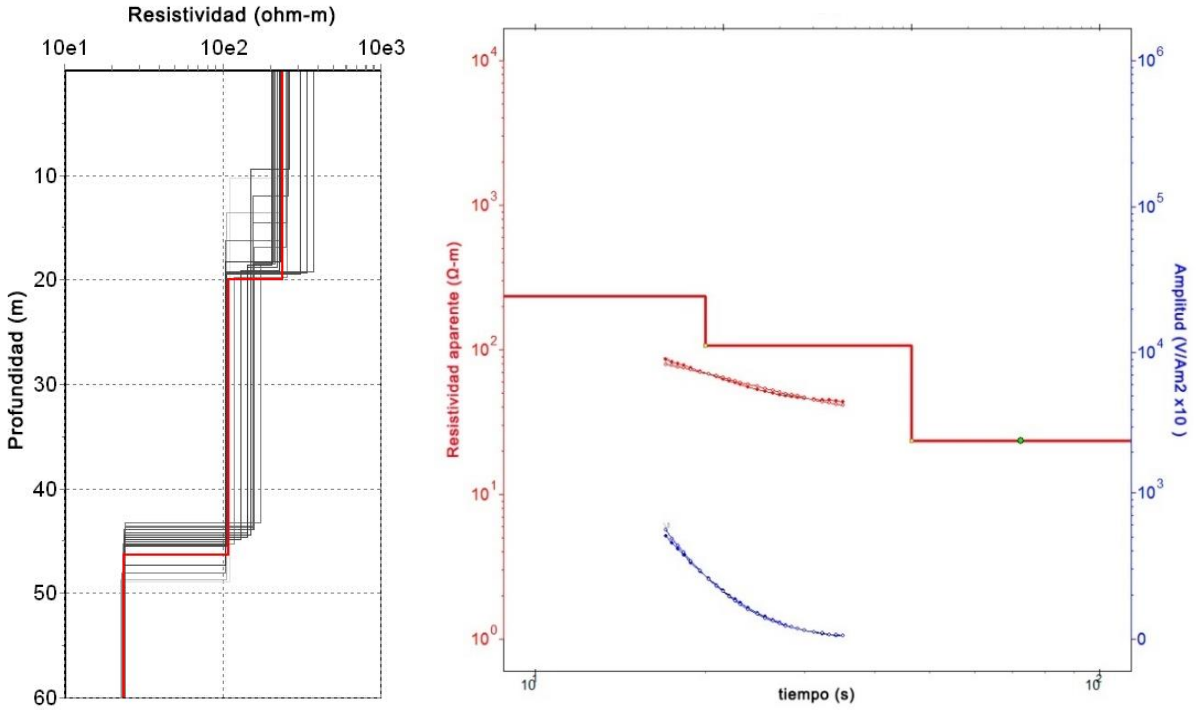
ANEXO IIIa. Pseudosecciones transformación Spiker.



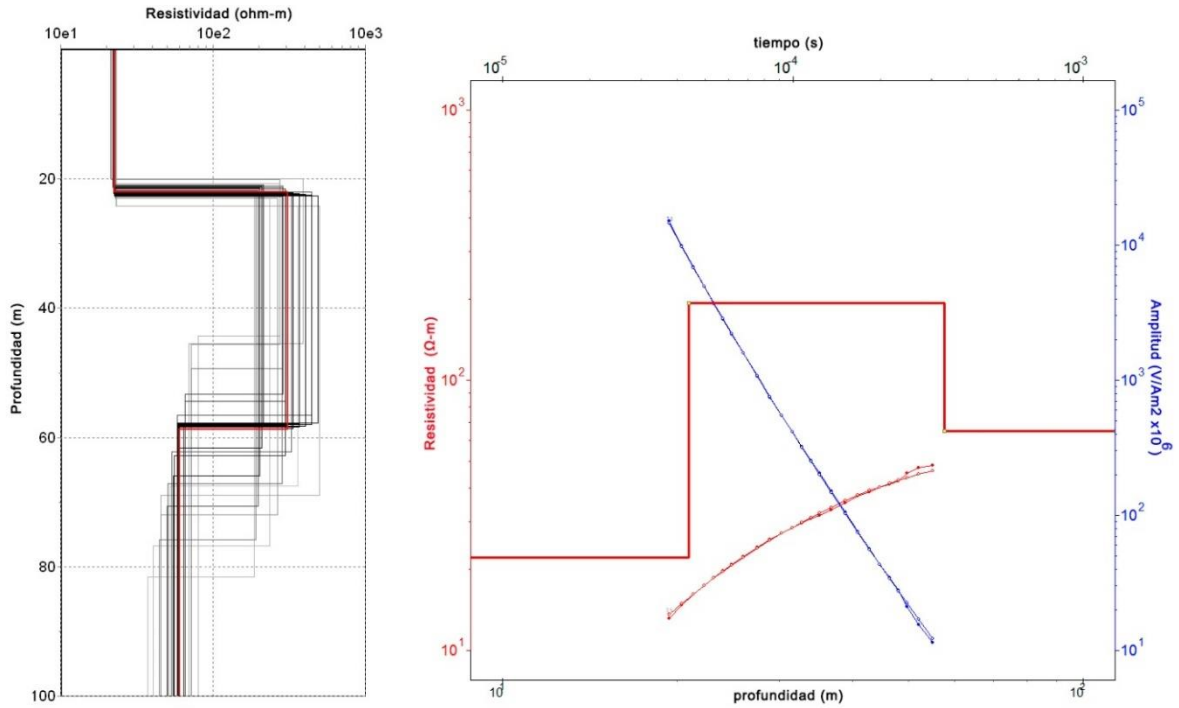
ANEXO IIIb. Pseudosecciones transformación Spiker.



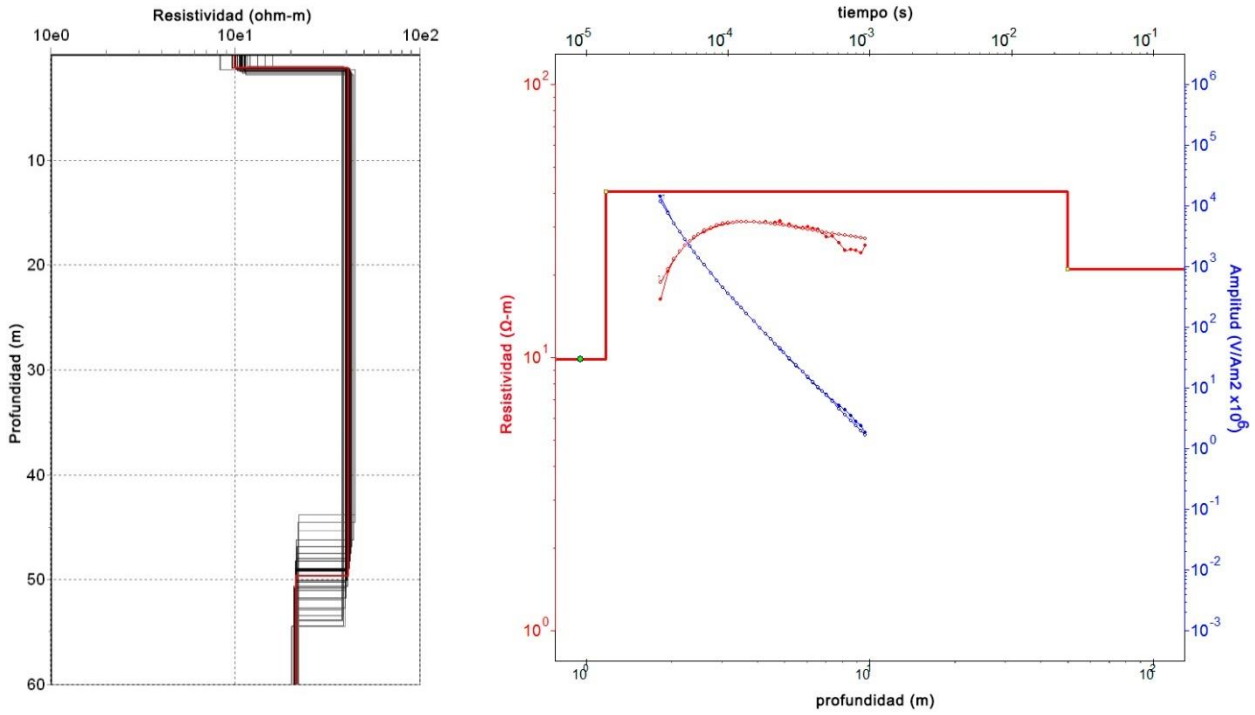
ANEXO IV.



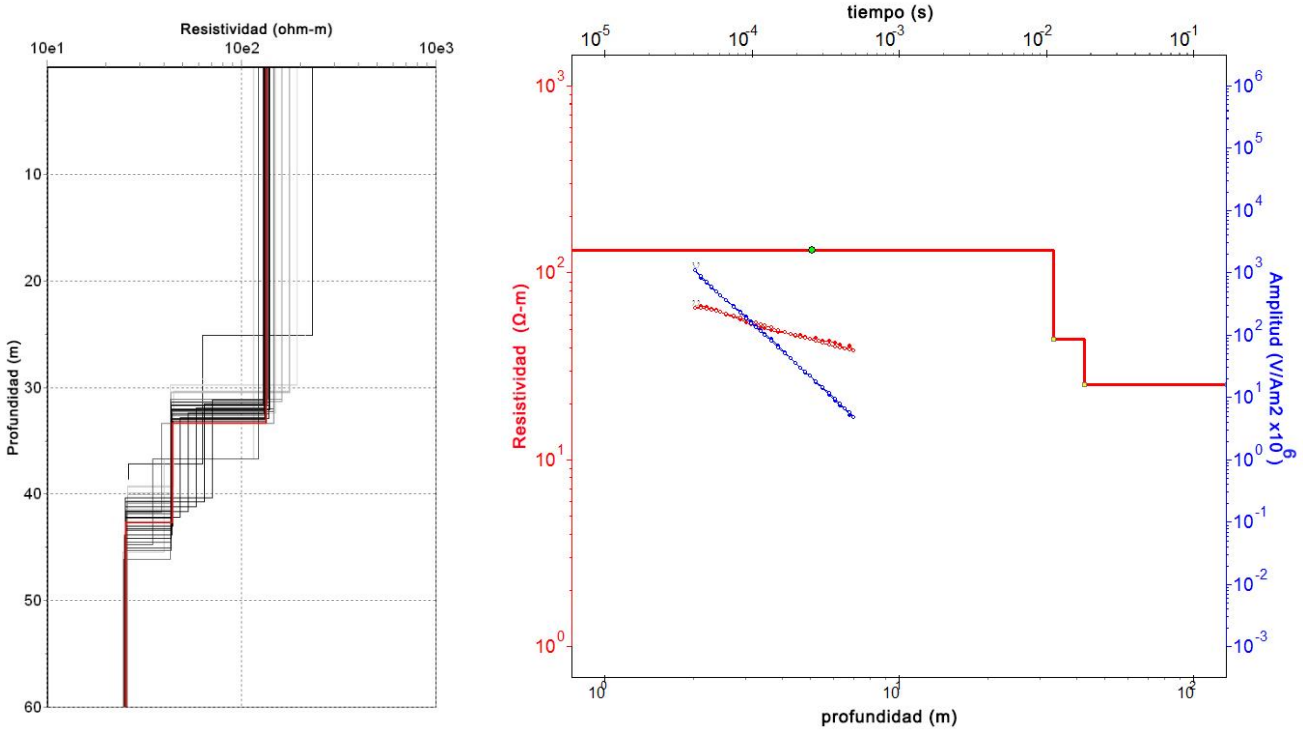
a. SEDT S1. A la izquierda modelos equivalentes. A la derecha ajuste de los datos observados y los datos calculados



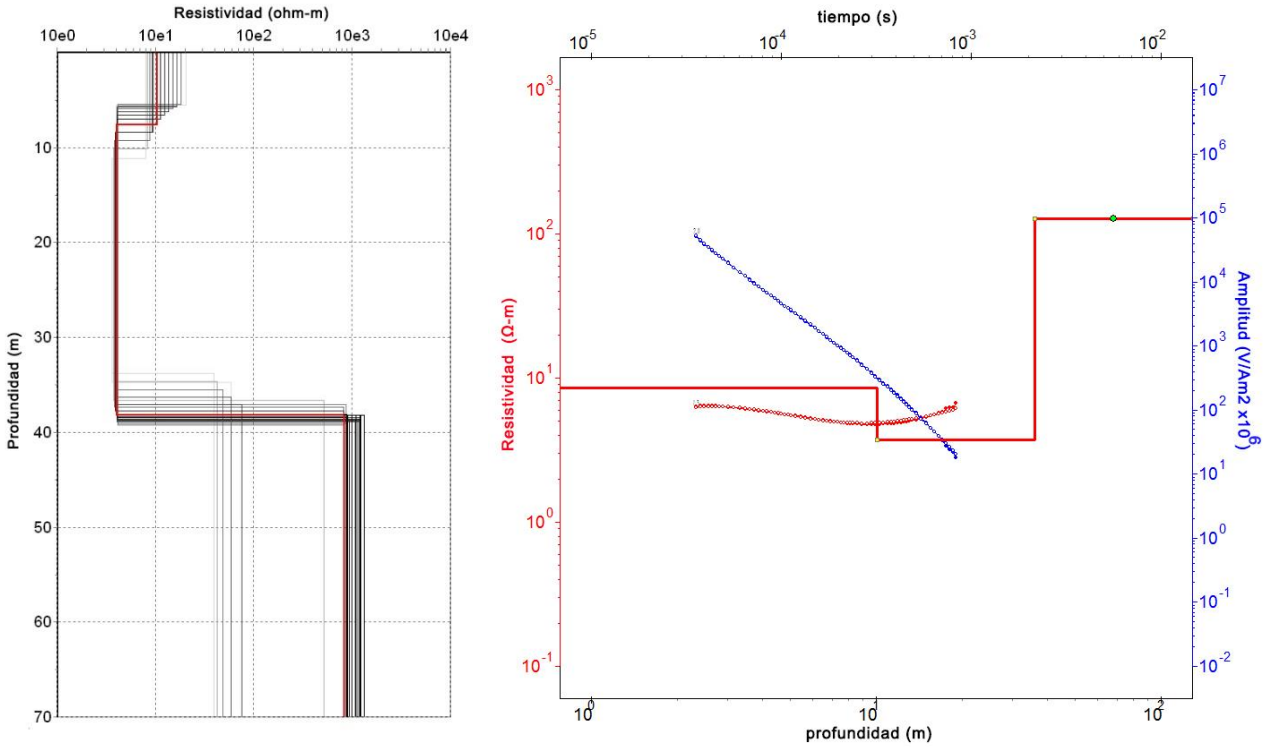
b. SEDT S2. A la izquierda modelos equivalentes. A la derecha ajuste de los datos observados y los datos calculados



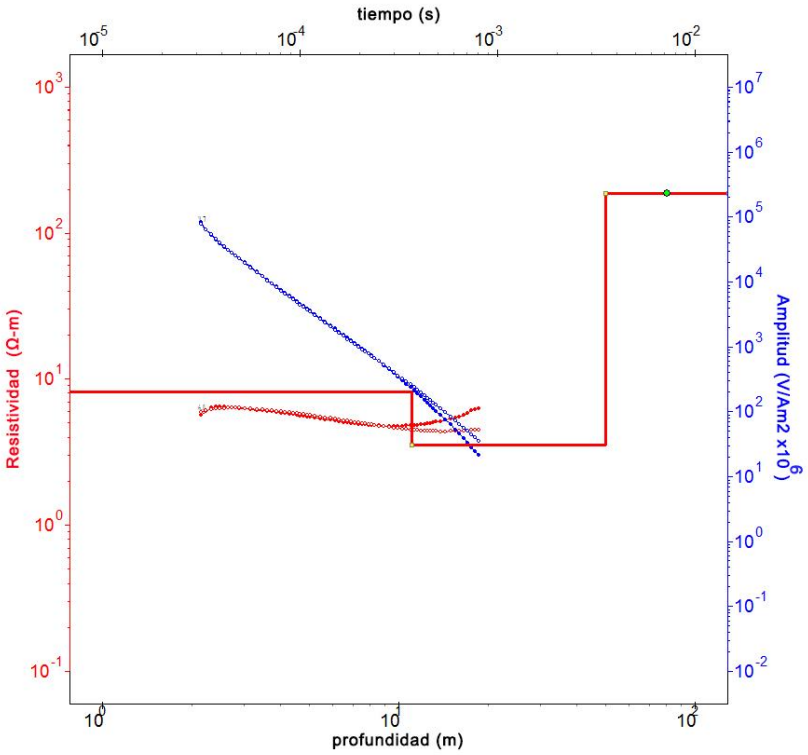
c. SEDT S3. A la izquierda modelos equivalentes. A la derecha ajuste de los datos observados y los datos calculados



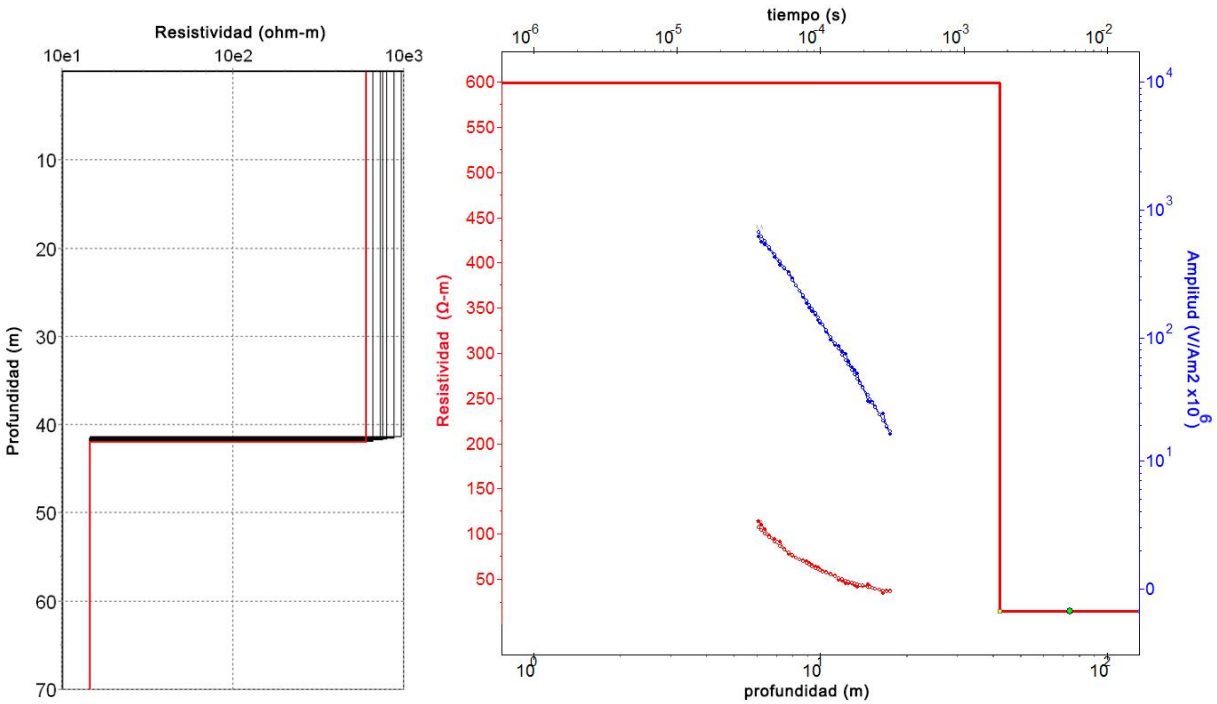
d. SEDT S4. A la izquierda modelos equivalentes. A la derecha ajuste de los datos observados y los datos calculados



e. SEDT S5. A la izquierda modelos equivalentes. A la derecha ajuste de los datos observados y los datos calculados



f. Modelo 2 del SEDT S5 ajustando el nivel de la balsa en 50m. Los errores obtenidos en este modelo son de 8,1% lo que supone un error demasiado alto.



g. SEDT S6. A la izquierda modelos equivalentes. A la derecha ajuste de los datos observados y los datos calculados