

TRABAJO FIN DE MÁSTER

TÍTULO DEL PROYECTO: “CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA PARA LOCALIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO APOYADO EN GEOTECNOLOGÍAS”

MÁSTER EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



AUTOR: JAVIER CARRASCO GARCÍA D.N.I.: 70808155-X

TUTOR: BENJAMÍN ARIAS PÉREZ, E.P.S. ÁVILA

COTUTOR: PEDRO CARRASCO GARCÍA, E.P.S. ÁVILA

FECHA: JUNIO 2018

CENTRO: E.P.S. ÁVILA. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA



**INDICE**

I.- INTRODUCCION.....	2
II.- SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO, EQUIPO Y SOFTWARE EMPLEADOS.....	3
2.1.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDТ).....	3
2.1.1 – <i>Introducción</i>	3
2.1.2 – <i>Principios Físicos del SEDТ</i>	3
2.1.3 – <i>Fundamento físico</i>	7
2.1.4 – <i>Procesado de datos SEDТ</i>	11
2.2.- Equipo empleado	12
2.3.- Software.....	14
2.3.1.- <i>RockWorks</i>	14
2.3.2.- <i>Google earth</i>	15
2.3.3.- <i>Oasis Montaj</i>	16
III.- METODOLOGÍA, RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS	18
3.1.- Estudio hidrogeológico en el término municipal de Pozanco (Ávila) mediante Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo.....	18
3.1.1.- <i>Introducción</i>	18
3.1.2.- <i>Geología e Hidrogeología</i>	19
3.1.2.1.- <i>Geología</i>	19
3.1.2.1.- <i>Hidrogeología</i>	20
3.1.3. <i>Trabajos realizados</i>	21
3.1.4. <i>Registros elaborados</i>	23
3.1.5. <i>Resultados obtenidos</i>	26
3.1.5.1. <i>Perfil nº 1</i>	28
3.1.5.2. <i>Perfil nº 2</i>	29
3.1.5.3. <i>Perfil nº 3</i>	30
3.1.5.4. <i>Perfil nº 4</i>	31
3.1.5.5. <i>Perfil nº 5</i>	32
3.1.5.6. <i>Perfil nº 6</i>	33
3.1.5.7. <i>Perfil nº 7</i>	34
3.1.5.8. <i>Perfil nº 8</i>	35
3.1.6. <i>Análisis de los resultados obtenidos</i>	36
IV.- CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	41
4.1.- Conclusiones.....	41
4.2.- Desarrollos futuros	41
V. – BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS.....	43



I.- INTRODUCCION

En el presente proyecto se inicia una investigación para la mejora de la caracterización del subsuelo mediante el uso de programas específicos de gestión de información espacial y la técnica geofísica Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SED-T) para la búsqueda de aguas subterráneas.

El objetivo principal de este proyecto es el de servir de base a una futura Tesis Doctoral, en la cual se pretenderá realizar avances en la búsqueda de aguas subterránea mediante diferentes técnicas geofísicas apoyándose en programas de gestión de información espacial para la caracterización de acuíferos.

Para la consecución de estos objetivos:

- Se investigarán nuevas aplicaciones de estas técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología. Estas técnicas han sido desarrolladas y se siguen desarrollando principalmente para la localización y cubicación de yacimientos mineros dejando un vacío de investigación en otras aplicaciones.
- Se mejoran las técnicas mediante la utilización de herramientas específicas de gestión de información espacial tales como, el Rockworks, Oasis Montaj, Google earth y otros programas. De esta forma, se podrán representar y estudiar los datos geofísicos obtenidos de una manera más sencilla y global caracterizando de forma más precisa el subsuelo.

Para este trabajo se ha realizado una campaña geofísica en el término municipal de Pozanco en la provincia de Ávila, donde se ha realizado un estudio hidrogeológico bastante amplio.



II.- SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO, EQUIPO Y SOFTWARE EMPLEADOS

2.1.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDТ)

2.1.1 – Introducción

El método del Sondeo Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (en adelante SEDT; en inglés Time Domain Electromagnetics (TDEM)) constituye una herramienta geofísica capaz de proporcionar información muy detallada de la distribución de resistividades del subsuelo, determinando sus variaciones tanto lateral como verticalmente. Desde el comienzo de su aplicación, ha demostrado su utilidad en investigaciones en el campo de la hidrogeología (Rhoades et al., 1976; Danielsen, 2003), minería, contaminación ambiental subterránea, arqueología y en general, en la localización de estructuras y anomalías complejas, tanto geológicas como antrópicas.

El sistema SEDT se clasifica dentro de los sistemas de investigación electromagnéticos de fuente artificial.

2.1.2 – Principios Físicos del SEDT

La realización de un SEDT consiste en inyectar una corriente constante en un bucle o bobina transmisora (Tx) generando un campo magnético primario constante. Cuando se interrumpe de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (Tx) el campo magnético primario deja de ser constante y disminuye su valor en el tiempo hasta hacerse cero (Sheriff, 1989). De acuerdo con la ley de Faraday, cuando un cuerpo es expuesto a un campo magnético variable en el tiempo, se producen una serie de inducciones electromagnéticas de corrientes eléctrica en el subsuelo (figura 64). Estas corrientes, fluyen en trayectorias cerradas por el subsuelo, migrando en profundidad y lateralmente disminuyendo su intensidad a lo largo del tiempo generando a su vez un campo magnético secundario transitorio decreciente en la superficie (McNeill; 1980b).

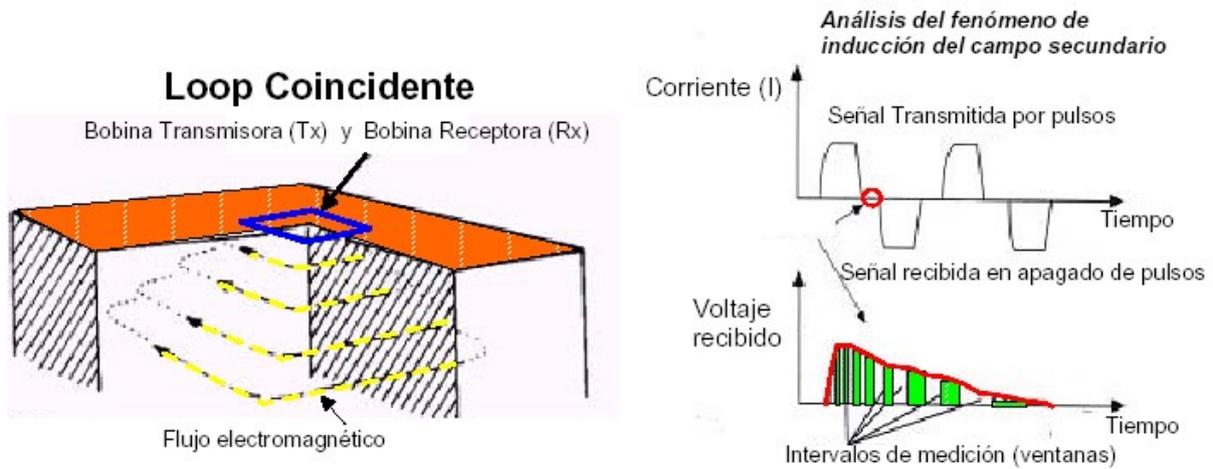


Fig. 1. Dispositivo general de un sondeo electromagnético (Navarro Luna, 2006).

Este campo secundario induce un voltaje variable en tiempo en el bucle receptor (Rx). La forma en que decae el voltaje contiene información sobre la resistividad del subsuelo puesto que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas depende de la resistividad del medio. El carácter migratorio en profundidad, es decir, los voltajes de tiempos cortos proveen información de la resistividad de las capas superficiales mientras que los tiempos largos permiten determinar la resistividad de las capas emplazadas a mayor profundidad (Sheriff, 1989).

De forma detallada, el proceso de un SEDT es el siguiente:

1. Se hace circular una corriente por el bucle transmisor (Tx) el cual crea un campo magnético primario, variable en el tiempo.

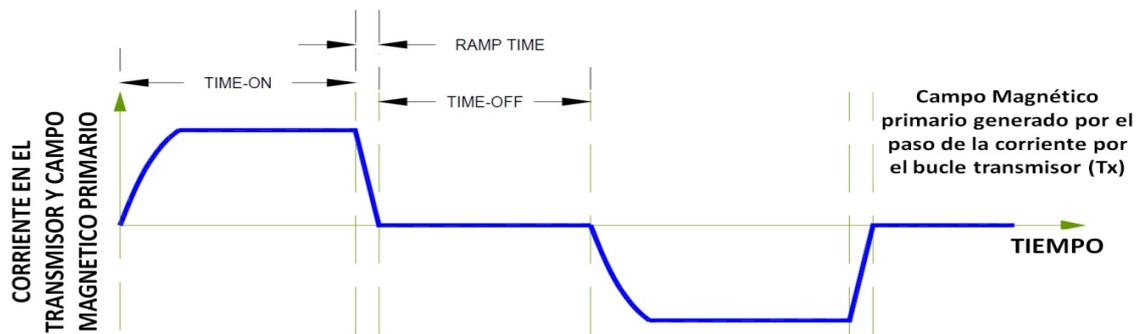


Fig. 2. Campo magnético primario (Navarro Luna, 2006).

2. Según la ley de Faraday, una disminución rápida de la corriente transmitida, y por lo tanto, del campo magnético primario induce una fuerza electromotriz (emf.) en el subsuelo.

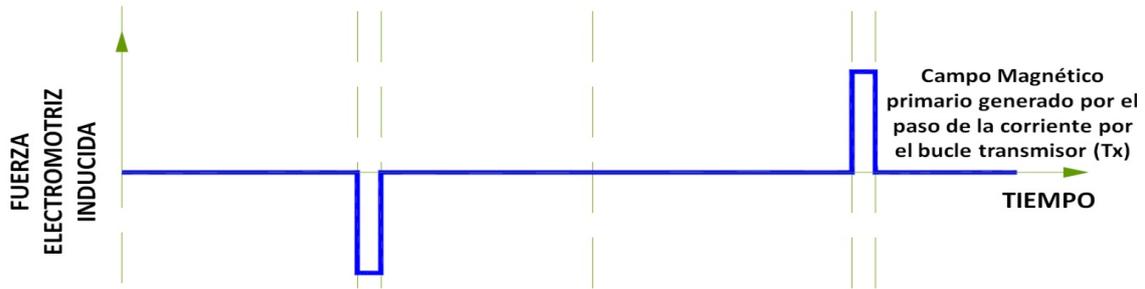


Fig. 3. Fuerza electromotriz (Navarro Luna, 2006).

3. Estas corrientes inducidas generan, a su vez, un campo magnético secundario, del cual se mide su variación en el tiempo en la bobina receptora (Rx).

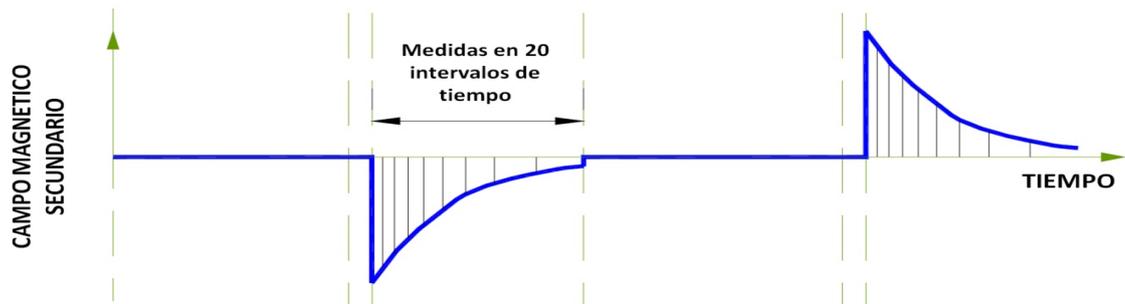


Fig. 4. Campo magnético secundario (Navarro Luna, 2006).

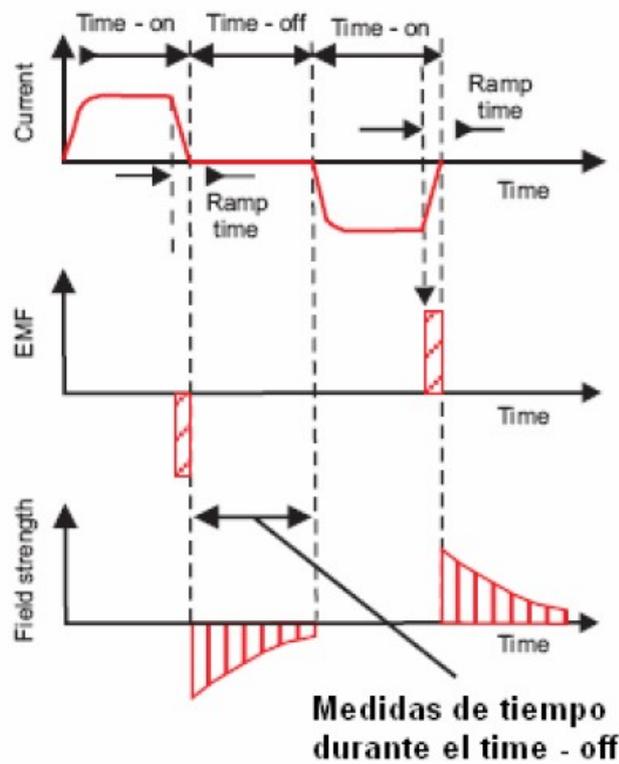


Fig. 5. Diagrama de tiempo en el que se realizan las medidas por el receptor (Navarro Luna, 2006).



Podemos visualizar de forma grafica como se produce la distribución de de las corrientes inducidas en el subsuelo:

1. Distribución de corrientes inmediatamente después del corte de corriente (turn-off).

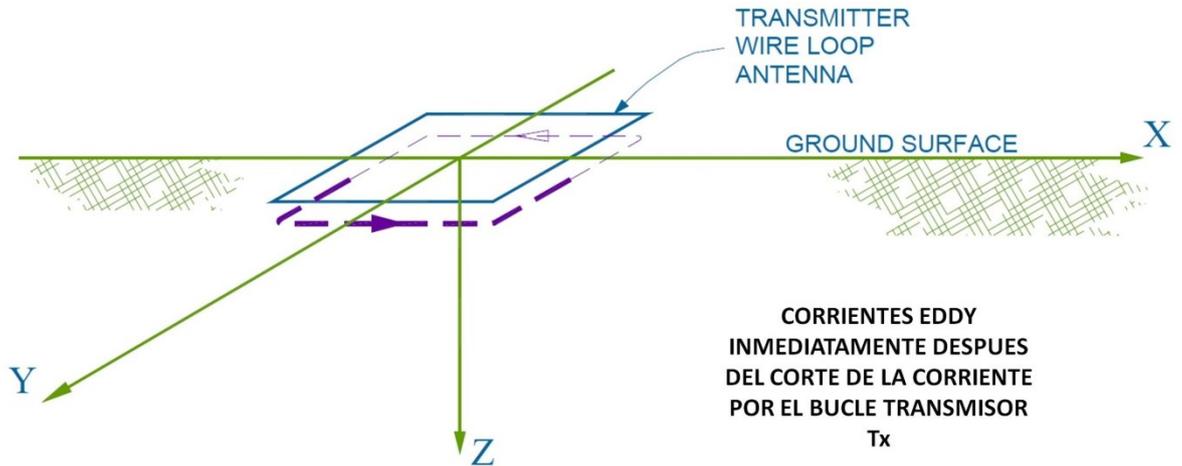


Fig.6. Esquema de corriente inmediatamente después del corte de corriente (Navarro Luna, 2006).

2. Distribución de corrientes transcurrido un cierto tiempo desde el corte de la corriente.

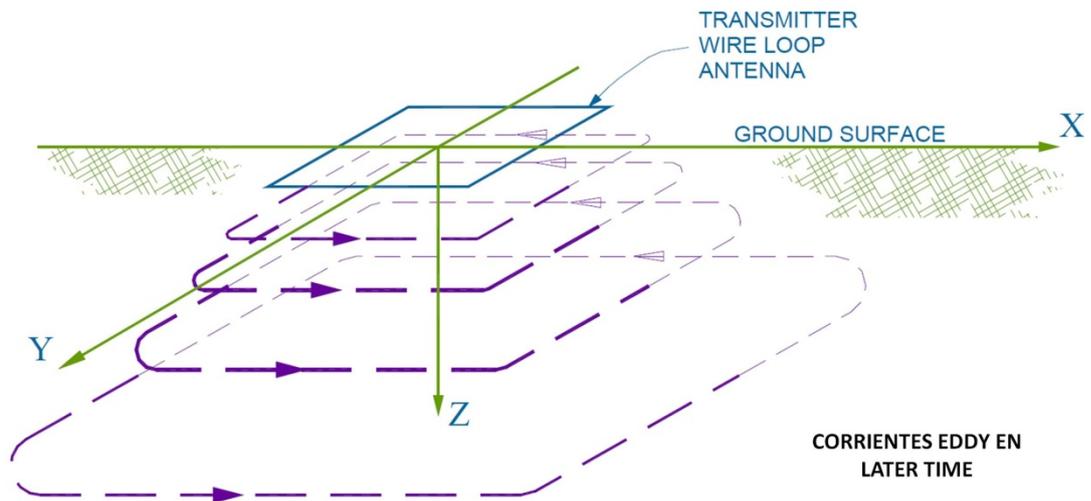


Fig.7. Esquema de corriente tras cierto tiempo (Navarro Luna, 2006).

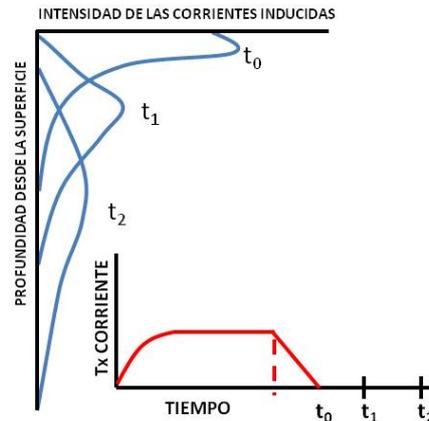


Fig.8. Densidad de la corriente en función de la profundidad, para diferentes tiempos (Navarro Luna, 2006).

2.1.3 – Fundamento físico

Tal y como hemos mencionado con anterioridad, el SEDT registra la amplitud de la señal transmitida en función del tiempo. De acuerdo con la Ley Faraday, al variar un campo eléctrico constante se induce un campo magnético secundario en el terreno:

$$\nabla \times \mathbf{e} = - (\partial \mathbf{b} / \partial t)$$

Donde:

\mathbf{e} es igual al campo eléctrico

\mathbf{b} es la inducción magnética.

La circulación de una corriente eléctrica por una bobina (bucle) induce un campo magnético estático que denominamos campo primario. Este campo primario no contiene información del subsuelo, pero es proporcional al momento magnético, \mathbf{M} , del campo generado:

$$\mathbf{M} = I n A_{\text{loop}}$$

Siendo:

I la corriente que circula por la bobina,

n el número de vueltas de la bobina y

A_{loop} el área del bucle.

Tras un corto periodo haciendo circular la corriente por el bucle conseguimos que el campo primario sea constante. En dicho momento, si interrumpimos la corriente en el bucle, el campo primario comienza a decaer generando a su vez un campo eléctrico que induce una serie de corrientes de Foucault que empiezan a discurrir por el subsuelo en las inmediaciones de la bobina. Debido a la pérdida óhmica, estas corrientes rápidamente comienzan a decaer induciendo, un campo magnético secundario. El decaimiento de estas corrientes es función de la conductividad (resistividad) de los materiales del subsuelo que atraviesan. El decaimiento del



campo magnético secundario induce una fuerza electromotriz en la bobina receptora (R_x) que podemos registrar.

La fuerza electromotriz (fem) generada en el receptor (R_x) es:

$$E = K \cdot A \cdot N$$

Donde:

K, constante que depende de campo generado por el transmisor (T_x). A mayor campo mayor **K**.

A área del bucle receptor y

N, el número de vueltas o espiras del bucle receptor.

Las corrientes de Foucault generadas se inducen hacia el subsuelo y tienden a su vez a alejarse del punto de generación en un ángulo aproximado de 30° . La profundidad de penetración, Z_d , en un momento dado, t , viene dada por la siguiente formulación:

$$Z_d = (2t/\sigma\mu)^{1/2}$$

Dónde μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad eléctrica del medio.

De la ecuación anterior se deduce que la resistividad del medio condiciona la penetración del sistema, tal y como podemos ver en la gráfica inferior (figura 72). La grafica analiza la penetración de un SEDT para un mismo momento en un medio homogéneo de diferentes resistividades (0.1, 1 10 y 100 Ohm·m). De la gráfica se deduce que la penetración es directamente proporcional a la resistividad del medio de manera que cuanto menos resistivo sea este (margas, arcillas, etc.), la penetración del sistema decrece.

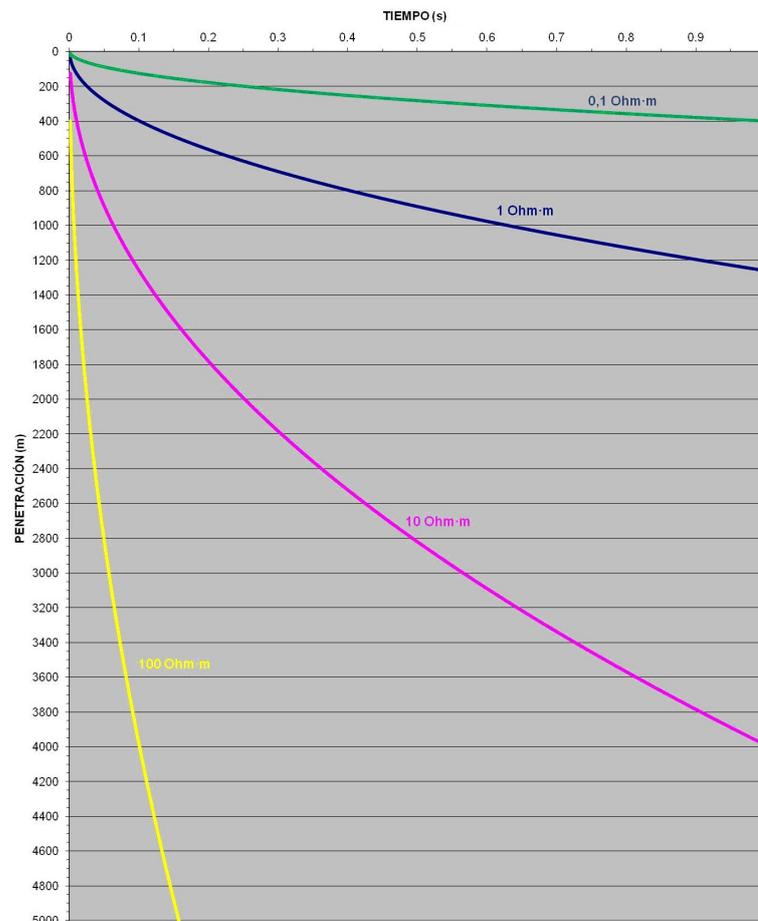


Fig.9. Profundidad de penetración en función de la resistividad del medio

La profundidad máxima al cual podemos medir se obtiene a través de Z_{last} , la cual no depende únicamente del momento sino también, del nivel de ruido ambiental, V_{noise}

$$Z_{last} = (2/25 \sqrt[3]{3})^{1/10} (M/\sigma V_{noise})^{1/5}$$

El nivel de ruido puede llegar a inhabilitar el registro. Christensen (1998) establece un límite en estos casos cuando la relación señal/ruido es igual a 1. Cuando la señal es muy débil en comparación con el ruido (sobre todo en tiempos grandes, grandes profundidades), se debe incrementar el stacking¹.

¹ Procedimiento de mejora del ratio relación señal/ruido basado en la repetición de las medidas múltiples veces, sumando la señal recibida y representando el valor medio.

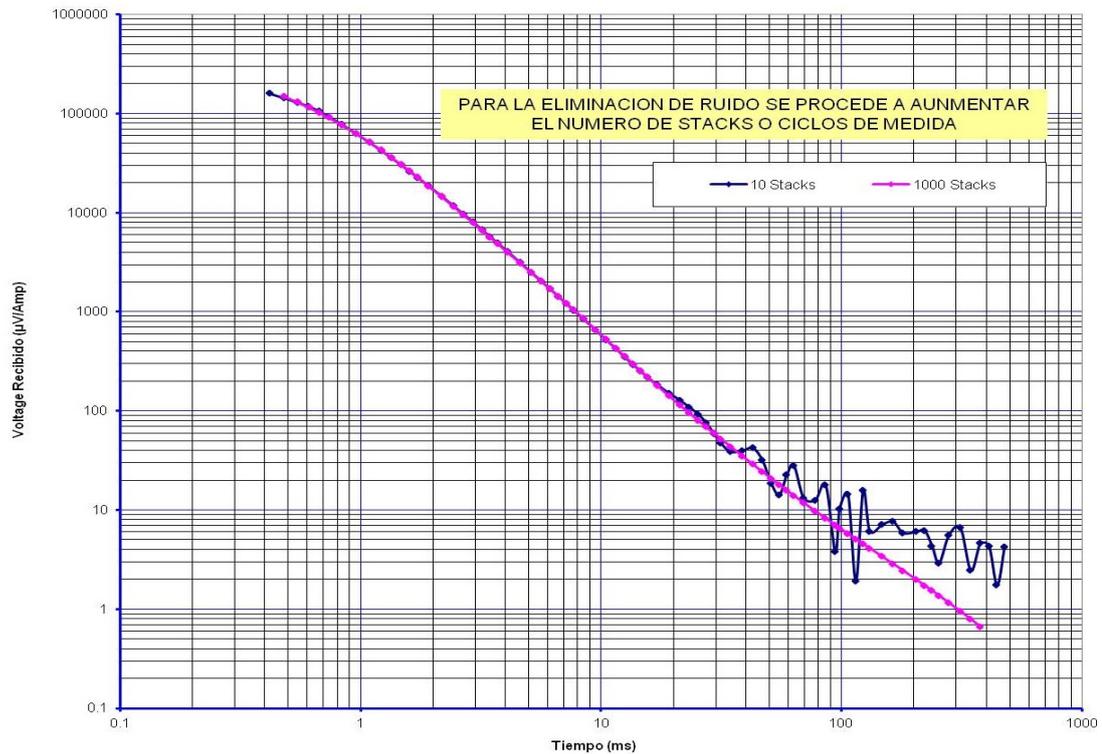


Fig.10. Comparación de un punto de investigación SEDT con 10 stacks (línea azul) en el que se ve la afección del mismo por el ruido ambiente que impide analizar la parte final de la curva. Se representa también el mismo punto pero aumentando el stacking hasta 1000 medidas obteniéndose una curva clara que permite su interpretación

La profundidad máxima de penetración en un medio homogéneo depende directamente del momento magnético (Joakim, 2003) de manera que se pueden alcanzar mayores profundidades aumentando la intensidad de corriente que circula por el bucle, el área del bucle emisor, el número de vueltas del mismo.

Por lo tanto, la profundidad útil de investigación depende de:

- Dimensiones del bucle transmisor²
- Intensidad de la corriente que circula por el bucle
- Duración del tiempo de observación del transitorio
- Resistividad eléctrica de las capas superficiales³ y del medio en general.

² La dimensión de bucle emisor (T_x) condiciona la profundidad de investigación. Son usuales el empleo de bucles de 50, 100 y hasta 500 m de lado logrando alcanzar profundidades de investigación de hasta 2.000 m. Hemos de recordar en este punto que a medida que se incrementa el tamaño del bucle emisor, incrementamos la profundidad de investigación, pero se pierde resolución en la parte más superficial, viéndose incrementado también, el nivel de ruido.

³ Las capas conductoras tienden a concentrar la corriente impidiendo su difusión a otras capas. La existencia de conductores en la parte superficial condiciona por tanto la penetración del sistema (Figura 9)

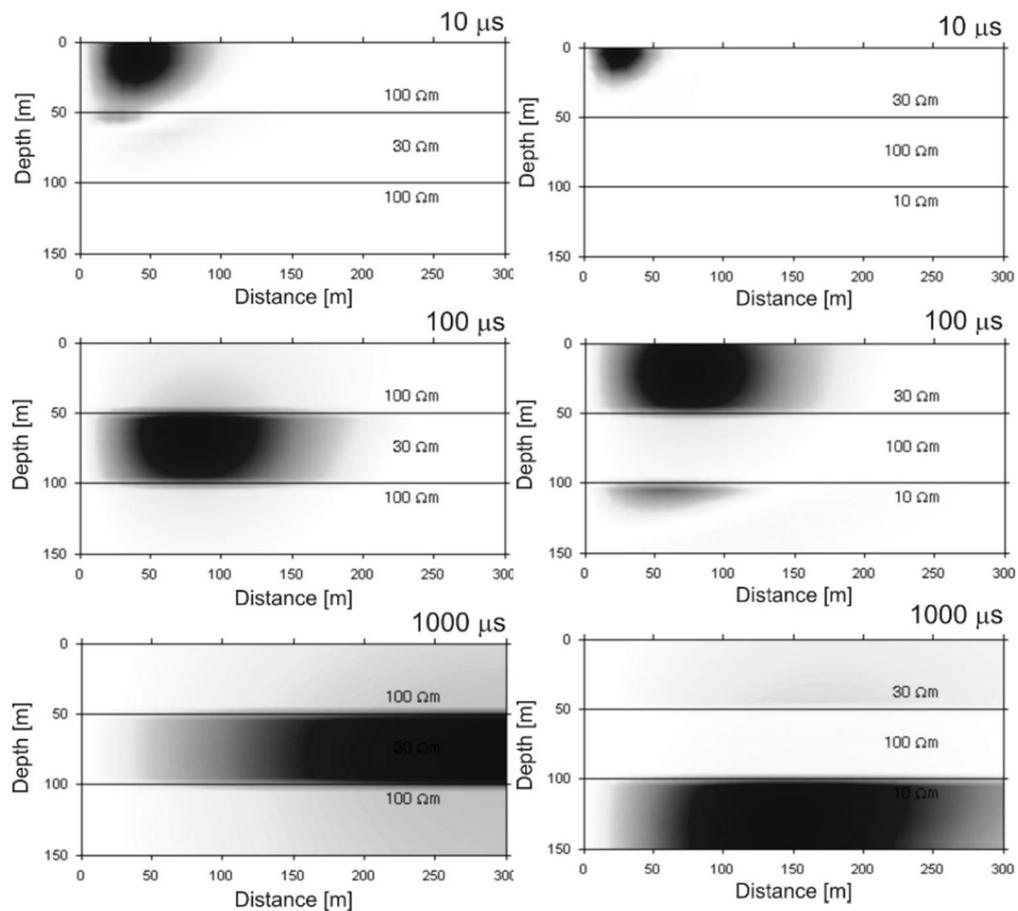


Fig. 11. Densidad de corriente recogida para un pulso de corriente en diferentes tiempos para un medio estratificado con diferentes resistividades. Como podemos ver, la corriente tiende a concentrarse en las capas más conductoras disminuyendo la penetración para un mismo tiempo (Kirsch, 2006)

2.1.4 – Procesado de datos SEDT

Los métodos utilizados, para el procesado de los datos SEDT, son similares a los de los demás métodos de prospección eléctrica. La emf medida, como función del tiempo, se convierte en resistividad aparente, y ésta se introduce en un programa de inversión, que calcula la estratificación de conductividades aparentes mediante el algoritmo de Spiker, con el mejor ajuste posible a la curva de resistividades aparentes observadas.

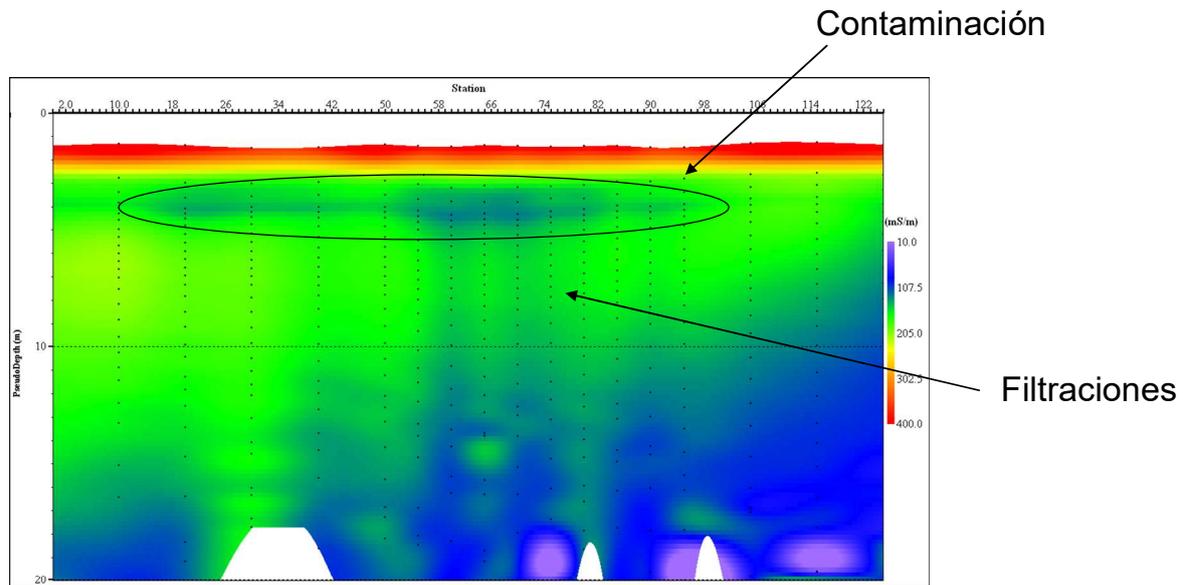


Fig. 12. Ejemplo de Tomografía Electromagnética

2.2.- Equipo empleado

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PARA PROSPECCIÓN ELECTRÓMAGNETICA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO



Fig. 13. Equipo TerraTem

SYSTEM

The terraTEM is a new transient electromagnetic survey system designed and constructed in Australia. It incorporates a 10 Amp transmitter and a true simultaneous 500 kHz 3-component receiver. The unit is powered by an external 24 V battery pack system allowing 6-8 hours of continuous operation. An inbuilt GPS is mounted on the front panel, allows for location information to be automatically recorded with soundings. All connectors are external to the case allowing easy transportation without having to shutdown between sites. The user interface comprises a 15" colour LCD panel and a touch-screen. Menus are designed to allow intuitive and rapid transition between critical acquisition parameters and data display. Spectral analysis, combined with DSP options, allows the user to monitor and identify local sources of noise; these may be removed ultimately using additional filters specific to local site conditions. A diagnostic menu provides access to a spectrum analyser as well as time-domain views of the input signal for rapid troubleshooting or optimisation of acquisition parameters to ambient site conditions. Data is stored in an expandable 1 GByte solid-state memory. This provides the user with essentially unlimited storage space (up to 500,000 soundings), making the terraTEM system ideal for rapid, high-resolution surveys. System parameters are stored automatically with each sounding for post-survey quality assurance.

**SPECIFICATIONS**

	terraTEM	Options
Transmitter Output	10 Amps. (max.)	Enhanced Transmitter
Receivers	1 Channel	3 Channels (simultaneous)
High Resolution Sampling Rates	500 kHz	-
User Selectable Multiple Time Gates	-	Option
Data Visualisation and Processing in field	Standard Software	Enhanced Software
Storage Device – 1 GB Flash Disk	Standard	-
GPS Receiver – 12 channel	-	Option
Communications – Port for Data Transfer	USB and RS-232 Standard	-
External Synchronisation	-	Option
Continuous Recording (with external GPS Interface)	-	Option
Extra Stacking Options and Gain Functions	10 Selectable Gain Settings from 1 to 8,000	Auto Gain
Vectem 3 Interface Module (down-hole)	-	Option
Interface Options (third party devices)	-	Option
Dimensions: Console: 530 x 350 x 160 mm. 13 kg Battery Box: 280 x 250 x 180 mm. 12 kg. Operating Temperature: -10 to 40 degrees C.		

terraTX-50

External terraTEM Transmitter



Fig. 14. Equipo TerraTx-50

Terra TX50

Este aparato es un complemento para dotarle de una mayor potencia al momento inductor. Se



trata del transmisor para esta técnica más potente del mercado en la actualidad.

Technical Specifications

Output Voltage	24, 36, 72 and 96 Volts DC- selectable	Data Visualisation and Processing in field	Standard Software
Output Current	1 – 50 Amps	Display	Including Battery Voltage, Loop Current, Warnings of Overheating and Short-circuit.
Waveform	Bipolar. 50% Duty Cycle. On time equals Off Time	Cooling	Convection by Heat-sink
Turn-off Time	Depending on Loop Inductance and Current. Only 35 usecs on a 100 m loop and 40 A.	Operating Temperature	-20 to +50 degrees C.
Repetition Rate	Controlled by terraTEM to be the same as terraTEM	Operational safety protection	Overvoltage and Short-circuit protection
Synchronisation	Cable or GPS Timing	Dimensions	45 x 32 x 15 cm.
		Weight	10 kg.

2.3.- Software

Los sistemas de información se han convertido en herramientas muy efectivas de la ingeniería y de las ciencias básicas. A lo largo de los años se han desarrollado infinidad de programas que nos permiten, manipular, organizar, analizar y referenciar datos de manera más fácil y eficiente, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son prueba de ello.

Los SIG son un tipo especializado de sistemas que se distinguen por su capacidad de manejar información espacialmente georeferenciable y que permiten además su representación gráfica.

La manera de almacenamiento de la información es fundamental, dicha información puede ser muy variada, pues toma en cuenta características del mundo real, permite disponer de información tanto de cuerpos y figuras regulares que son bien representados por la geometría tradicional, como información que no podrá ser representada de manera clara y trivial. Si se considera que la mayoría de la información geofísica no es regular, entonces, estos sistemas representan una manera eficiente de organizar, manejar y manipular ésta información.

A continuación, se especifican las herramientas SIG (Software) utilizadas para la realización del proyecto:

2.3.1.- RockWorks

RockWorks es la última versión del buque insignia RockWare. Es un programa para el análisis y visualizado de datos del subsuelo, cartografía, geología, modelos de yacimiento, manipulación de datos de pozos, estructurales, estratigráficos, geofísicos y geoquímicos, útil para estudios geotécnicos, mineros, petrolíferos, etc, etc...

RockWorks ha sido durante mucho tiempo la norma en los sectores del petróleo, ambientales, geotécnicos, la minería y las industrias de visualización de datos del subsuelo a



causa de instrumentos populares, tales como mapas, los troncos, las secciones transversales, valla diagramas, modelos sólidos y volumétricos.

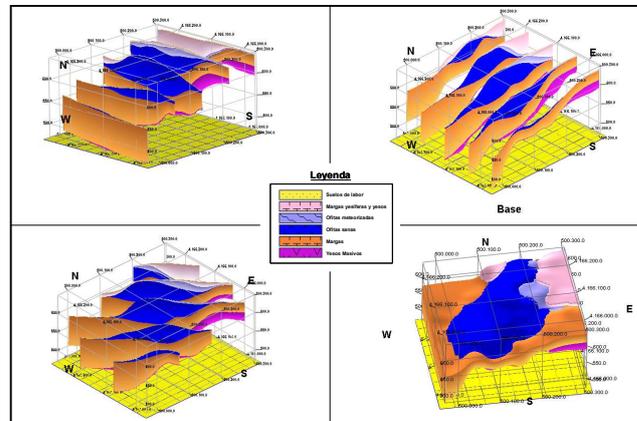


Figura 15. Visualización 3D de datos geológicos obtenidos mediante geofísica con RockWorks

2.3.2.- Google earth

Google Earth es un completísimo atlas interactivo en tres dimensiones. Las capas son el gran atractivo de Google Earth. Cada una añade a las imágenes del satélite una cantidad enorme de información: redes de carreteras, edificios en tres dimensiones, datos de tráfico y meteorología, lugares de interés e incluso fotografías de las calles en las ciudades donde Street View esté disponible. Además, permite la inclusión de tus propias capas.

No todo es explorar sin rumbo fijo. Google Earth puede guardar imágenes y marcadores para compartirlos en la red, así como imprimir lo que estás viendo. Con las herramientas de Google Earth, medir distancias o áreas es muy fácil. Además, es compatible con varios formatos de datos GPS. Además, en Google Earth hay incluso un sencillo simulador de vuelo.

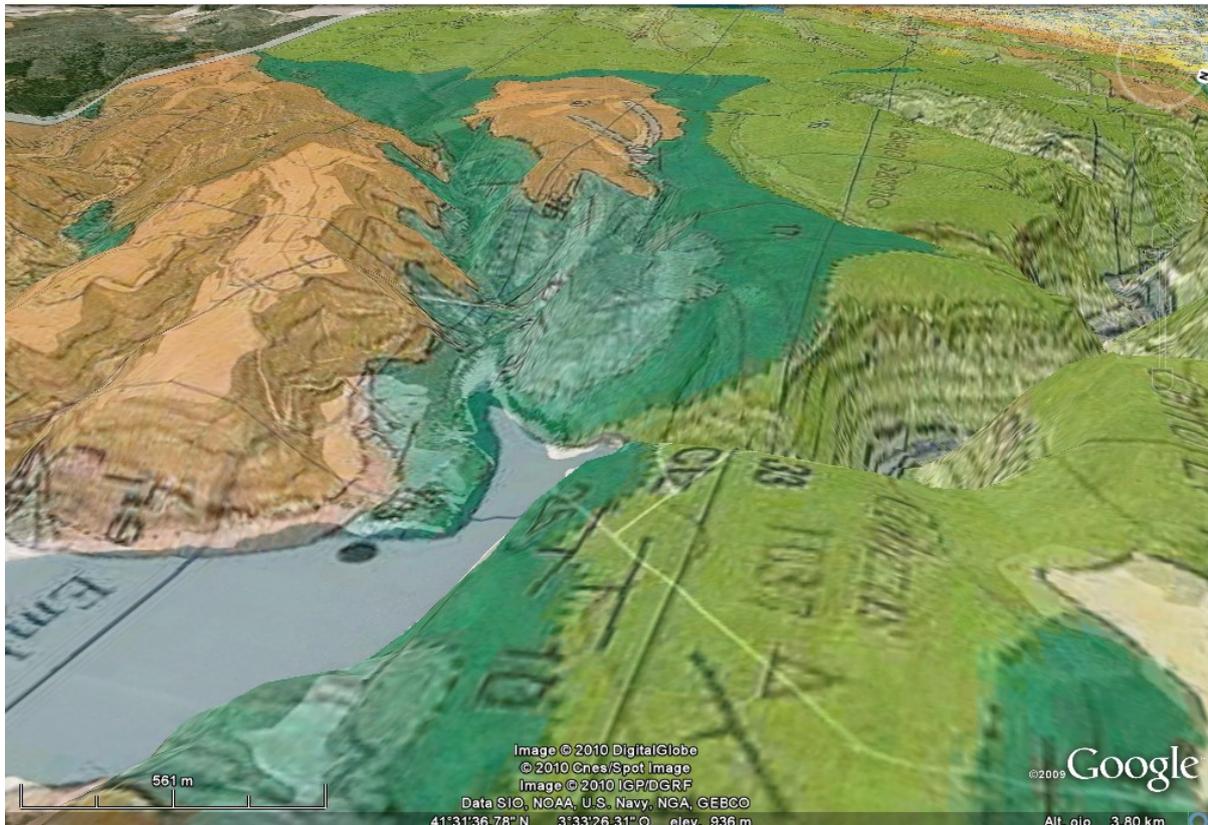


Figura 16. Visualización de capa geológica incluida en Google Earth.

2.3.3.- Oasis Montaj

Oasis Montaj es un poderoso software para el mapeo y procesamiento, fue desarrollado por Geosoft para ayudar y simplificar las resoluciones de sus problemas, a través de un conjunto elaborado de recursos fáciles de utilizar que cubren y superan los crecientes estándares globales.

Principales recursos:

- Elaborar mapas profesionales
- Visualización 3D de subsuelo
- Interoperabilidad perfecta
- Enlace dinámico de datos
- Gridaje avanzado
- Base de datos de gran desempeño
- Tecnología de búsqueda integrada
- Catalogación de datos espaciales
- Rápido procesamiento de datos
- Completa Integración ESRI
- Soporte multi-idiomas Unicode
- Extensiones montaj
- Compartir datos



- Oasis Montaj Viewer
- Fácil digitalización
- Wireframing

Oasis Montaj es uno de los softwares que desbancaran al resto de programas en el campo de la geofísica por contener todo lo necesario para realizar tu proyecto o estudio geofísico, sin necesidad de utilizar más softwares.

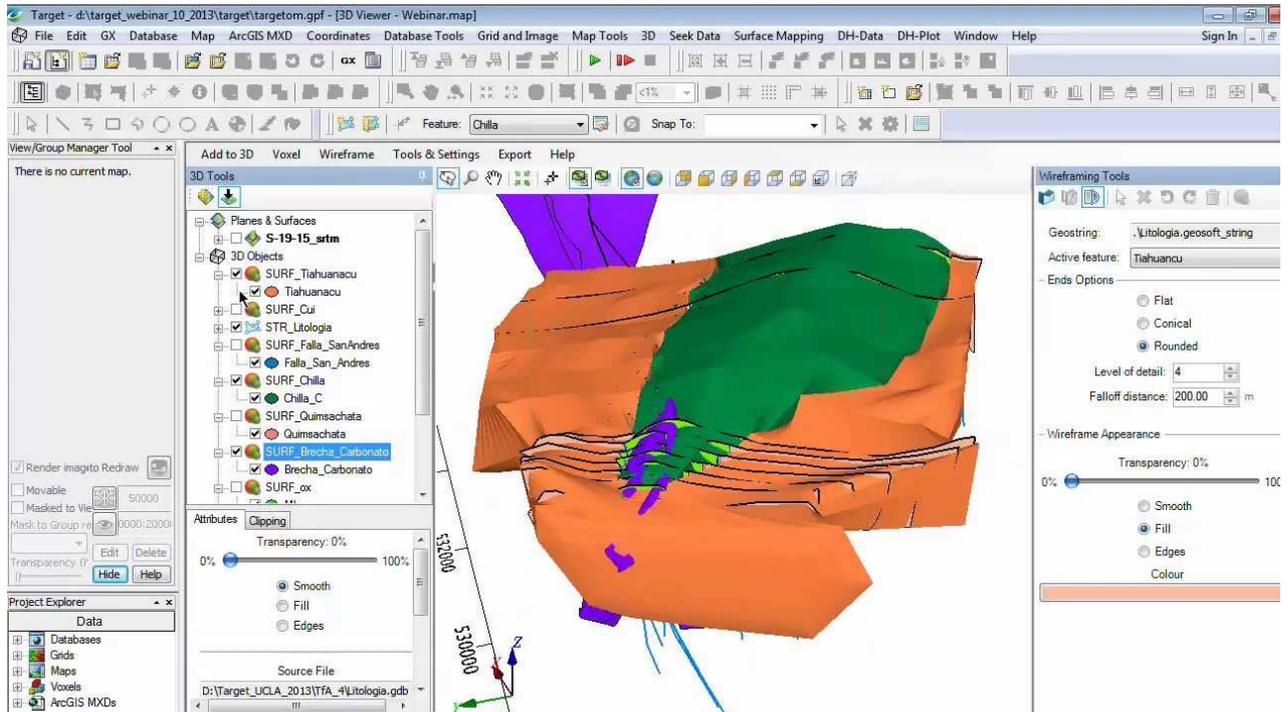


Figura 17. Visualización 3D de datos geológicos en Oasis Montaj



III.- METODOLOGÍA, RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS

Para llevar a cabo las investigaciones propuestas en este proyecto, se realizó una campaña de prospección geofísica en la provincia de Ávila más concretamente en el término municipal de Pozanco.

En esta campaña, se aplicaron la metodología geofísica que más se adaptaba a la problemática encontrada. Posteriormente se introdujeron los datos en programas de gestión de información espacial para modelar, visualizar rápidamente y examinar los datos geofísicos de forma global. El objetivo fue siempre la de caracterizar el problema de la forma más detallada posible.

3.1.- Estudio hidrogeológico en el término municipal de Pozanco (Ávila) mediante Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo.

3.1.1.- Introducción

El presente informe recoge los resultados obtenidos en la campaña de investigación geofísica mediante Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (en adelante SEDT) realizada en el término municipal de Pozanco (Ávila).

El objetivo de la investigación ha sido la caracterización de los materiales que conforman la zona estudiar con el fin de delimitar los diferentes acuíferos.

La zona de estudio se encuentra emplazada al norte del municipio de pozanco indicado en la siguiente figura.

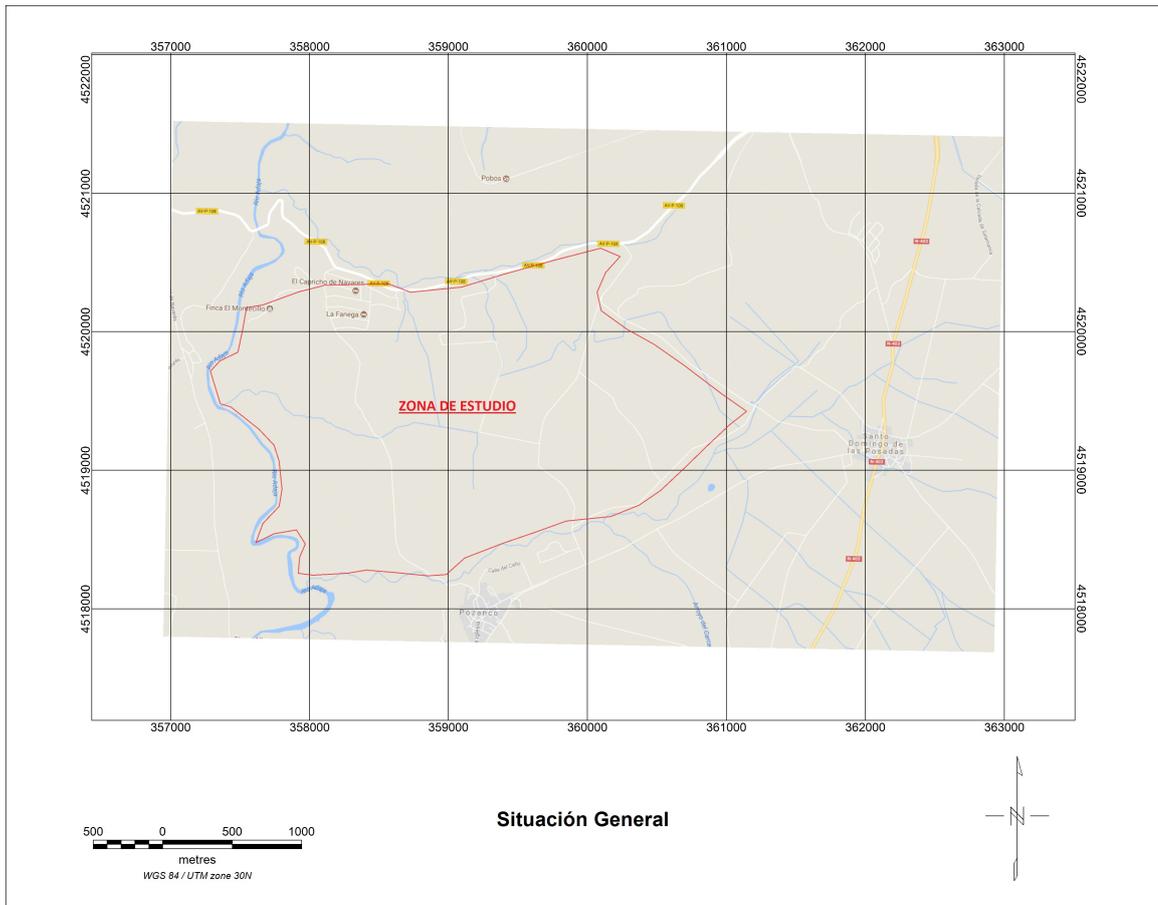


Figura 18. Situación general del Estudio.

3.1.2.- Geología e Hidrogeología

3.1.2.1.- Geología

El área de estudio se localiza en el borde Sur de la Cuenca del Duero, sobre materiales de edad Terciaria y Cuaternaria.

Dichos materiales quedan integrados por depósitos litológicos de tipo detrítico: arcillas, limos, arenas y gravas, dispuestos en estratos de geometría tabular y disposición paralela-subparalela.

A continuación, se describen las siguientes unidades litológicas:

Unidad litológica Cuaternaria:

Se localiza a nivel superficial, conformando el aluvial de los ríos y arroyos de la zona. La unidad está integrada por depósito de gravas y cantos intercalados con arcillas y arenas. El espesor medio varía de unas zonas a otras dentro del aluvial siendo el espesor medio del mismo de 3-5 metros.



Unidad litológica Terciaria:

Litológicamente está constituida por una alternancia de arcillas, limos y arenas.

Las arenas son de naturaleza arcósica estando mineralógicamente formadas por granos de cuarzo, feldespatos y micas, así como por fragmentos de naturaleza ígnea y metamórfica (esquistos y granitos).

Las arenas se organizan según cuerpos sedimentarios de geometría lenticular a tabular, espesor decimétrico a métrico y disposición horizontal y aleatoria dentro de la unidad sin una cadencia clara, por lo que se establece una variabilidad en cuanto a su localización tanto vertical como horizontal.

Las arcillas y limos, por su parte, engloban a los niveles de arena aislándolos en mayor o menor grado según el lugar de localización.

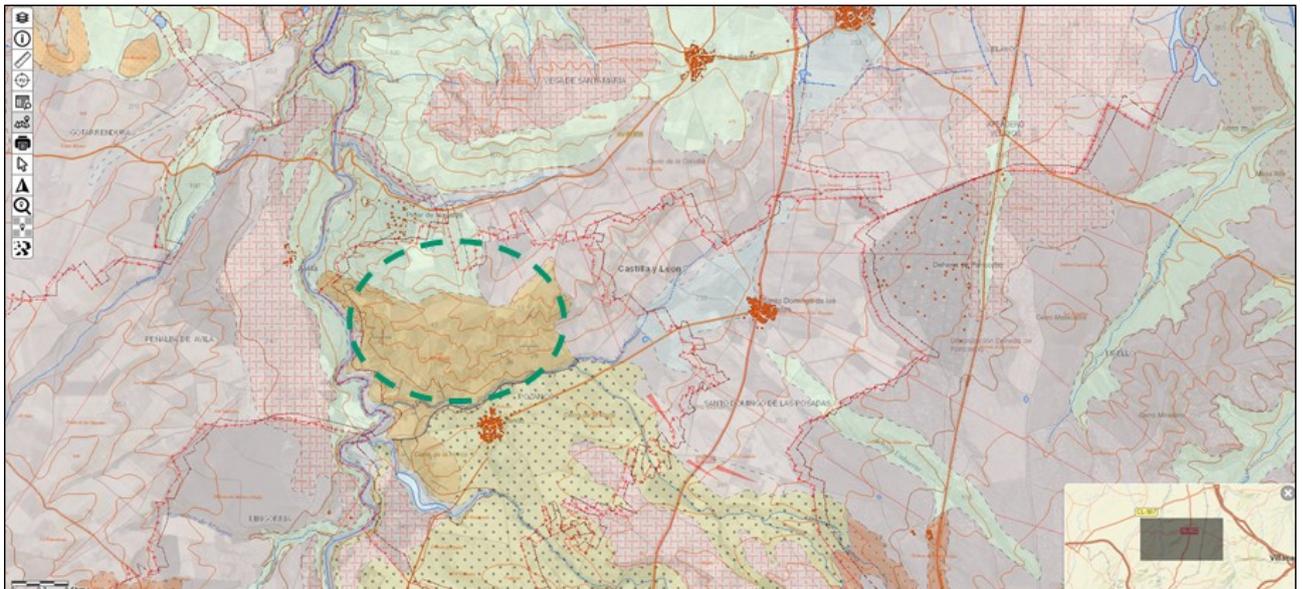


Figura 19. Visor Web Igme en nuestra zona de estudio.

3.1.2.1.- Hidrogeología

A efectos hidrogeológicos en el área investigada se encuentra el Terciario detrítico del Duero, el cual es el acuífero más importante de la región. Se trata de materiales de tipo detrítico, arenas, limos y arcillas que se han depositado en un medio continental rellenando la cubeta del Duero, cuyo zócalo en esta zona es de edad paleozoica. En esta zona además existen conglomerados y areniscas de edad Eocena.

Al tratarse de una cuenca continental en la que la sedimentación fluvial ha jugado un papel principal, las arenas están dispuestas en capas lenticulares de escasa continuidad lateral. Su distribución espacial es aparentemente aleatoria y lo que diferencia las zonas es la frecuencia de los lentejones arenosos, la permeabilidad de los mismos y, sobre todo, lo que es más importante, la permeabilidad de la matriz que los engloba. Estas capas lenticulares de arenas y gravillas



englobadas en una matriz más o menos semipermeable, se comportan en conjunto como un gran acuífero heterogéneo y anisótropo, confinado o semiconfinado según zonas.

En líneas generales el flujo subterráneo se dirige hacia el río Duero, situado al Norte. La calidad del agua es buena y los caudales de los sondeos varían entre 10 y 30 l/s.

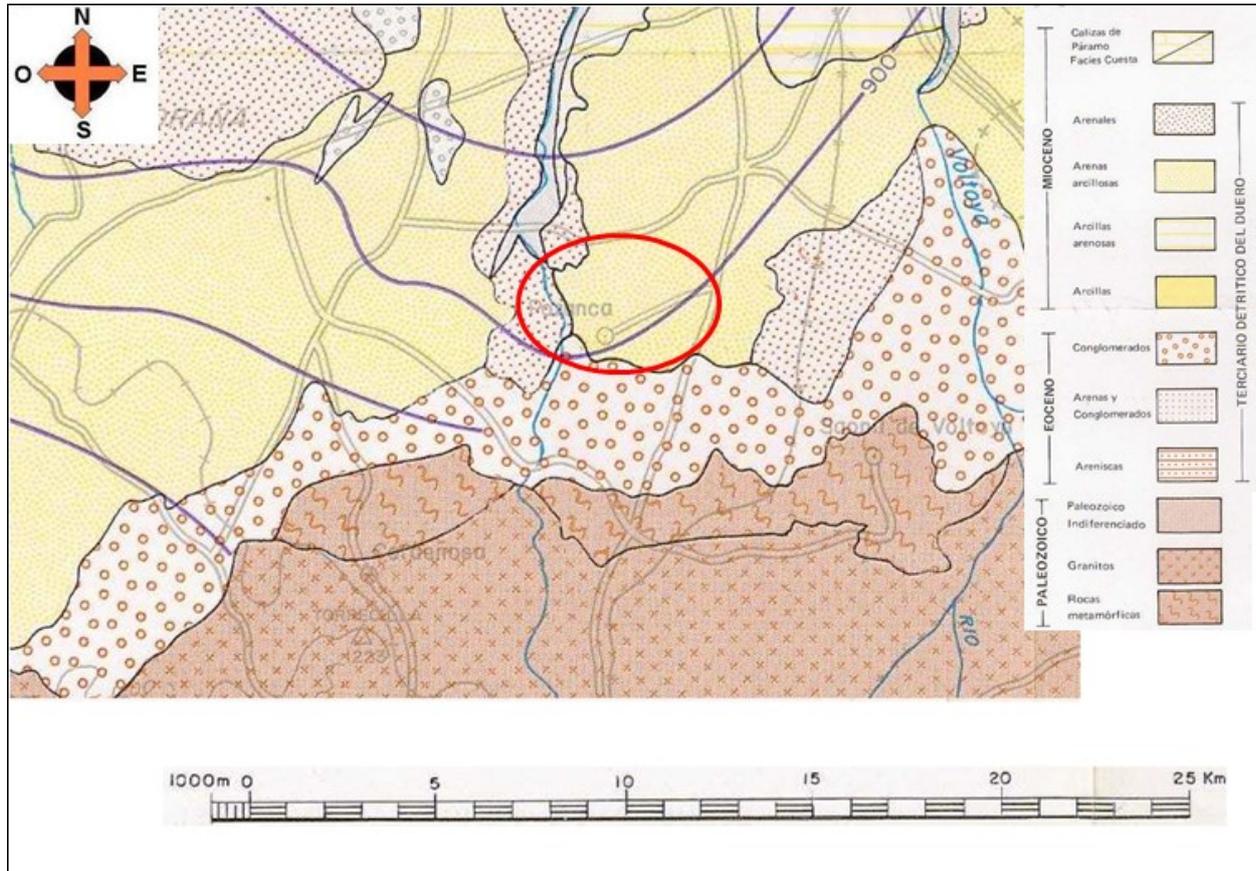


Figura 20. Plano Hidrogeológico.

3.1.3. Trabajos realizados

Los trabajos realizados se iniciaron con el reconocimiento fotogeológico de la zona, posterior visita al campo para confirmar los datos obtenidos en fotogeología, reconocimiento hidrogeológico, y observación de sondeos. Este trabajo se planteó como fase previa al planteamiento de la campaña de prospección geofísica.

La investigación geofísica llevada a cabo consistió en la realización de 30 bucles (16 de 200 x 200 m. y 14 de 100 x 100 m. de longitud) distribuidos por la zona a investigar dentro del término municipal de Pozanco (Ávila).

Los dispositivos de medida utilizados fueron el de “single loop” y “coincident loop” realizándose para cada implantación una reiteración de medidas con la finalidad de obtener una mayor precisión en los datos de campo (transitorios).



Los bucles realizados se georreferenciaron en campo con coordenadas UTM, quedando representados en el siguiente plano.

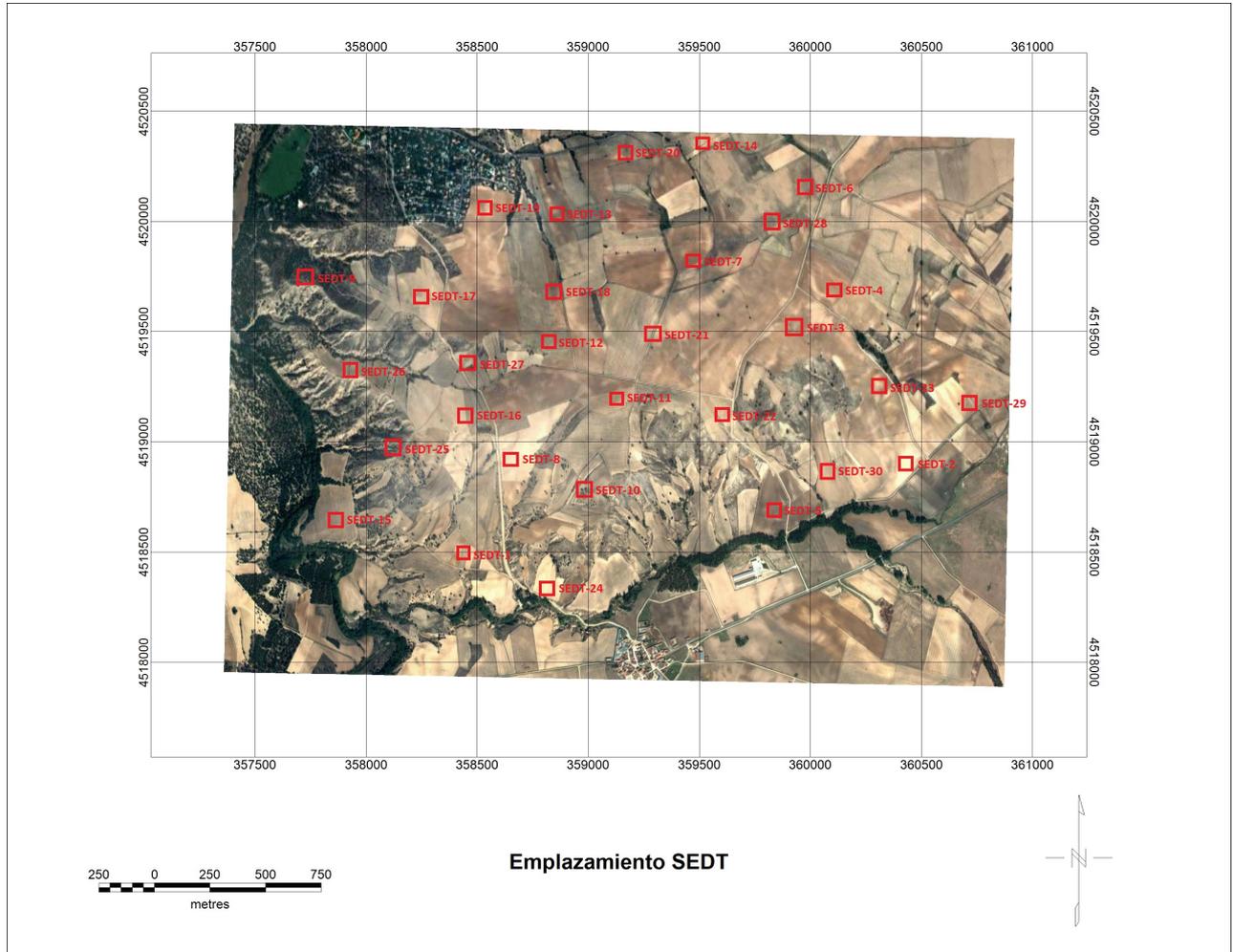


Figura 21. Emplazamiento SEDT.

COORDENADAS DE LOS SEDT

Nº SEDT	X	Y
SEDT-1	358.561	4.518.726
SEDT-2	360.521	4.529.134
SEDT-3	360.033	4.519.746
SEDT-4	360.209	4.519.906
SEDT-5	359.937	4.518.906
SEDT-6	360.097	4.520.410
SEDT-7	359.581	4.520.034
SEDT-8	358.237	4.519.130
SEDT-9	357.845	4.519.986
SEDT-10	359.085	4.519.010
SEDT-11	359.229	4.519.430
SEDT-12	358.941	4.519.666



SEDT-13	358.973	4.520.258
SEDT-14	359.613	4.520.582
SEDT-15	357.957	4.518.866
SEDT-16	358.553	4.519.338
SEDT-17	358.349	4.519.878
SEDT-18	358.981	4.519.898
SEDT-19	358.633	4.520.282
SEDT-20	359.277	4.520.538
SEDT-21	359.401	4.519.714
SEDT-22	359.697	4.519.350
SEDT-23	360.405	4.519.474
SEDT-24	358.905	4.518.562
SEDT-25	358.237	4.519.186
SEDT-26	358.037	4.519.546
SEDT-27	358.565	4.519.546
SEDT-28	359.945	4.520.214
SEDT-29	360.813	4.519.410
SEDT-30	360.173	4.519.094

3.1.4. Registros elaborados

Para cada SEDT se ha obtenido al menos 1 registro, utilizando un staking de 1000 repeticiones de la medida por cada canal.

En cada registro se ha medido un total de 98 canales, aunque es evidente que los últimos canales están afectados por el ruido de fondo, superior a la señal a medir. También los primeros canales están afectados por la rampa, por lo que tanto los primeros canales como los últimos son desechados a la hora del procesado.

A continuación, se presentan un ejemplo de registro obtenido en la presente campaña en los que se muestra en primer lugar los datos del SEDT como son: el equipo utilizado, la localización, el número de canales medidos, número de sondeo, tamaño del bucle, tiempo de la rampa de disparo, frecuencia, etc.

Posteriormente figura el listado del registro, en el que se puede ver el número de canal, el tiempo que le corresponde a ese canal y la medida del transitorio en nanovoltios.

REGISTRO DEL TRANSITORIO OBTENIDO PARA EL SEDT-10

```
//USF: Universal Sounding Format
//SOUNDINGS: 1
//END
/ARRAY: SINGLE LOOP TEM
/DATE: 20080208
/DAYTIME: 12.72
/INSTRUMENT: "terraTEM"
```




```
/LOCATION: 0.00, 0.00, 0.0  
/VOLTAGE_UNITS: V/AMP  
/POINTS: 98  
/SOUNDING_NUMBER: 1  
/SOUNDING_NAME: 0.0000  
/SWEEPS: 1  
/SWEEP_NUMBER: 1  
/CURRENT: 1.0  
/COIL_LOCATION: 0.00 0.00  
/COIL_SIZE: 40000.00  
/LOOP_SIZE: 200.00, 200  
/RAMP_TIME: 3.2424E-04  
/FREQUENCY: 2.778  
/TIME_DELAY: 0.0  
/END
```

INDEX,	TIME,	VOLTAGE
1,	1.5000E-06,	9.1198555E-02
2,	3.5000E-06,	9.1198555E-02
3,	5.5000E-06,	9.1198555E-02
4,	7.5000E-06,	9.1198555E-02
5,	9.5000E-06,	9.1198555E-02
6,	1.1500E-05,	9.1198555E-02
7,	1.3500E-05,	9.1198555E-02
8,	1.5500E-05,	9.1198555E-02
9,	1.8500E-05,	9.1198555E-02
10,	2.2500E-05,	9.1198555E-02
11,	2.6500E-05,	9.1198555E-02
12,	3.0500E-05,	9.1198555E-02
13,	3.4500E-05,	9.1198555E-02
14,	3.8500E-05,	9.1198555E-02
15,	4.2500E-05,	9.1198555E-02
16,	4.6500E-05,	9.1198555E-02
17,	5.2500E-05,	9.1198555E-02
18,	6.0500E-05,	9.1198555E-02
19,	6.8500E-05,	9.1198555E-02
20,	7.6500E-05,	9.1198555E-02
21,	8.4500E-05,	9.1198555E-02
22,	9.2500E-05,	9.1198555E-02
23,	1.0050E-04,	9.1198555E-02
24,	1.0850E-04,	9.1198555E-02
25,	1.2050E-04,	9.1198555E-02
26,	1.3650E-04,	9.1198555E-02
27,	1.5250E-04,	9.1198555E-02
28,	1.6850E-04,	9.1198555E-02
29,	1.8450E-04,	9.1198555E-02
30,	2.0050E-04,	9.1198555E-02



31,	2.1650E-04,	9.1198555E-02
32,	2.3250E-04,	9.1198555E-02
33,	2.5650E-04,	9.1198539E-02
34,	2.8850E-04,	9.1198539E-02
35,	3.2050E-04,	9.1198539E-02
36,	3.5250E-04,	9.1198539E-02
37,	3.8450E-04,	8.9465047E-02
38,	4.1650E-04,	8.4269109E-02
39,	4.4850E-04,	8.0988391E-02
40,	4.8050E-04,	7.8836859E-02
41,	5.2850E-04,	7.2531688E-02
42,	5.9250E-04,	5.4305707E-02
43,	6.5650E-04,	4.1104266E-02
44,	7.2050E-04,	3.2138768E-02
45,	7.8450E-04,	2.5763838E-02
46,	8.4850E-04,	2.1073326E-02
47,	9.1250E-04,	1.7524490E-02
48,	9.7650E-04,	1.4780055E-02
49,	1.0725E-03,	1.1748182E-02
50,	1.2005E-03,	8.8890879E-03
51,	1.3285E-03,	6.9372407E-03
52,	1.4565E-03,	5.5506465E-03
53,	1.5845E-03,	4.5313789E-03
54,	1.7125E-03,	3.7632136E-03
55,	1.8405E-03,	3.1709075E-03
56,	1.9685E-03,	2.7029568E-03
57,	2.1605E-03,	2.1786008E-03
58,	2.4165E-03,	1.6737344E-03
59,	2.6725E-03,	1.3222731E-03
60,	2.9285E-03,	1.0679219E-03
61,	3.1845E-03,	8.7795642E-04
62,	3.4405E-03,	7.3319849E-04
63,	3.6965E-03,	6.2037677E-04
64,	3.9525E-03,	5.3000745E-04
65,	4.3365E-03,	4.2791312E-04
66,	4.8485E-03,	3.2864319E-04
67,	5.3605E-03,	2.5905197E-04
68,	5.8725E-03,	2.0778783E-04
69,	6.3845E-03,	1.6985118E-04
70,	6.8965E-03,	1.4088268E-04
71,	7.4085E-03,	1.1772521E-04
72,	7.9205E-03,	9.9938255E-05
73,	8.6885E-03,	7.9380432E-05
74,	9.7125E-03,	5.9695812E-05
75,	1.0736E-02,	4.5977669E-05
76,	1.1761E-02,	3.6162861E-05
77,	1.2784E-02,	2.8760029E-05



78,	1.3809E-02,	2.3367800E-05
79,	1.4832E-02,	1.9319250E-05
80,	1.5857E-02,	1.5944936E-05
81,	1.7392E-02,	1.2312724E-05
82,	1.9441E-02,	9.0564356E-06
83,	2.1488E-02,	6.6391792E-06
84,	2.3537E-02,	5.1450191E-06
85,	2.5584E-02,	3.9886827E-06
86,	2.7633E-02,	3.1754122E-06
87,	2.9680E-02,	2.5925496E-06
88,	3.1729E-02,	2.0983100E-06
89,	3.4800E-02,	1.5620388E-06
90,	3.8897E-02,	1.1016698E-06
91,	4.2992E-02,	7.9258782E-07
92,	4.7089E-02,	5.9559274E-07
93,	5.1184E-02,	3.9777809E-07
94,	5.5281E-02,	3.4159595E-07
95,	5.9377E-02,	2.2914554E-07
96,	6.3472E-02,	1.6373424E-07
97,	6.9617E-02,	7.3536582E-08
98,	7.7808E-02,	3.4575626E-08

3.1.5. Resultados obtenidos

En los estudios electromagnéticos, en su modalidad de SEDT, interpretado en 2D, las pseudosecciones resultantes constituyen unas secciones de curvas de iso-resistividades que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado. Esta variación de resistividad obedece fundamentalmente a cambios litológicos, aunque puede darse el caso de que dentro de la misma formación geológica aparezcan tramos de diferente resistividad, debido a otro tipo de factores.

Del procesamiento de las curvas de SEDT se han obtenido los correspondientes modelos de resistividad, espesor y profundidad para cada SEDT, los cuales se adjuntan, junto a las curvas de SEDT procesadas, en ANEXOS.

Los diferentes SEDT realizados se han agrupado de acuerdo con una serie de perfiles y enumerados del 1 al 8.

En estos perfiles aparecen tramos de diferente resistividad a los cuales hemos asignado distintas tramas de color, para dar una interpretación lo más coherente posible con el modelo geológico de la zona.

Las correlaciones establecidas para los perfiles realizados han permitido cartografiar la morfología y litología de las formaciones. A continuación, mostraremos la situación de cada perfil y su interpretación.

Los planos de situación de cada perfil fueron realizados mediante Oasis Montaj y sus



perfiles interpretados mediante Rockworks

Para poder delimitar las diferentes litologías se utilizó la siguiente leyenda.

<u>Leyenda</u>	
	Brechas y areniscas, arcosas con cantos alternando con arenas arcillosas y arenas (Permeable)
	Alternancia de arcillas y arcillas arenosas con niveles de arenas (Permeabilidad diferencial)
	Alternancia de arcillas con menor densidad de niveles de arenas (Permeabilidad diferencial)
	Conglomerados silíceos y areniscas microconglomeráticas + Esquistos (Impermeable)



3.1.5.1. Perfil nº 1

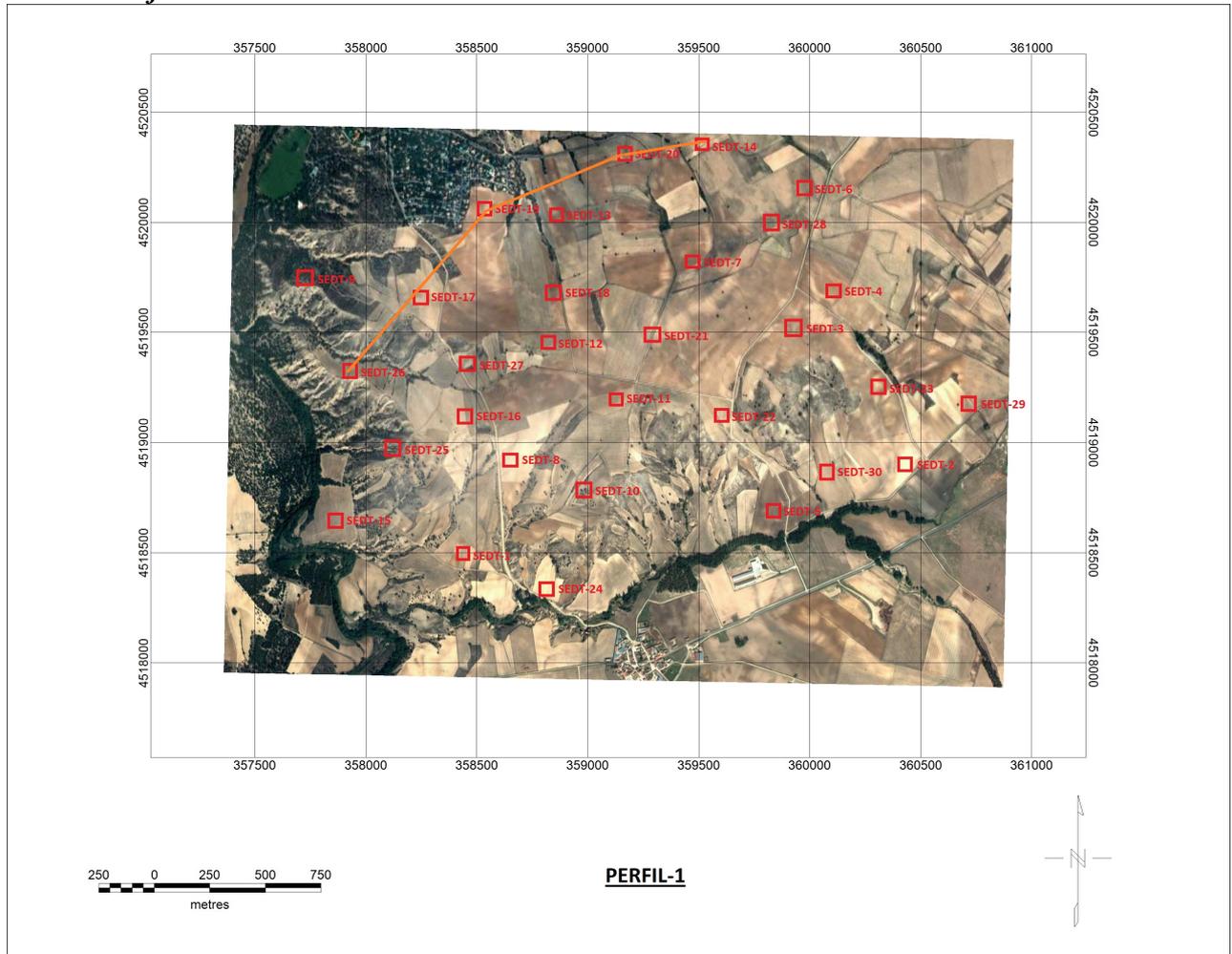


Figura 22. Situación Perfil nº 1

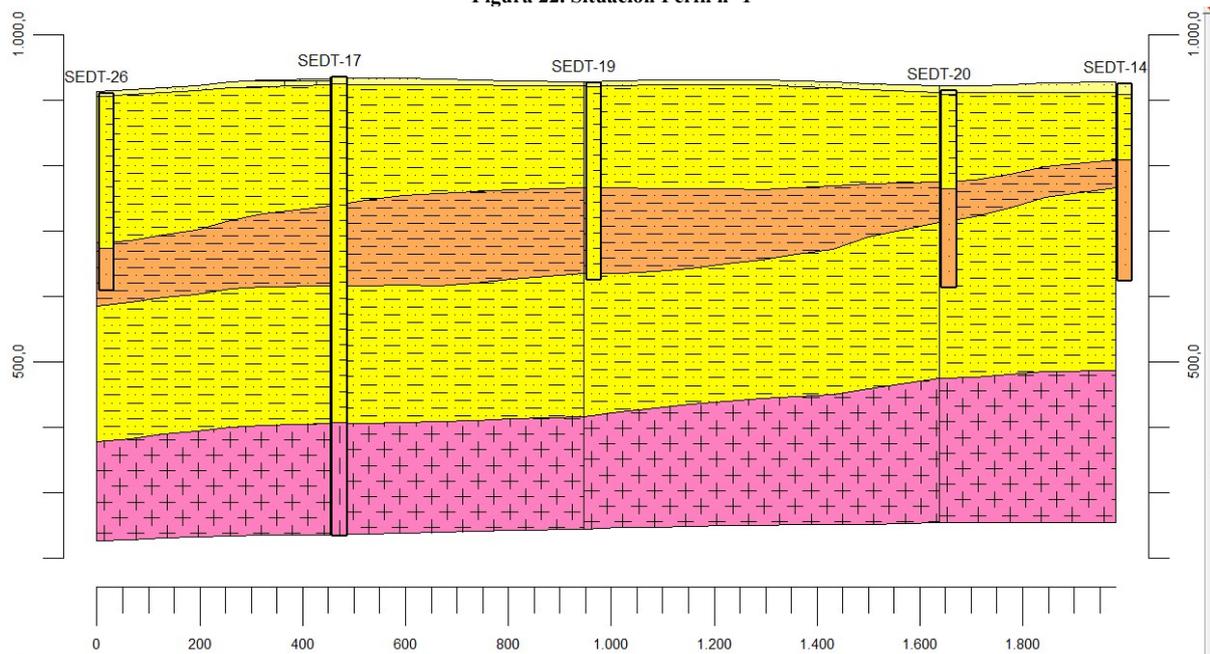


Figura 23. Perfil nº 1 interpretado



3.1.5.2. Perfil nº 2

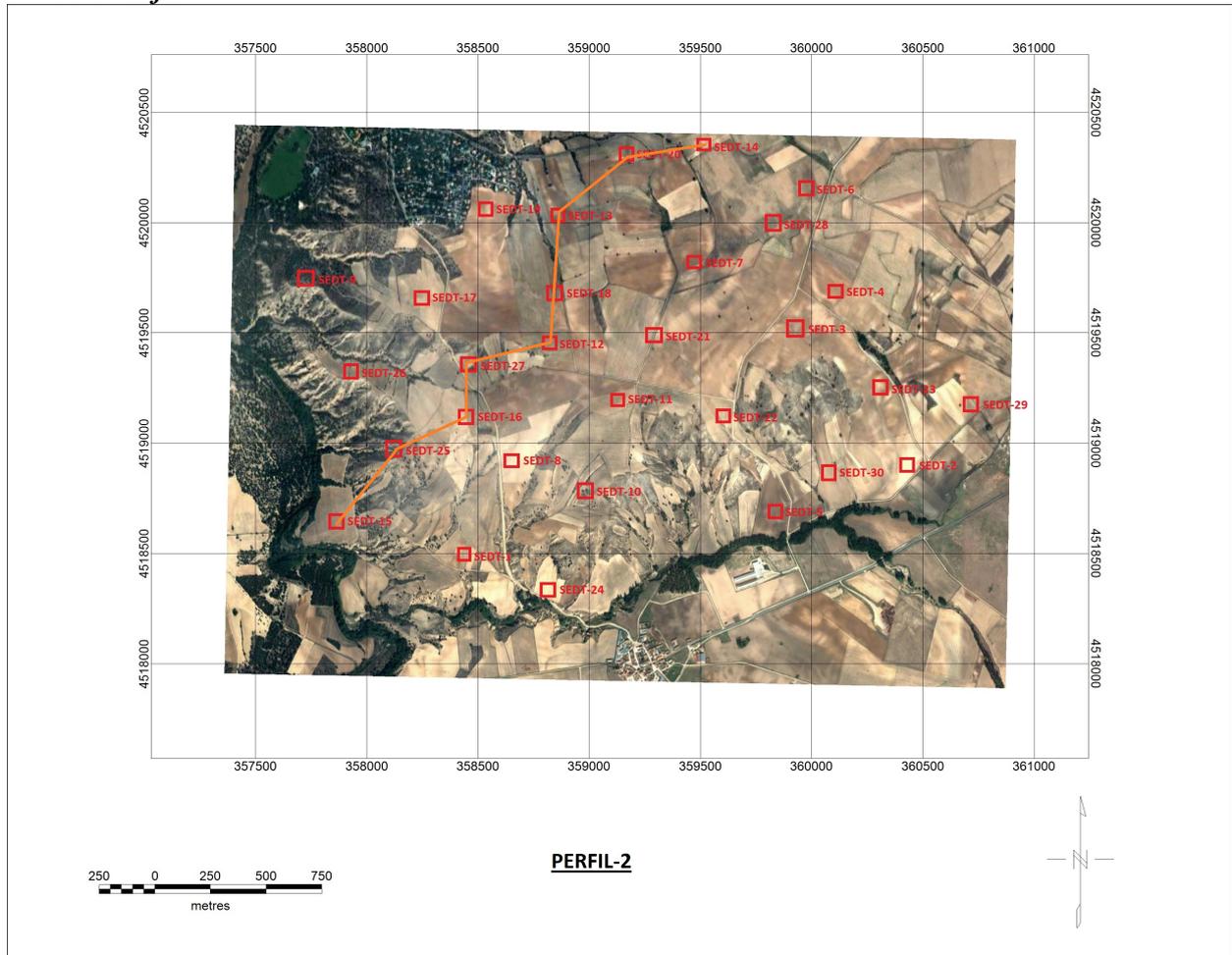


Figura 24. Situación Perfil nº 2

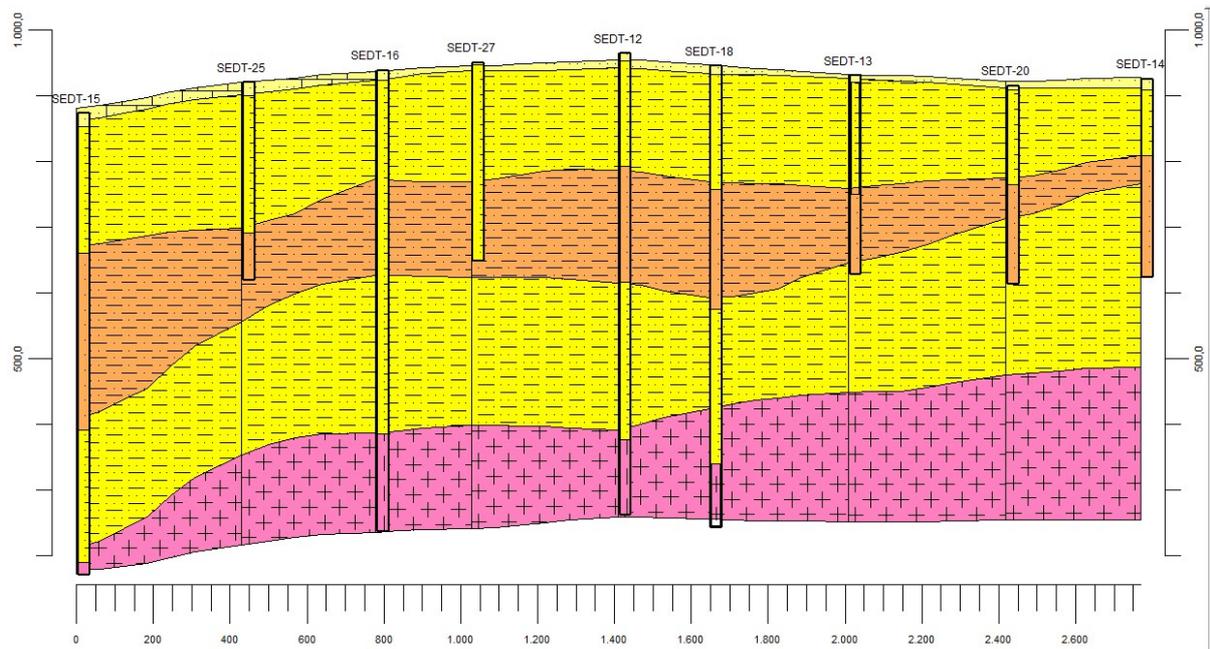


Figura 25. Perfil nº 2 interpretado



3.1.5.3. Perfil nº 3

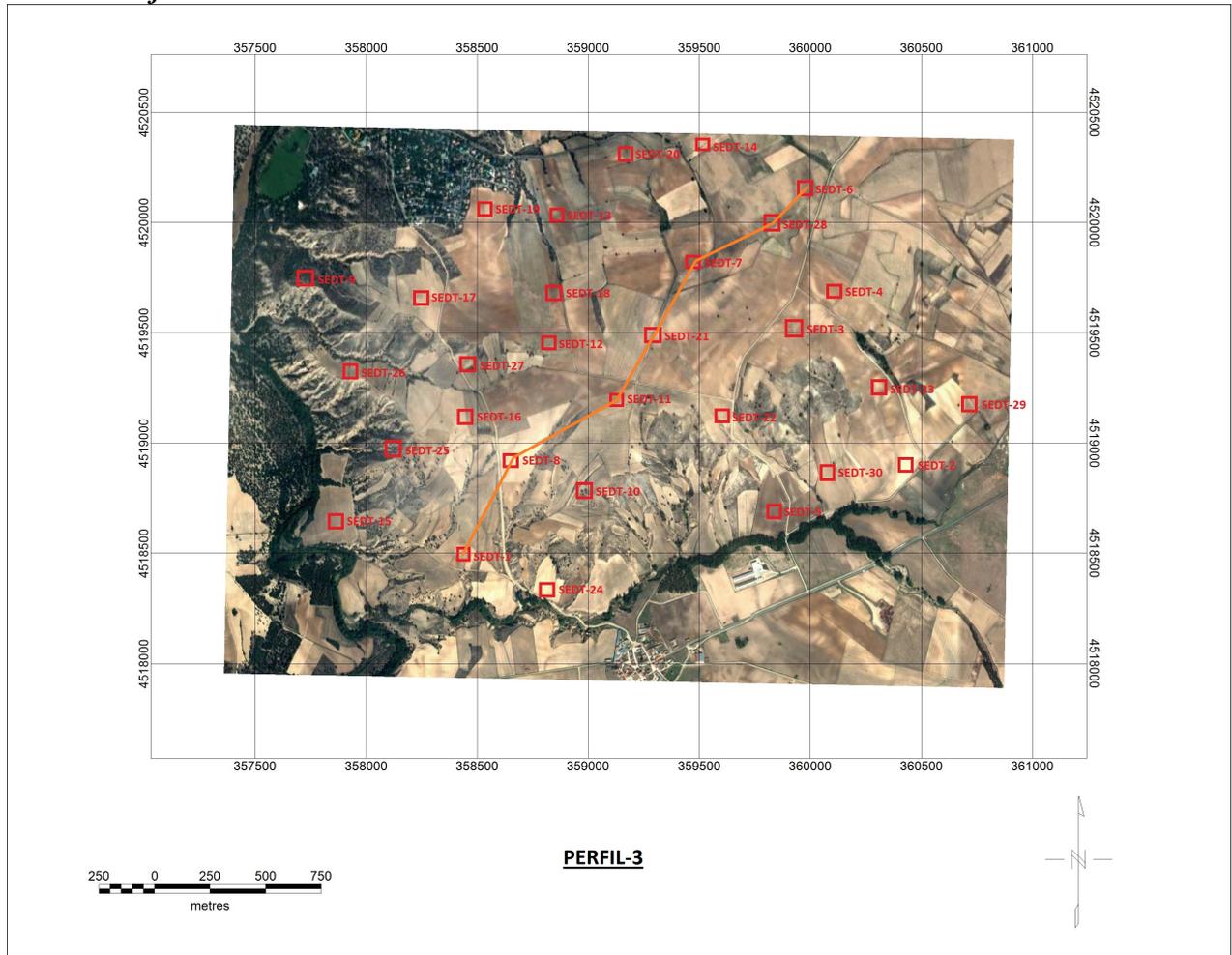


Figura 26. Situación Perfil nº 3

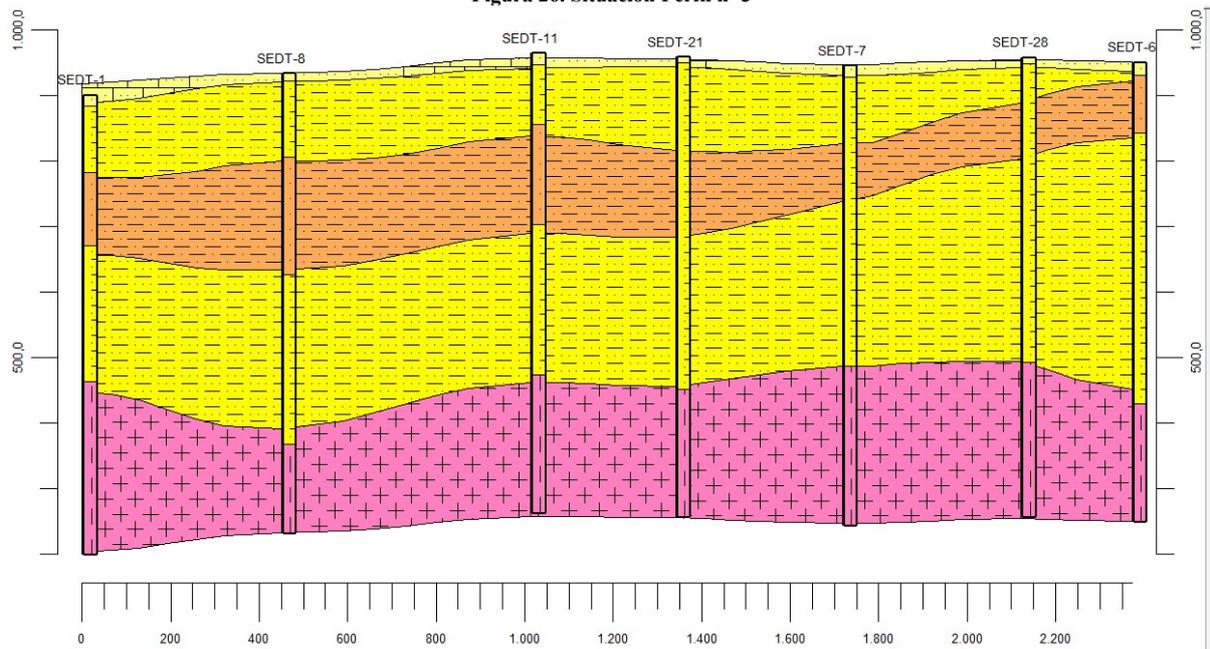


Figura 27. Perfil nº 3 interpretado



3.1.5.4. Perfil nº 4

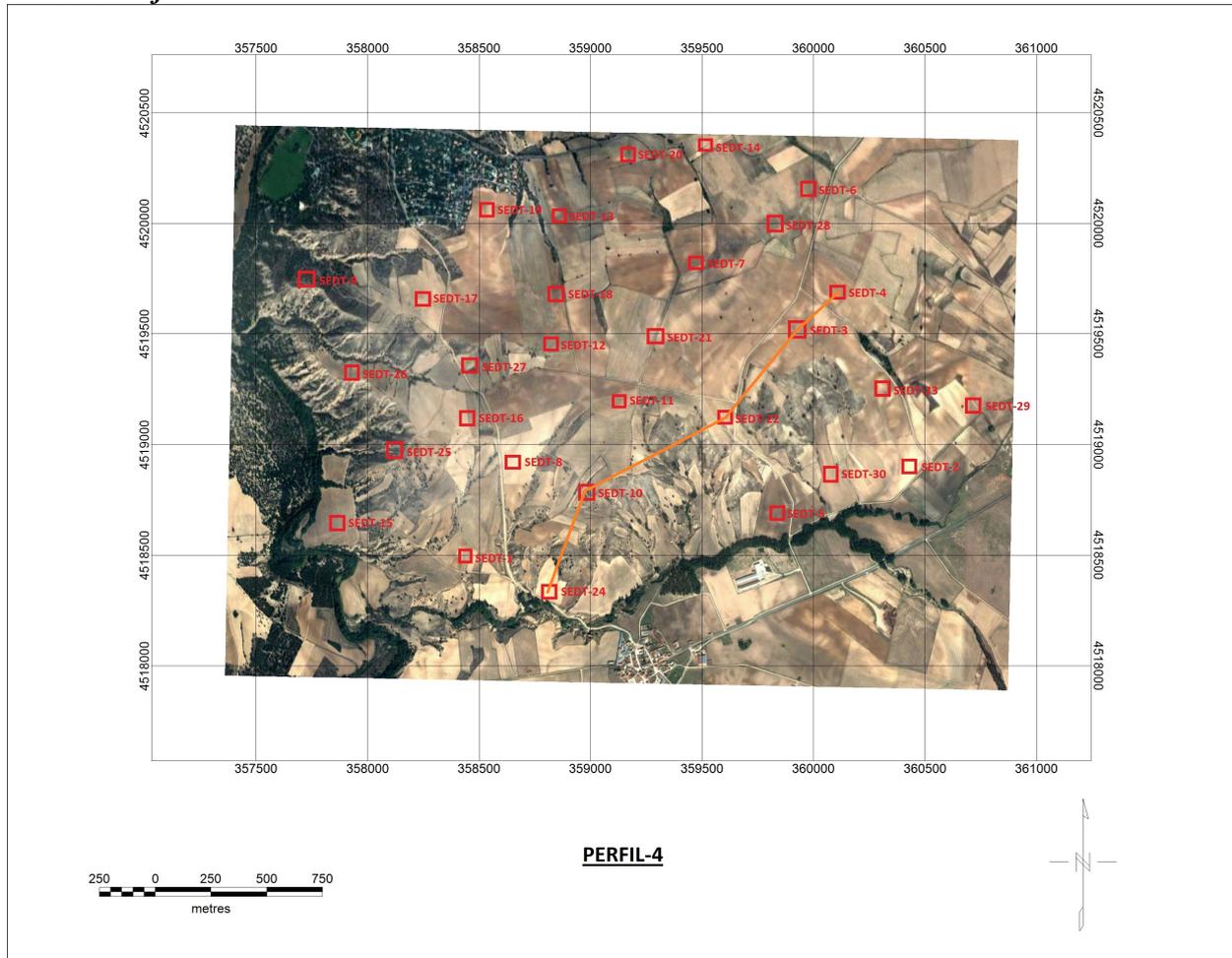


Figura 28. Situación Perfil nº 4

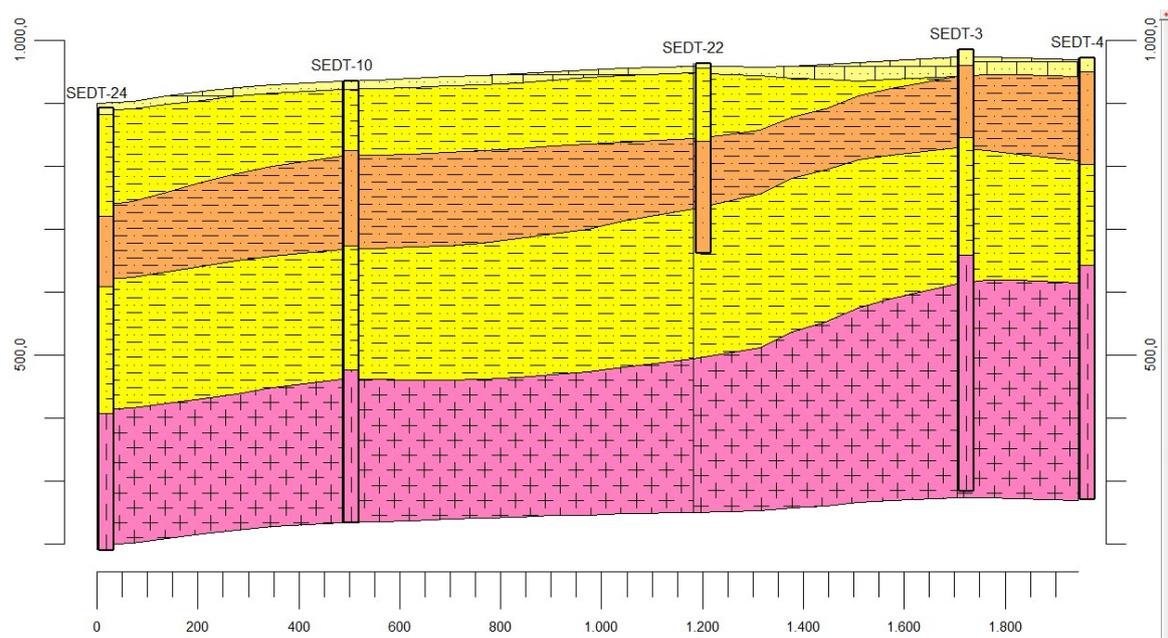


Figura 29. Perfil nº 4 interpretado



3.1.5.5. Perfil nº 5

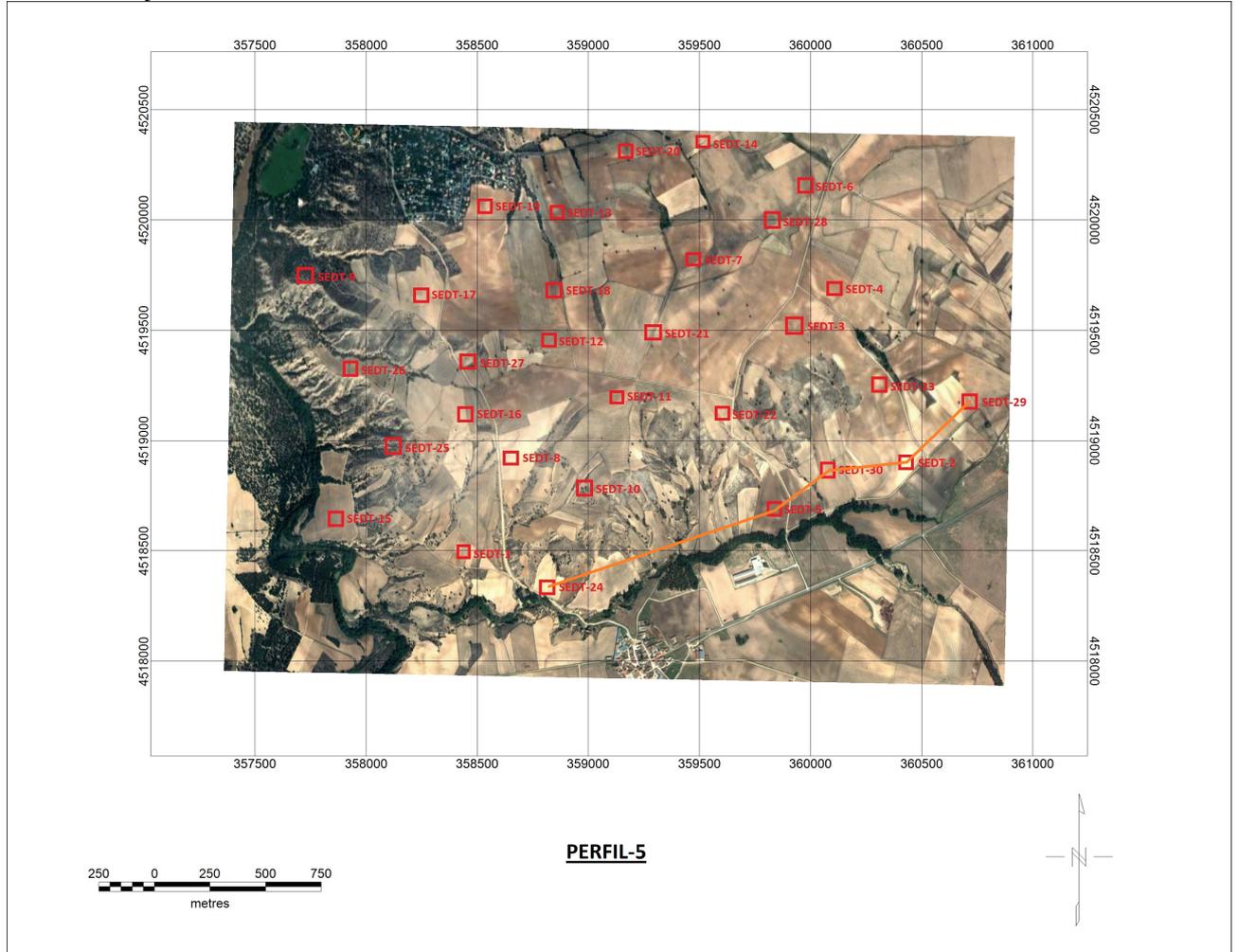


Figura 30. Situación Perfil nº 5

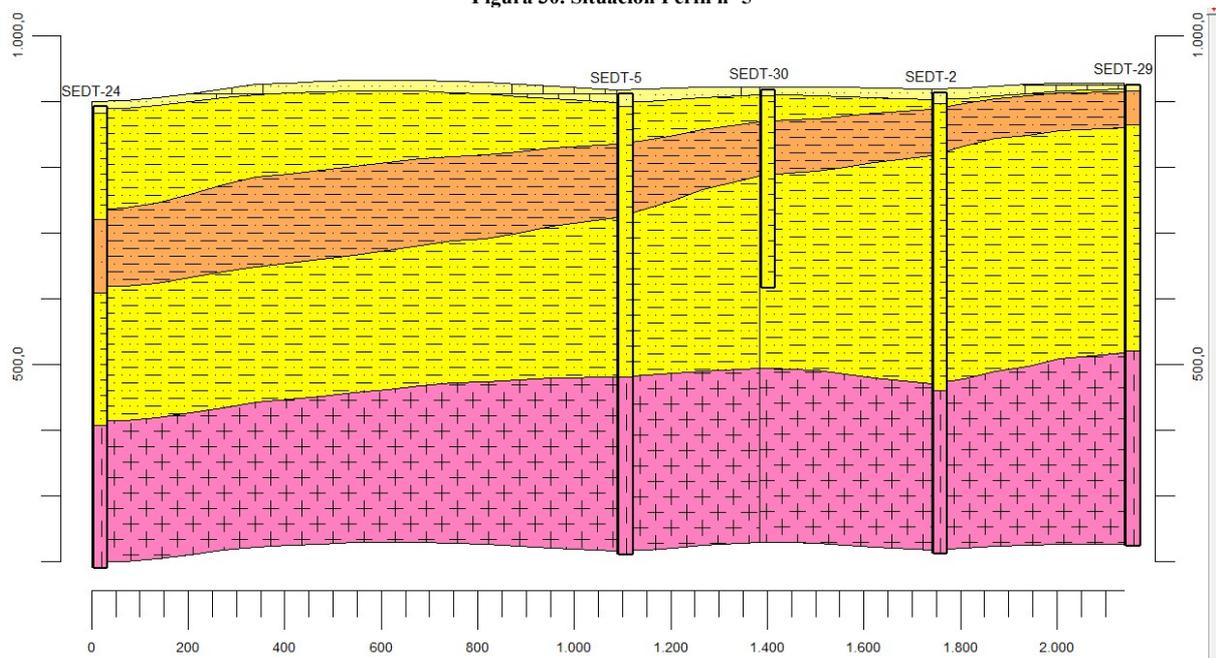


Figura 31. Perfil nº 5 interpretado



3.1.5.6. Perfil nº 6

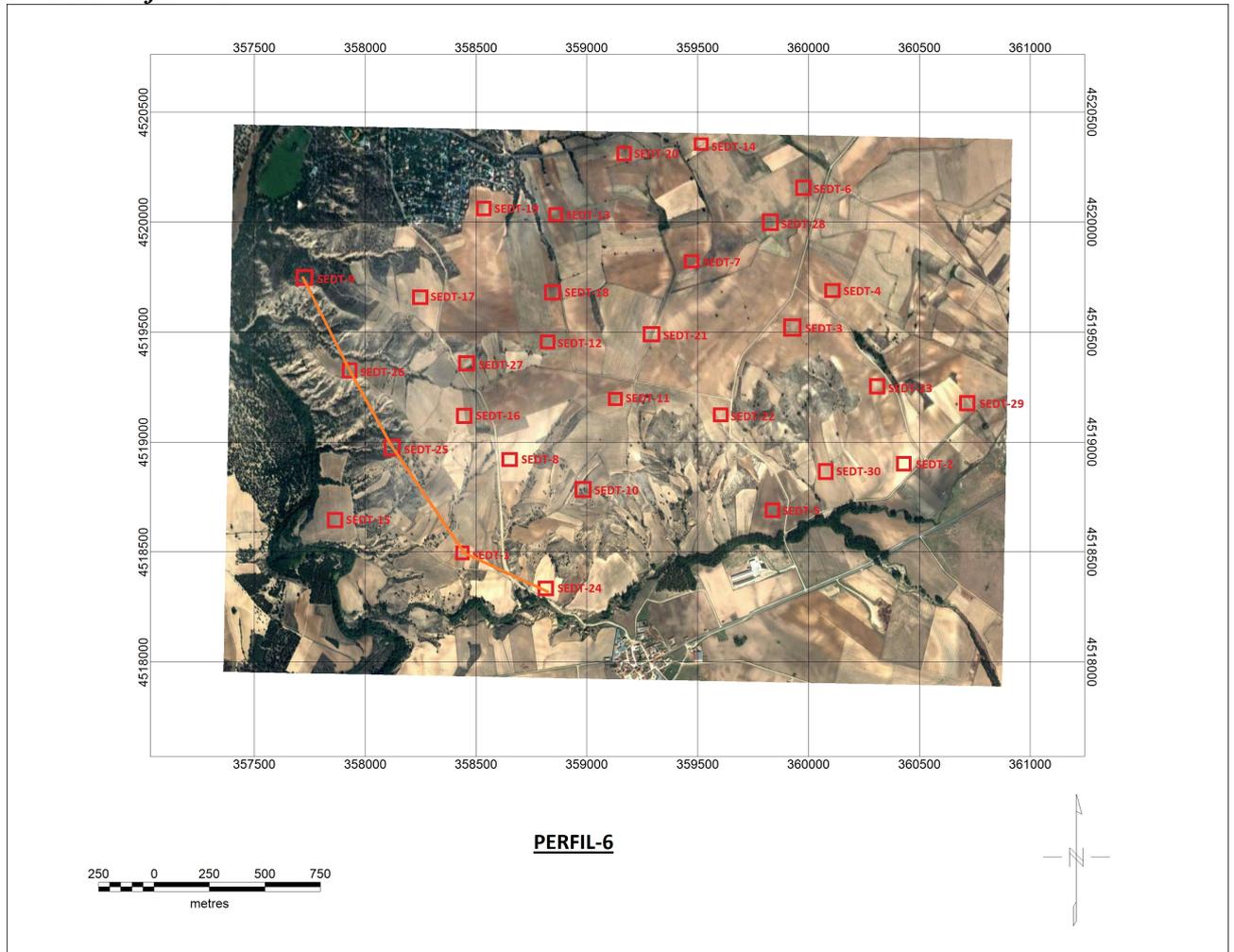


Figura 32. Situación Perfil nº 6

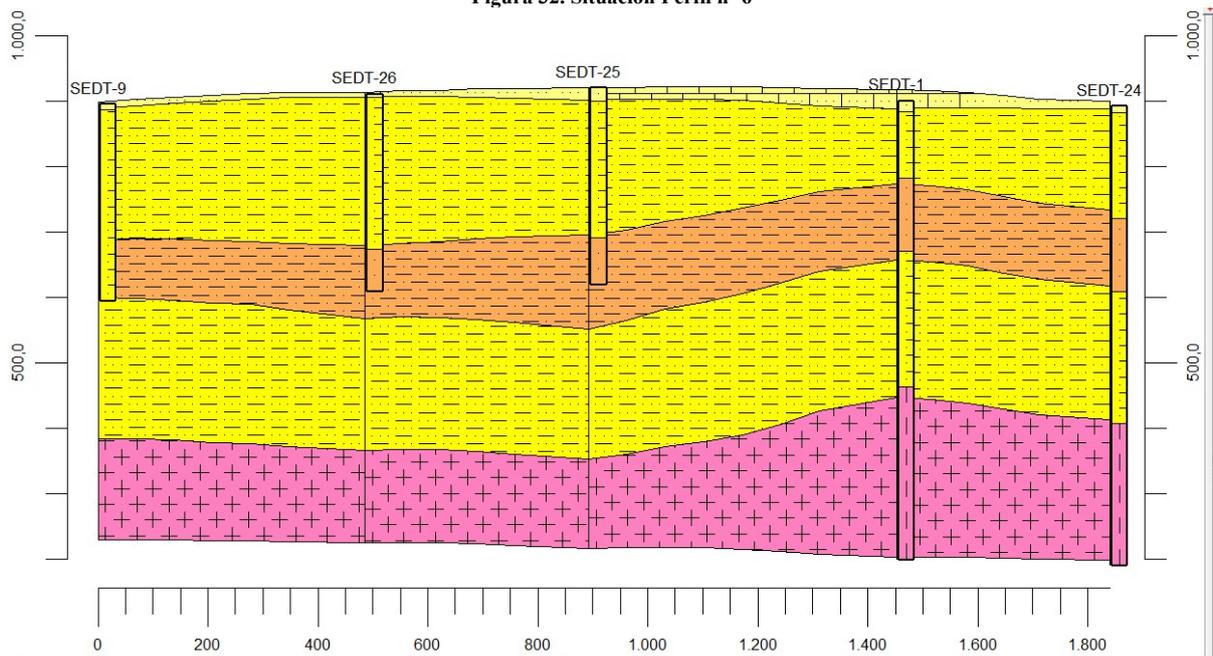


Figura 33. Perfil nº 6 interpretado



3.1.5.7. Perfil n° 7

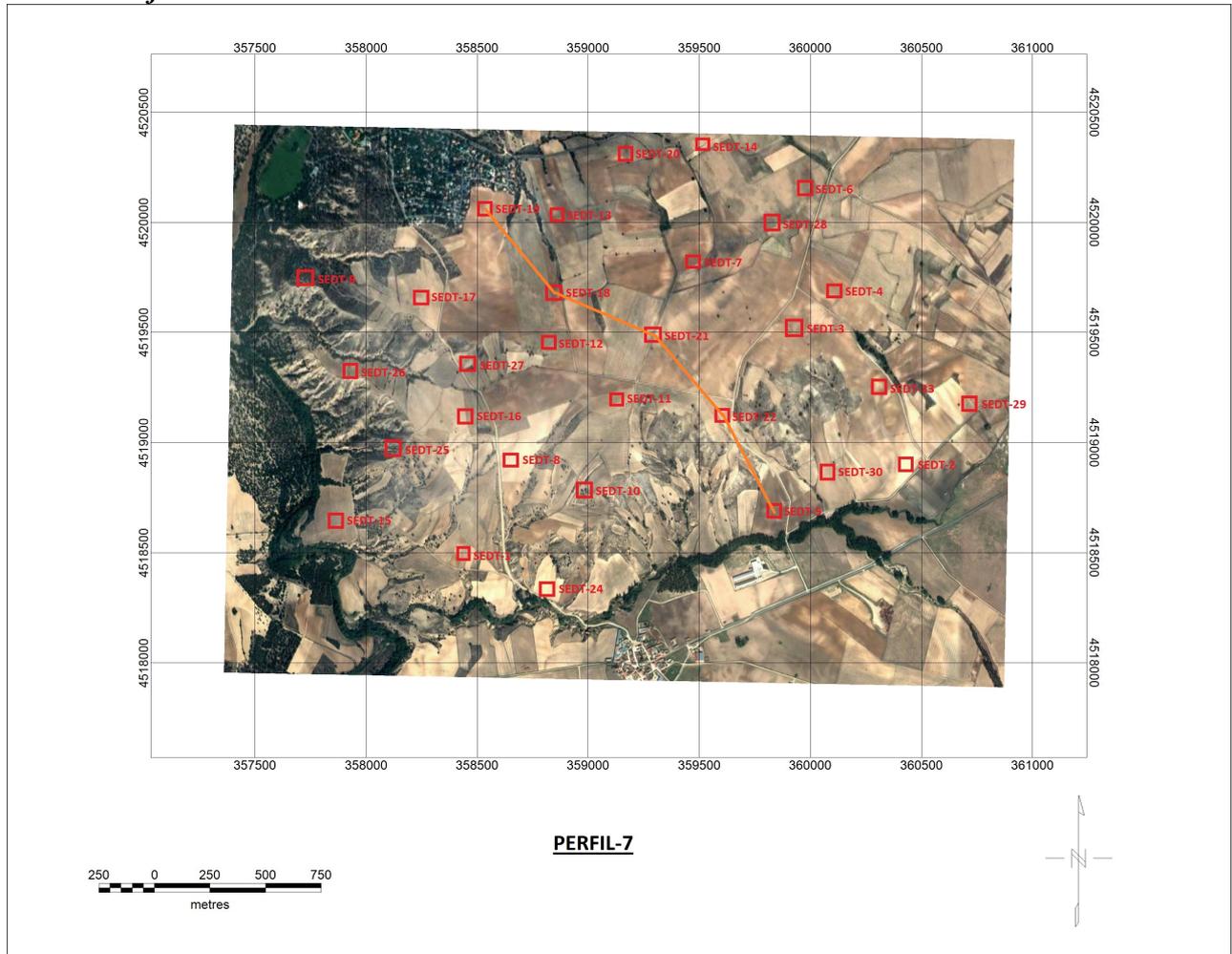


Figura 34. Situación Perfil n° 7

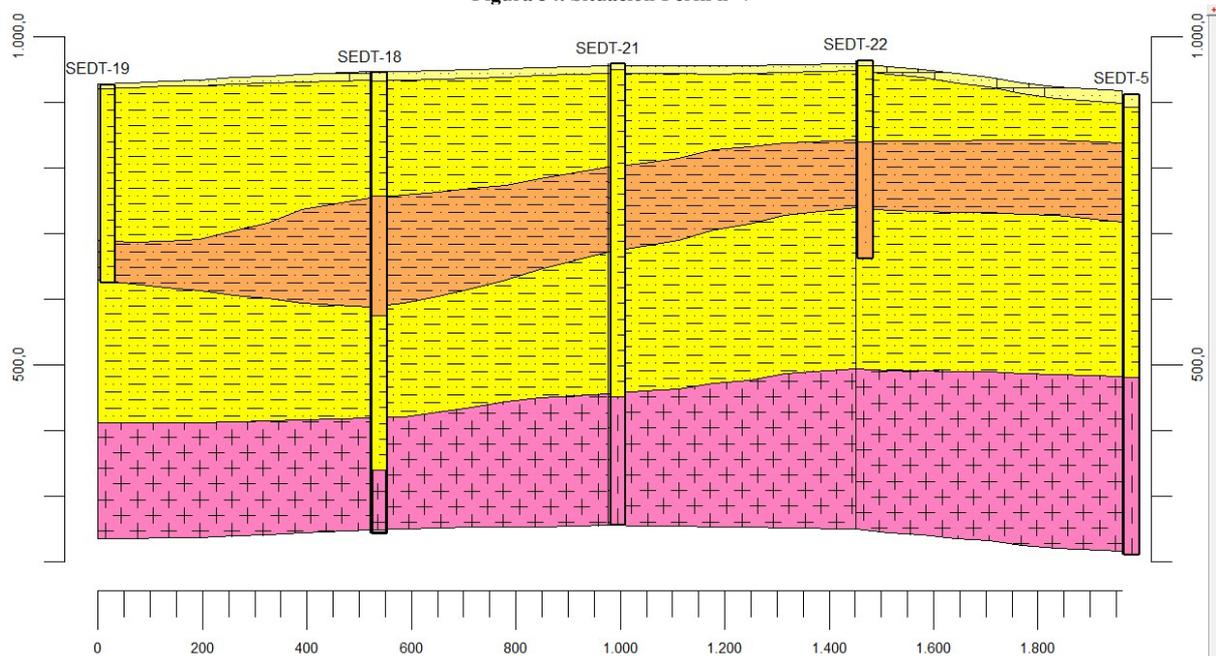


Figura 35. Perfil n° 7 interpretado



3.1.5.8. Perfil n° 8

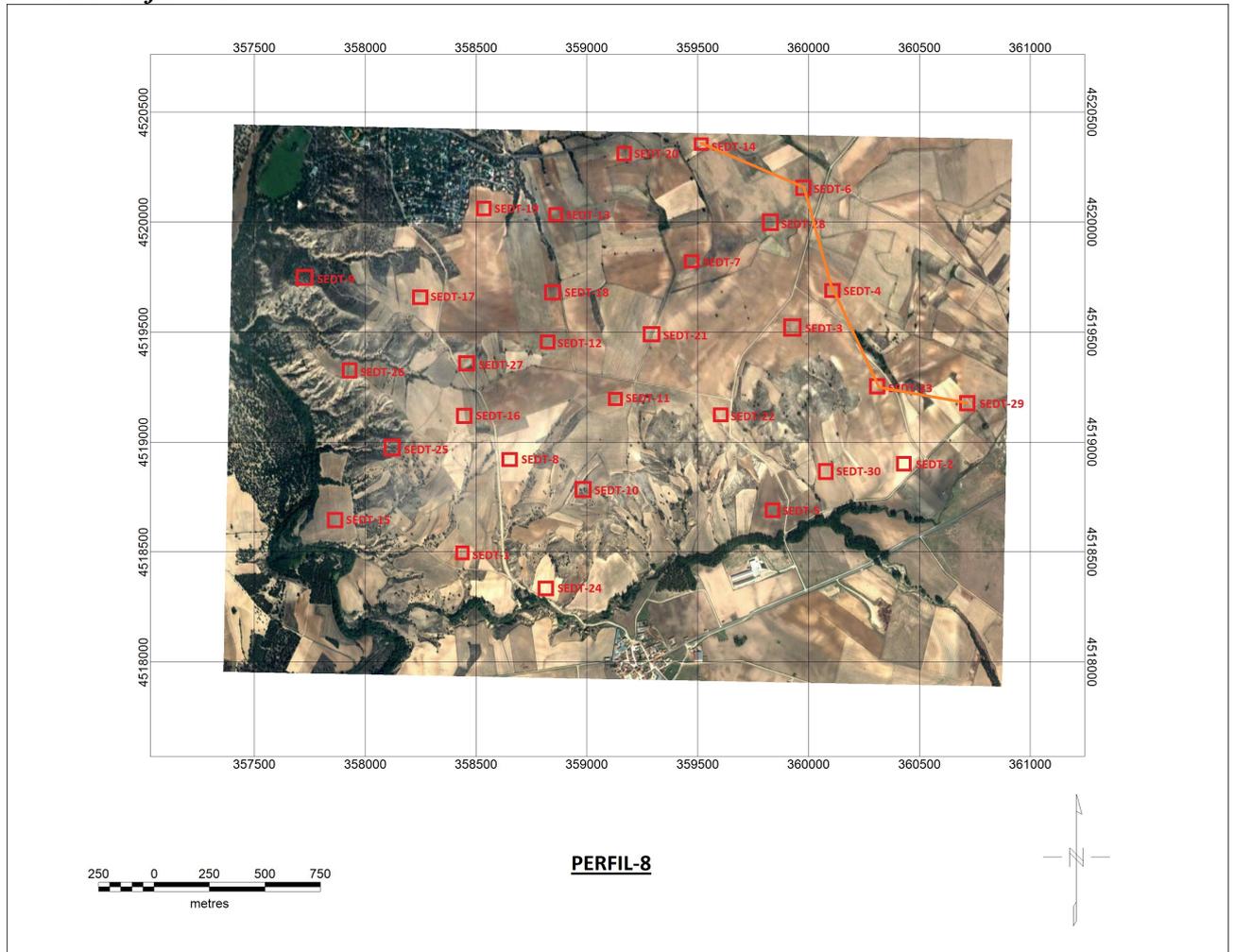


Figura 36. Situación Perfil n° 8

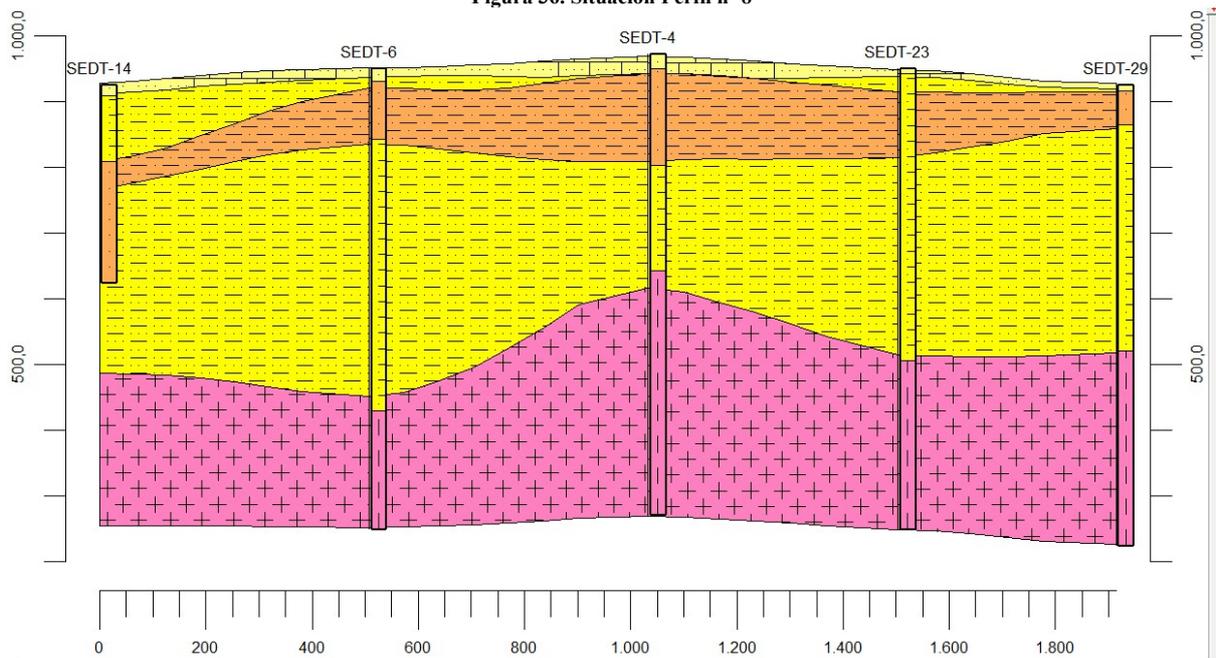


Figura 37. Perfil n° 8 interpretado



3.1.6. Análisis de los resultados obtenidos

En los perfiles anteriores se reflejan las diferentes unidades geoelectricas detectadas y sus materiales geológicos asociados. El análisis de los mencionados cortes pone de relieve la presencia en profundidad de las siguientes unidades geoelectricas:

TERCIARIO NEOGENO

-Brechas y areniscas, arcosas con cantos alternando con arenas arcillosas y arenas. Se encuentra dentro del área investigada a nivel superficial. Dentro de la formación se aprecian cambios laterales debido a las diferencias topográficas. Hidrogeológicamente se caracteriza por ser una formación permeable, pero carece de interés para su explotación por no estar saturada.

- Alternancia de arcillas y arcillas arenosas con niveles de arenas. Se ubica a continuación de la unidad anterior en casi toda la extensión de la zona de estudio. Siendo la unidad de mayor interés hidrogeológico debido a su mayor proporción de arenas.

- Alternancia de arcillas con menor densidad de arenas. Se encuentra intercalada en la unidad anterior. Siendo una formación de menor interés debido a su alta concentración de arcillas.

TERCIARIO PALEOGENO - PRECÁMBRICO PROTEROZOICO

- Conglomerados silíceos y areniscas microconglomeráticas y esquistos. Se encuentra a diferentes profundidades en nuestra zona de estudio, los sondeos electromagnéticos no son capaces de distinguir el contacto entre el paleógeno (conglomerados silíceos y areniscas conglomeráticas) y el proterozoico (esquistos), debido a la alta resistividad de ambas. No es muy importante no distinguir las formaciones al carecer ambas formaciones de interés hidrogeológico debido a su impermeabilidad.

Para la mejor visualización y comprensión de nuestro estudio se han realizado diferentes modelos en 3D con Rockworks.

En primer lugar, se realizó un modelo de columnas que nos muestra la situación en el espacio de nuestros SEDT con las columnas obtenidas.

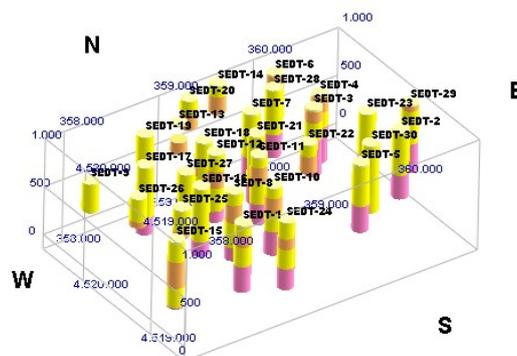


Figura 38. Modelo de columnas en 3D



Tras este modelo, se trata de hacer un modelo continuo que nos muestre con volumen la composición de nuestro modelo geológico, realizando también una serie de cortes a nuestro bloque para visualizar correctamente la evolución de nuestro bloque. Este pone de manifiesto claramente un menor espesor de terciario permeable hacia el este.

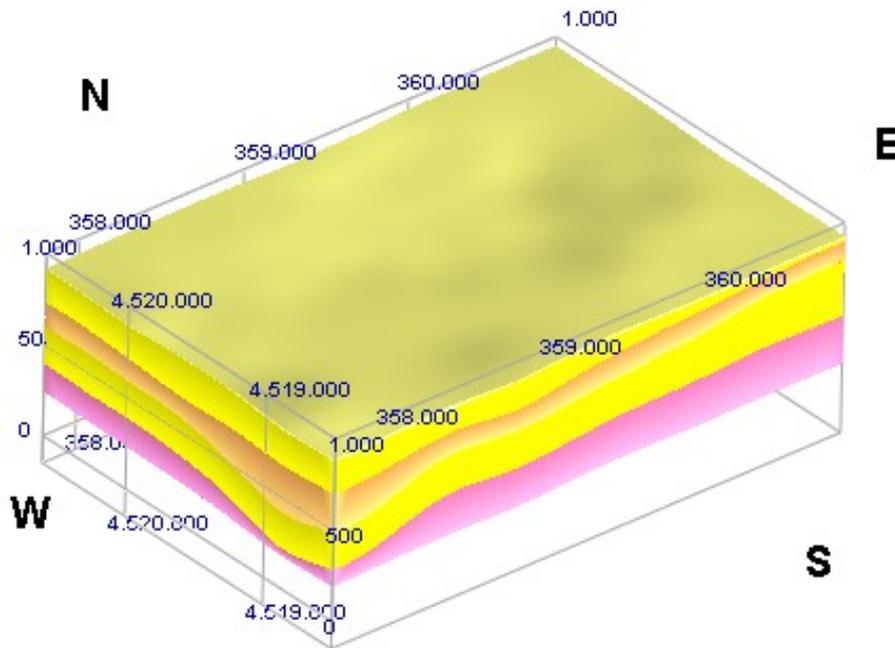


Figura 39. Bloque 3D

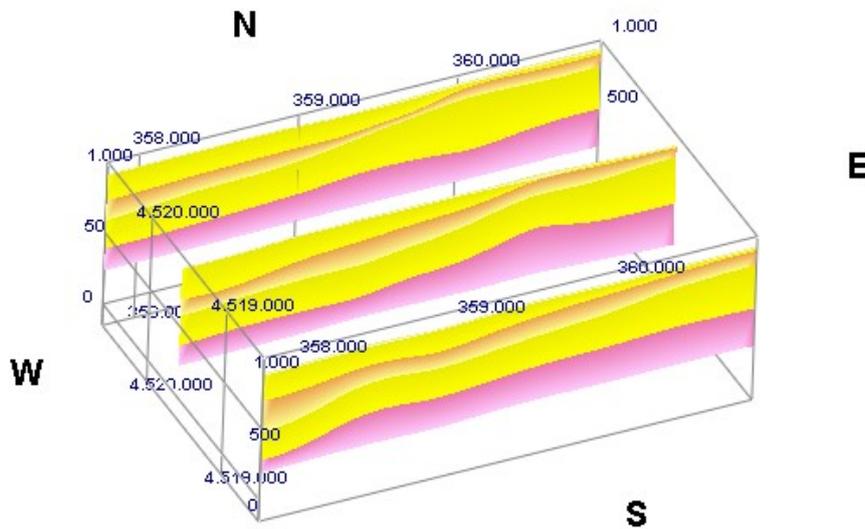


Figura 40. Secciones Bloque 3D (1)

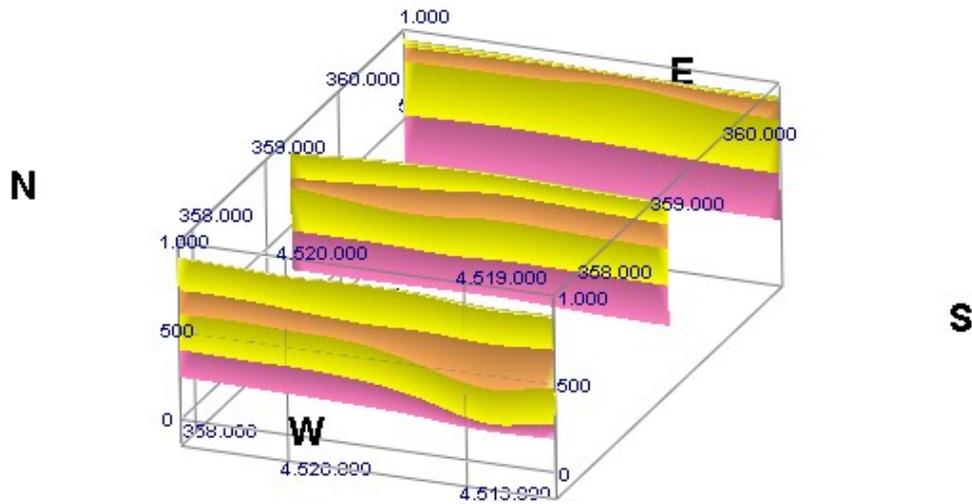


Figura 41. Secciones Bloque 3D (2)

Para poder corroborar esas primeras impresiones que nos ofrece nuestros modelos 3D, se realizaron una serie de plantas a diferentes cotas, que nos muestran claramente como aparece a mayor cota la zona impermeable en el Este de nuestro modelo.

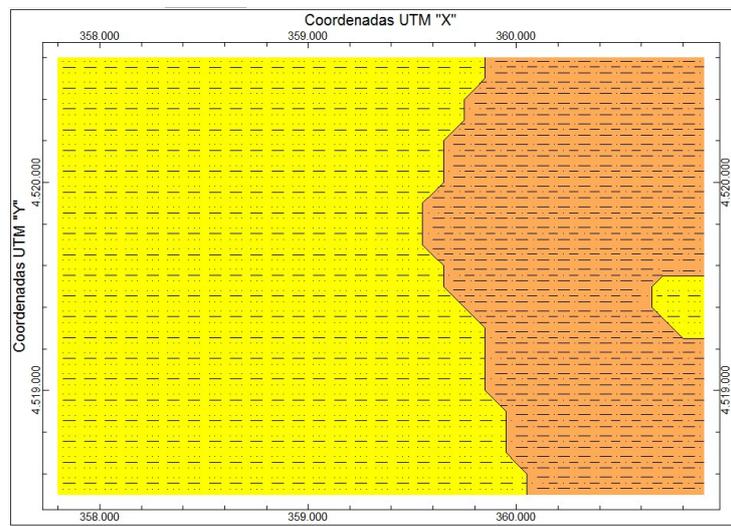


Figura 42. Planta cota 850 m

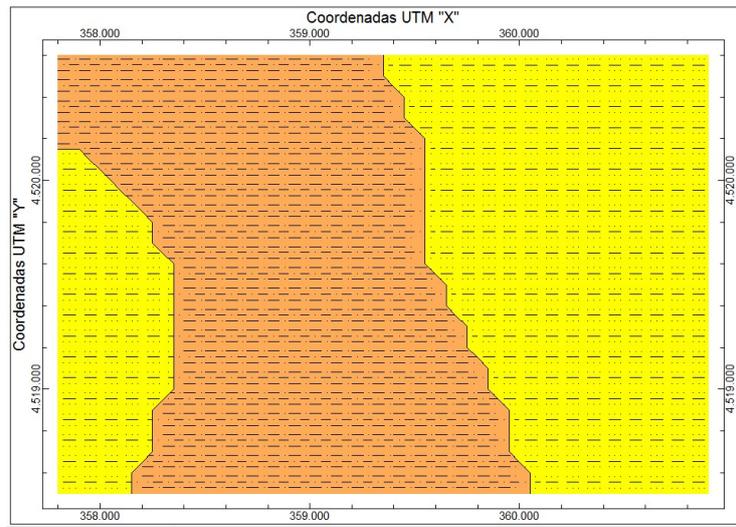


Figura 43. Planta cota 725 m

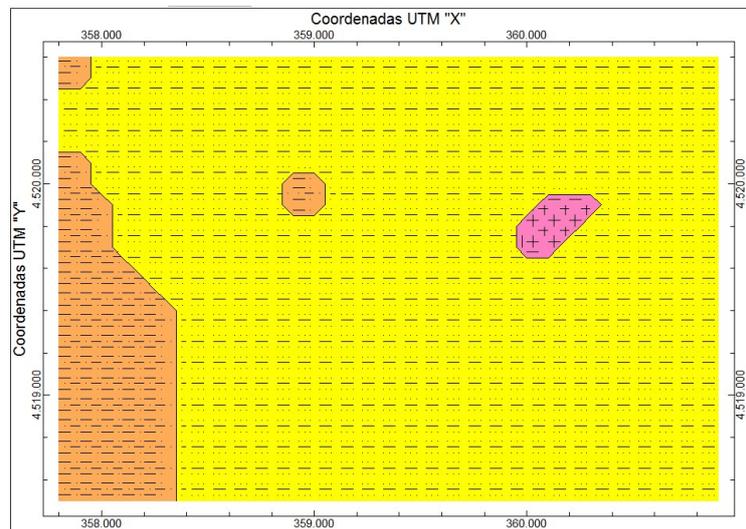


Figura 44. Planta cota 600 m

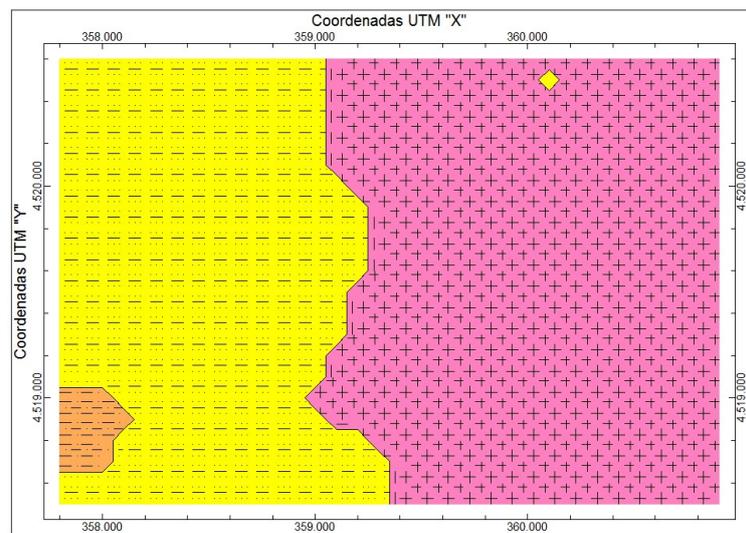


Figura 45. Planta cota 450 m



Para conseguir una conclusión final de nuestro modelo se realizó una planta de espesores de terciarias con interés hidrogeológico con el fin de definir esa evolución en nuestra zona estudiada.

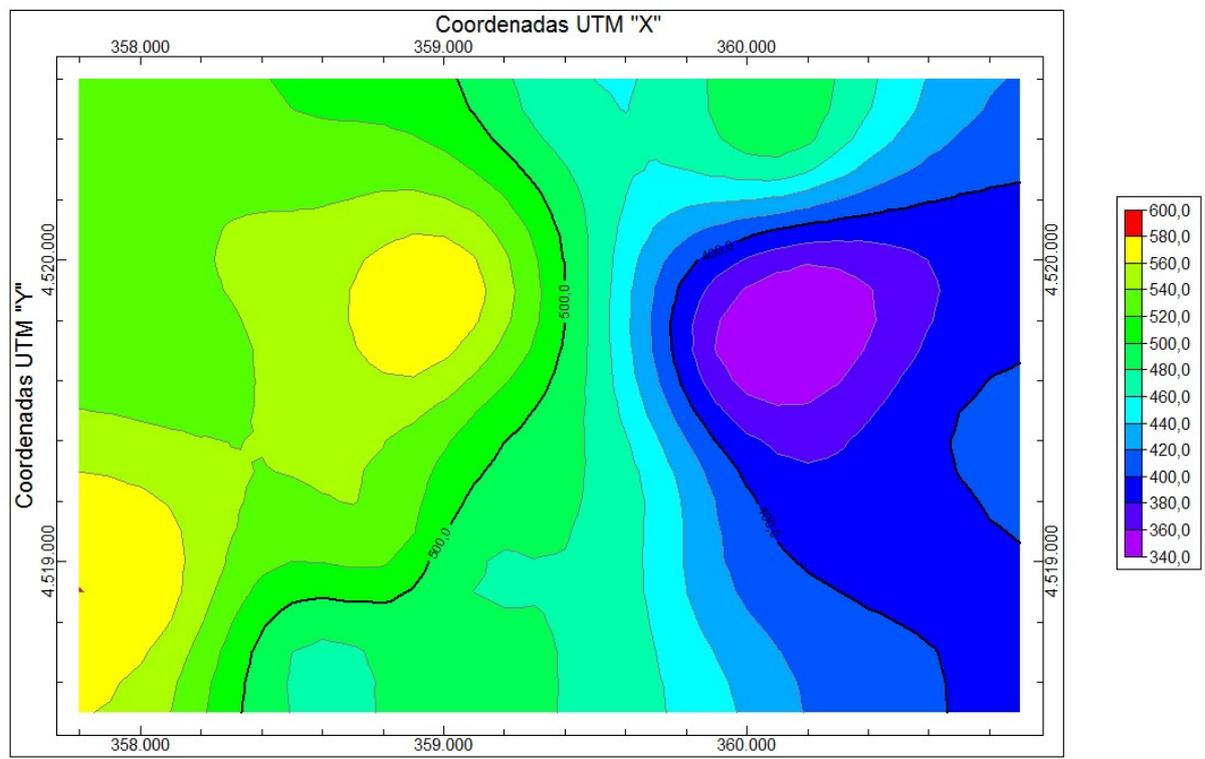


Figura 46. Espesor de las formaciones Terciarias con interés hidrogeológico

Finalmente podemos sacar como conclusión final que las zonas de mayores espesores de Terciario con interés aparecen al Oeste de nuestro trabajo, siendo las zonas amarillas de nuestra figura anterior las zonas más favorables para la realización de una perforación para captación de aguas subterráneas.



IV.- CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

4.1.- Conclusiones

En relación con lo expuesto en los diferentes apartados de este proyecto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las herramientas de gestión de información espacial son capaces de recopilar, organizar y estudiar convenientemente datos geofísicos de manera sistemática, esto permite acceder eficientemente y de manera organizada a datos con la finalidad de poder hacer una interpretación integrada con mayor facilidad. Esta forma de almacenamiento y visualización de datos es una herramienta clave para el estudio geológico e hidrogeológico ya que permite crear bases de datos fácilmente manipulables y modificables, resolviendo problemas de localización, almacenamiento, sistemas de coordenadas, mapas, etc.

- La prospección geofísica realizada en sus diferentes metodologías en combinación con las herramientas de gestión de información espacial ha permitido obtener la morfología de las formaciones en profundidad, caracterizar litológicamente los materiales existentes en profundidad y resolver los problemas específicos de cada estudio realizado. Por lo que se considera que esta asociación de Geofísica + herramientas SIG forma una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas hidrogeológicos.

- Por último, me gustaría mencionar que en este proyecto se ha profundizado en la utilización del Método de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT) para la caracterización geológica con muy buenos resultados. No necesariamente siendo la única herramienta geofísica para este tipo de estudio, por lo que se pretende continuar la investigación mediante otras técnicas para la consecución de un Doctorado.

4.2.- Desarrollos futuros

Como se comentó al principio del proyecto, el objetivo principal de este proyecto es el de servir de base a una futura Tesis Doctoral en la que las investigaciones se centrarían en los siguientes puntos:

- La asociación de la Geofísica con herramientas de Gestión de Información espacial ha sido aplicada en solo una investigación geofísica por lo que se aplicaría esta metodología a nuevas campañas geofísicas para confirmar las conclusiones aportadas en este proyecto.

- Se utilizarían diferentes técnicas geofísicas con el objeto de aumentar la calidad del trabajo y la comparación de diferentes métodos, para poder corroborar los resultados de unos y otros.

- Se investigará sobre la capacidad de las técnicas geofísicas para la caracterización de acuíferos y poder servir para la optimización de obras de captación de agua subterránea.



V. – **BIBLIOGRAFÍA**

- Christensen N.B, Sørensen K.I. (1998). Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeophysical investigations. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, 75-90.
- Danielsen, J. E., Auken, E., Jorgensen, F., Sondergaard, V., & Sorensen, K.I. (2003). the aplicacion of the transient Electromagnetic method in hydrogeophysical surveys, nota técnica publicada en la revista de aplicaciones geofisicas, 22 pp.
- Joakim, A. (2003). “Integrated interpretation of transient electromagnetic and sismic data”, Universidad de Aarhus, Dinamarca.
- Kirsch, R. (2006). “Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology,” Springer, New York.
- McNeill, J. D. (1980a). Applications of transient electromagnetic technics. Technical Note TN-7, Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada, 17pp.
- Rhoades, J. D., Raats, P. A. C. & Prather, R. J. (1976). Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 651-655.
- Sheriff, R. E. (1989). *Geophysical Methods*, first edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.



ANEXOS



CURVAS DE SEDT PROCESADAS Y PSEUDOSECCIONES EN CONDUCTIVIDAD APARENTE

