



# UNIVERSIDAD DE BURGOS

## **Programa de doctorado:**

Doctorado en Evolución Humana, Paleoecología del Cuaternario y Técnicas Geofísicas Aplicadas a la Investigación (Interuniversitario).

## **Tesis doctoral:**

Reconocimiento de morfologías endokársticas y yacimientos en los karst de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña (Burgos) mediante técnicas de prospección geofísica.

## **Autora:**

Lucía Bermejo Albarrán

## **Directora:**

Dra. Ana Isabel Ortega Martínez

## **Codirector:**

Dr. Josep M. Parés

Burgos, 2021



Dña. **ANA ISABEL ORTEGA MARTÍNEZ**, doctora por la Universidad de Burgos e investigadora posdoctoral Fundación Atapuerca-CENIEH y **D. JOSEP M. PARÉS**, doctor en Ciencias Geológicas por la ETH de Zurich e investigador del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH),

**HACEN CONSTAR:**

Que el presente trabajo de investigación titulado “Reconocimiento de morfologías endokársticas y yacimientos en los karst de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña (Burgos) mediante técnicas de prospección geofísica.” ha sido realizado, bajo nuestra dirección, por **Dña LUCÍA BERMEJO ALBARRÁN** dentro del Programa de Doctorado en Evolución Humana, Paleoecología del Cuaternario y Técnicas Geofísicas Aplicadas a la Investigación y que reúne todos los requisitos necesarios para su aprobación como Tesis Doctoral y para optar a la mención internacional.

En Burgos a 28 de febrero de 2021.



Fdo: Ana Isabel Ortega Martínez



Fdo: Josep M. Parés

*Col spocar si trova*

Giovanni Battista Piranesi

## RESUMEN

Este trabajo se centra en la Sierra de Atapuerca y el sistema kárstico Ojo Guareña, en el que se realizaron un total de 61 perfiles de ERT y 102 perfiles de GPR con el objetivo de identificar las dimensiones y continuidad de los conductos kársticos. La interpretación de los perfiles 2D y 3D de ERT ha permitido determinar la extensión de las cavidades, así como la presencia de entradas colmatadas de sedimentos. Con la ayuda de la modelización 2D fue posible resolver algunas de las hipótesis planteadas. En GPR, el análisis tanto de las ondas de radar como de las reflexiones de amplitud del radar, junto con los datos existentes sobre las cuevas, permitió definir la ubicación y geometría de diferentes características kársticas, incluyendo cuevas vacías, cuevas llenas de sedimentos y planos de estratificación. También pudimos distinguir entre los elementos geológicos intactos y las áreas alteradas por la construcción del ferrocarril y la posterior actividad de extracción en el área de Trinchera. 22 sondeos mecánicos con recuperación de testigo situados junto a los yacimientos añadieron información sobre la estratigrafía de la parte inferior de las cuevas y ayudaron con las interpretaciones. Todos estos datos han llevado en última instancia a una mejor comprensión del proceso de formación de los karst y de los yacimientos.

## ABSTRACT

This work focusses on the Sierra de Atapuerca and the Ojo Guareña karst system, in which a total of 61 ERT profiles and 102 GPR profiles were performed with the aim of identifying the dimensions and continuity of the karstic passages. The interpretation of the 2D and 3D ERT profiles has allowed determining the extension of the conduits as well as the presence of filled entrances. With the aid of 2D modelling experiments it was also possible to resolve some of the hypothesis raised from the interpretation of the profile. The analysis of both the radar wave signatures and the radar amplitude reflections in GPR, together with the existing data on the caves, allowed for the definition of the location and geometry of different karstic features, including air-filled caves, sediment-filled caves and bedrock structures. We could also distinguish between the intact geological features and the areas that were altered by the railroad construction and the later quarrying activity in the Trinchera area. 22 mechanical boreholes drilled next to the sites also added the information on the stratigraphy of the bottom part of the caves and helped with the interpretations. All these data have ultimately lead to a better understanding of the karst and sites' formation process.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 La Sierra de Atapuerca	8
1.2 Ojo Guareña	8
1.3 Objetivos	9
2. CONTEXTO	
2.1 La Sierra de Atapuerca	11
2.1.1 Contexto geológico	11
2.1.2 Contexto geomorfológico	11
2.1.3 El karst	13
2.1.4 Los yacimientos	13
3. METODOLOGÍA	
3.1 Resistividad eléctrica	16
3.1.1 Introducción	16
3.1.2 Adquisición de datos	22
3.1.3 Tratamiento de datos	23
3.1.4 Modelización	26
3.2 Georradar	
3.2.1 Introducción	27
3.2.2 Adquisición de datos	31
3.2.3 Tratamiento de datos	32
4. RESULTADOS	
4.1 Sierra de Atapuerca	
4.1.1 Planificación del trabajo de campo	34
4.1.2 Resultados	
4.1.2.1 ERT	43
4.1.2.1.1 Sistema Trinchera	44
4.1.2.1.1.1 Nivel superior	44
4.1.2.1.1.2 Nivel intermedio	50
4.1.2.1.1.3 Nivel inferior	58
4.1.2.1.2 Valle de la Propiedad	67
4.1.2.1.2.1 Nivel superior	68
4.1.2.1.2.2 Nivel intermedio	69
4.1.2.1.2.3 Nivel inferior	77
4.1.2.1.3 Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo	81
4.1.2.1.3.1 Nivel superior	82
4.1.2.1.3.2 Nivel intermedio	99
4.1.2.1.3.3 Nivel inferior	107
4.1.2.1.4 Valle de Cueva Mayor	116
4.1.2.1.5 La Paredeja	125
4.1.2.2 GPR	126
4.1.2.2.1 Sistema Trinchera	129
4.1.2.2.1.1 Nivel superior	129
4.1.2.2.1.2 Nivel intermedio	134
4.1.2.2.1.3 Nivel inferior	139
4.1.2.2.2 Valle de la Propiedad	143
4.1.2.2.2.1 Nivel superior	143
4.1.2.2.2.2 Nivel intermedio	146
4.1.2.2.2.3 Nivel inferior	149
4.1.2.2.3 Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo	152
4.1.2.2.3.1 Nivel superior	153

4.1.2.2.3.2 Nivel intermedio	160
4.1.2.2.3.3 Nivel inferior	163
4.1.2.2.4 Valle de Cueva Mayor	166
4.2 Ojo Guareña	
4.2.1 Planificación del trabajo de campo	168
4.2.2 Resultados	169
5. DISCUSIÓN	
5.1 Metodología	
5.1.1 Cuerpos conductivos	170
5.1.1.1 ERT	175
5.1.1.2 GPR	
5.1.2 Efectos topográficos	176
5.1.2.1 ERT	176
5.1.2.2 GPR	179
5.1.3 Cuerpos resistivos	179
5.1.3.1 ERT	179
5.1.3.2 GPR	181
6. CONCLUSIÓN	182
7. BIBLIOGRAFÍA	185
8. ANEXO I	193
9. ANEXO II	264

# **INTRODUCCIÓN**

## 1. INTRODUCCIÓN

El interés principal de este proyecto es la aplicación de métodos de prospección geofísica a la arqueología, y en concreto a las fases más antiguas de la ocupación humana, donde su implantación es novedosa. Los métodos de prospección geofísica constituyen una novedad en el estudio integral de yacimientos situados en contextos de cueva como los yacimientos de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña que por su singularidad y riqueza no sólo forman parte del Patrimonio Cultural de la comunidad (B.I.C., Bien de Interés Cultural), sino que sobrepasan dichos límites, ya que Atapuerca es además Patrimonio de la Humanidad (UNESCO) y Ojo Guareña Patrimonio Natural de Castilla y León (Monumento Natural).

La prospección geofísica se utiliza cada vez más en la investigación arqueológica porque permite reconocer estructuras y características enterradas sin métodos invasivos. Esto facilita la interpretación de los yacimientos, planificación de excavaciones y políticas de conservación (Conyers 2012; Bermejo et al. 2010; 2013b; Lowe 2012; Cardarelli y Di Filippo 2009; Benech y Hesse 2007; Hesse 1999; Wynn 1986). Los métodos de prospección geofísica también se han utilizado ampliamente para la exploración kárstica, principalmente con fines hidrogeológicos. En este sentido, la tomografía de resistividad eléctrica (ERT), los métodos gravimétricos, los métodos sísmicos y los electromagnéticos como el radar de muy baja frecuencia (VLF) y el georradar (GPR), se han empleado con frecuencia para detectar cuevas llenas de aire o de agua (Chalikakis et al., 2011; Revil et al., 2012). Sin embargo, la identificación de cuevas llenas de sedimentos utilizando estas técnicas geofísicas ha suscitado poco interés (Weinstein-Evron et al., 2003; Valois et al., 2010; Martínez-Moreno et al., 2014).

La tomografía eléctrica se ha utilizado en la investigación de sitios kársticos arqueológicos (Bermejo et al. 2014a; Porres et al. 2013; Ortega et al. 2010; Valois y col. 2010; Piro y col. 2001) por su capacidad de determinar el tamaño, la ubicación y el potencial de diferentes características kársticas con alta precisión (Chalikakis et al. 2011; Guérin y col. 2009), a partir del contraste de los diferentes valores de resistividad como entre la roca hospedante de piedra caliza y los sedimentos detríticos.

El georradar, sin embargo, que tradicionalmente ha sido considerado ineficaz en sedimentos arcillosos, ya que estos materiales atenúan las ondas de radar, limitando la profundidad de la investigación (Doolittle et al., 2007; Piscitelli et al., 2007; Schrott y Sass, 2008; Kaufmann y Deceuster, 2014), ha permitido aportar información sobre las propiedades físicas del subsuelo que la ERT no detecta. Además, es el único método geofísico que es capaz de aportar, junto con la ERT, mapas 3D del subsuelo.

Identificar el desarrollo de este sistema kárstico es crucial para comprender los procesos de formación de los yacimientos y para planificar futuras estrategias de excavación. Para ello, la información aportada por las prospecciones geofísicas se ha combinado con información de perforaciones y una variedad de información sobre la ubicación, dimensión y dirección de algunas características kársticas.

## 1.1 La Sierra de Atapuerca

Los yacimientos de la Sierra de Atapuerca (Burgos, España) constituyen un enclave esencial para el estudio de la Prehistoria y especialmente del Pleistoceno medio e inferior. Los restos arqueológicos, paleontológicos y paleoantropológicos recuperados en los diferentes yacimientos que se encuentran en la sierra han propiciado el desarrollo de numerosos trabajos científicos que ha contribuido a un cambio de paradigma en el estudio de la evolución humana (Arsuaga et al., 1993; Carbonell et al., 1995; Parés y Pérez-González, 1995; Carbonell et al., 2008; Bermúdez de Castro et al., 2008; Ortega et al., 2014; Martín-Francés et al., 2016).

Los yacimientos del área de Trinchera consisten en antiguas cuevas llenas de sedimentos que fueron seccionadas por una trinchera de ferrocarril del siglo XIX (Figs. 1 y 2A). Esta trinchera expuso numerosas entradas de cuevas y otras características kársticas que se han investigado durante muchas décadas y han proporcionado restos arqueopaleoantropológicos del Pleistoceno inferior y medio que han cambiado el paradigma de la evolución humana (Bermúdez de Castro et al., 1997; Carbonell et al., 2008; Ortega et al., 2014).

La investigación realizada en los yacimientos de la Sierra de Atapuerca ha mostrado que durante el Pleistoceno inferior y medio los espacios de ocupación por parte del hombre o de los carnívoros se sitúan principalmente en los sectores de entrada al karst y en sus proximidades (Arsuaga et al., 1993 y 1997; Parés & Pérez-González, 1995; Bermúdez de Castro et al., 1997 y 1999; Carbonell et al., 1999 y 2008; Pérez-González et al., 2001; Ortega et al., 2012 y 2013a; Parés et al., 2010, 2013a y b). Los trabajos de investigación geofísica en la Sierra de Atapuerca (Ortega 2009, Ortega et al., 2010; Bermejo et al., 2013, 2014 b, 2015) han puesto de manifiesto la existencia de una serie de conductos y pasajes, así como sectores de antiguas entradas colmatadas de sedimentos, que han avalado y apoyado la continuidad de los trabajos que aquí se proponen.

## 1.2 El complejo kárstico de Ojo Guareña

Se conoce como Karst de Ojo Guareña a un conjunto de unas 400 cavidades, estudiadas por el Grupo Espeleológico Edelweiss, relacionadas en su génesis y litología, entre las que destaca el Complejo Kárstico de Ojo Guareña, un sistema multinivel formado por una red tridimensional de 110 km de conductos subterráneos y 14 entradas principales. Las dimensiones y variedad de conductos hacen que este complejo presente posibilidades ilimitadas para la ocupación de sus cavidades, tal y como reflejan la importancia arqueológica de sus yacimientos, con una variada y completa secuencia cultural que va desde el Paleolítico medio hasta la Edad Media (Ortega & Martín, 1986; Ortega et al., 2013b).

Las dimensiones y variedad de estos conductos ofrecen innumerables posibilidades para la ocupación humana, como es reflejada en la secuencia cultural que data desde el Paleolítico Medio hasta la Edad Media (Ortega et al. 2013; Ortega y Martín 2011). Kaite y el área de entrada de la cueva Palomera se encuentran entre las cuevas más conocidas del complejo por sus registros arqueológicos (Ortega & Martín 1986).

La investigación se ha centrado pues en el estudio de las zonas de entrada a las cuevas de Kaite, Palomera y Covaneria, en las que se ha constatado la presencia de yacimientos que parecen susceptibles de contener una mayor potencia estratigráfica. De igual modo, las tres entradas dan acceso a santuarios de arte paleolítico y postpaleolítico.

El objetivo de los estudios de resistividad eléctrica en el complejo kárstico de Ojo Guareña fue localizar sedimentos que puede contener restos arqueológicos o rellenos de entradas de cuevas antiguas, así como para encontrar vacíos pasajes intransitables a la exploración espeleológica, que pueden ayudar a comprender la evolución y características de este entorno subterráneo.



### 1.3 Objetivos

- o Identificar morfologías endokársticas y exokársticas (entradas, lapiaces...)
- o Determinar los lugares más susceptibles de contener yacimientos
- o Aportar información para la planificación de excavaciones
- o Determinar la adecuación de cada método a la problemática de la tesis

## **CONTEXTO**

## 2. CONTEXTO

### 2.1 LA SIERRA DE ATAPUERCA

#### 2.1.1 Contexto geológico

La Sierra de Atapuerca se sitúa al norte de la Península Ibérica (figura 1.1 A), al noroeste del Sistema Ibérico en las coordenadas geográficas de 42° 21' 00''N / 3° 31' 10''O y a una altitud máxima de 1085 m s.n.m., que se localiza en el punto geodésico del Alto de San Vicente. Está conformada por un anticlinal tumbado, formado durante la orogenia alpina, compuesto principalmente por rocas carbonatadas del Cretácico superior que emergen de la cuenca terciaria del Duero (Olivé et al., 1990; Pineda y Arce, 1997) (figura 1.1 B). La charnela del anticlinal presenta una orientación general NNO-SSE y vergencia NE.

Hacia el noreste la sierra se comunica con la Cuenca del Ebro a través del Corredor de Bureba (figura 1.1 B). El valle de la Hoyada divide la Sierra de Atapuerca en dos sectores: Matagrande al norte y el Alto de San Vicente al sur, donde se emplazan los yacimientos arqueológicos, principalmente en su ladera oeste (figura 1.2). Los términos municipales de la Sierra de Atapuerca abarcan los municipios de Rubena, Atapuerca, Arlanzón, Ibeas de Juarros y Cardeñuela de Ríopico.

La litología de la Sierra de Atapuerca se compone de tres grandes series geológicas: mesozoica, terciaria y cuaternaria.

#### 2.1.2 Contexto geomorfológico

Los sedimentos superficiales de la Cuenca del Duero son depósitos aluviales y lacustres de edad neógena y cuaternaria (Armenteros et al., 2002) que fueron erosionados a través del Plio-Pleistoceno por una red de drenaje incluyendo el río Arlanzón y sus afluentes (los ríos Vena y Pico), cuando la cuenca se abrió al Océano Atlántico (Benito-Calvo y Pérez-González, 2007). Esto generó una secuencia escalonada de terrazas fluviales, tradicionalmente etiquetadas como T1 a T14, de antiguas a modernas (Benito-Calvo et al., 2008), que corresponden en elevación a las diferentes cavidades desarrolladas dentro de las calizas cretácicas de la Sierra de Atapuerca o (Ortega, 2009; Ortega et al., 2013). Los períodos relativamente largos de estabilidad de los niveles base produjo un sistema de cuevas multinivel (Ford y Williams, 1989; Anthony, 2004), que son el foco de este trabajo.

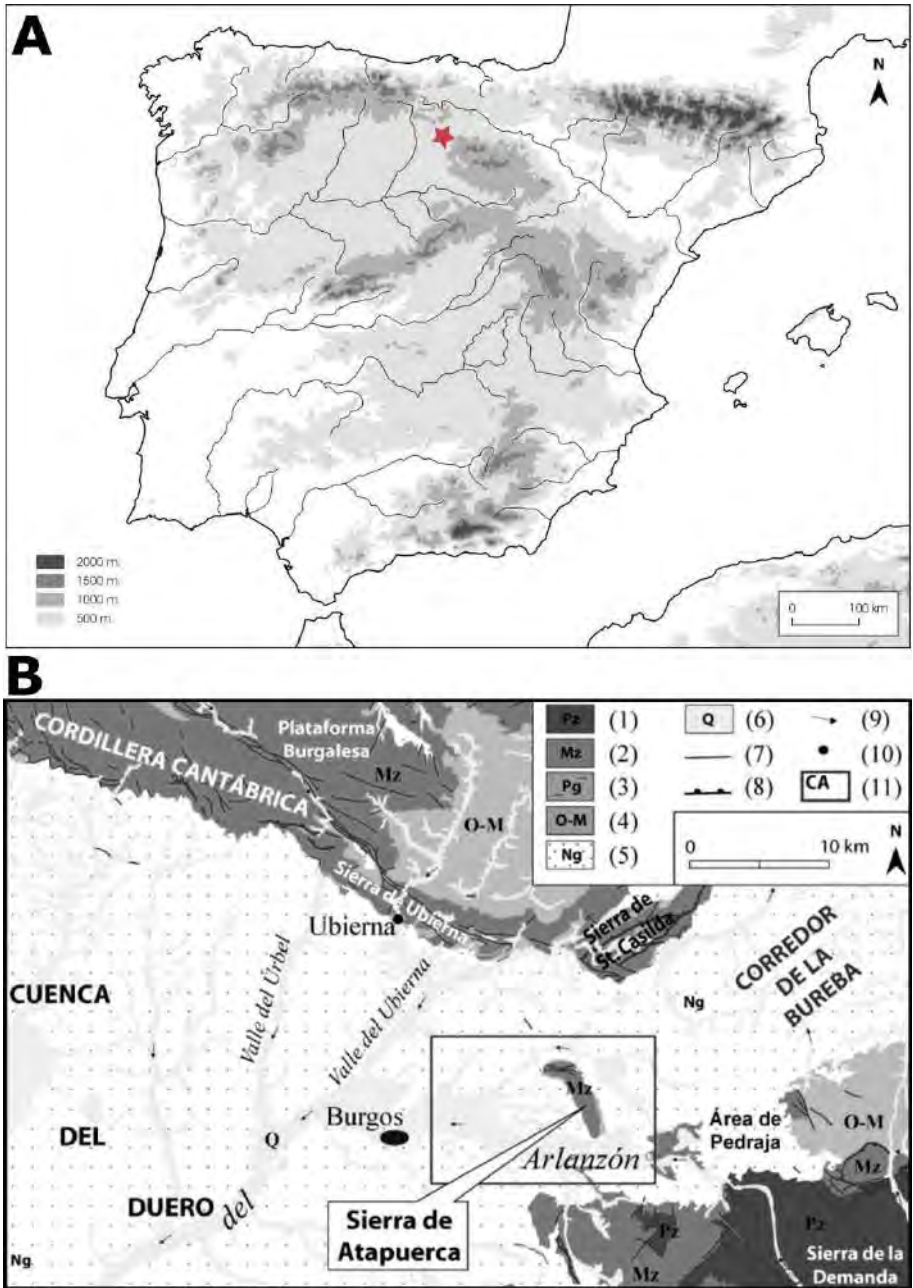
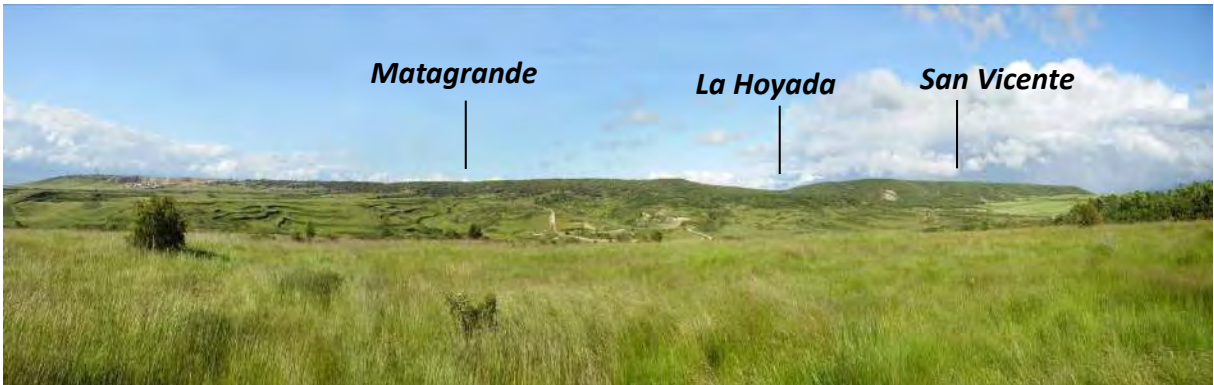


Figura 1.1. A) Localización de la Sierra de Atapuerca en la Península Ibérica. B) Mapa geológico de la Cuenca del Duero 1: Paleozoico; 2: Mesozoico; 3: Paleógeno; 4: Oligoceno-Mioceno; 5: Neógeno; 6: Cuaternario; 7: Falla; 8: Cabalgamiento; 9: Dirección del flujo fluvial; 10: Ciudad; 11: Área de estudio (modificado de Benito-Calvo et al., 2008 y Ortega, 2009).



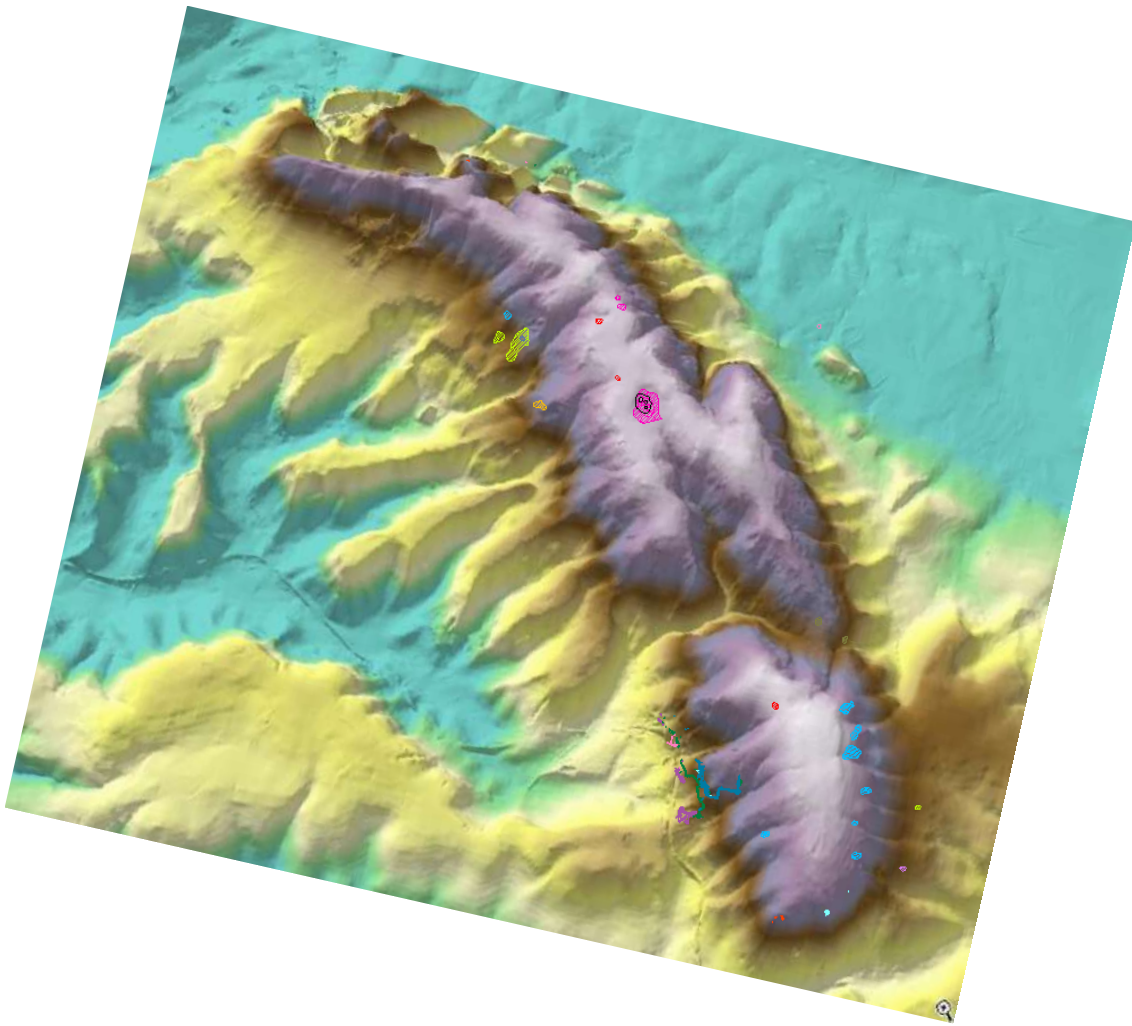


Figura 1.2.

### 2.1.3 El karst

Las cuevas de la Sierra de Atapuerca se dividen en tres niveles subhorizontales principales (superior, intermedio e inferior), que muestran una migración progresiva hacia el oeste. Estos conductos están fuertemente controlados por la estructura de la roca caja (Ortega et al., 2013) y abarcan un espesor total de 40-70 metros. El karst está dividido por el Valle de la Propiedad en dos sistemas de cuevas generales denominados sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo, que tiene 4.7 km de pasajes explorados, y otras cuevas descubiertas al norte del área de Trincheras por la trinchera del ferrocarril a finales del siglo XIX.

### 2.1.4 Los yacimientos

#### Sima del Elefante

El yacimiento Sima del Elefante contiene un relleno de cueva de 25 metros de espesor dividido en 16 unidades litoestratigráficas (Huguet et al. 2017) (Fig.3). Estas unidades fueron depositadas en condiciones de cueva abierta y consisten en depósitos de flujo de agua y de gravedad compuestos de gravas y arcillas laminadas (Rosas et al., 2006; Ortega, 2009; Ortega et al., 2014). Los sedimentos por debajo de la unidad TE17 tienen una edad del Pleistoceno inferior (Rosas et al., 2001; Parés et al., 2006), incluida la unidad TE9, que contiene el homínido europeo más antiguo, fechado en 1.3-1.1 Ma (Carbonell et al., 2008). Estas unidades exhiben alguna interrupción interna, muy

probablemente debido a un colapso de las unidades inferiores en un nivel de cueva inferior (probablemente Cueva Peluda) (Ortega, 2009; Ortega et al., 2018).

### Complejo Galería

El Complejo Galería corresponde a una cámara grande y alargada que recibió diferentes aportes de sedimentos. Estos aportes a la cueva son, de sur a norte, las simas sur y central (TS y TC) junto con la sección TR17; la sima norte (TN), que es la entrada principal al pasaje subhorizontal de Galería (TG); y Covacha de los Zarpazos (TZ) (Gil et al., 1987; Ortega et al., 2013). La secuencia estratigráfica de TZ, TG y TN, que alcanza los 13 metros de espesor, está formada por cinco unidades litoestratigráficas denominadas GI a GV, de abajo hacia arriba (Fig. 4). La Unidad GI es un depósito sedimentario endokárstico arqueológicamente estéril que data del Pleistoceno inferior y consiste en limos laminados y brechas calizas (Pérez-González et al., 2001). Las unidades GII, GIII y GIV son alóctonas y están compuestas por gravas fluviales calcáreas y depósitos de flujo por gravedad (Pérez-González et al., 1999). Las unidades GII y GIII datan de entre 500 y 250 ka (Berger et al., 2008; Falguères et al., 2013; Demuro et al., 2014) y contienen un rico conjunto paleontológico y arqueológico del Pleistoceno medio, que incluye dos restos de homínidos fósiles (Carbonell et al., 1999; Ollé et al., 2013), mientras que la Unidad GIV es estéril.

### Gran Dolina

El relleno sedimentario de Gran Dolina tiene unos 25 metros de espesor, 19 de los cuales se encuentran por encima de la superficie del ferrocarril y 6 por debajo. Se divide en 12 unidades litoestratigráficas (Pérez-González et al., 2001; Campaña et al., 2016). Las unidades del Pleistoceno inferior (TD1 a TD7), datan de aproximadamente de hace 1.2 Ma a 0.8 Ma (Moreno et al., 2015; Arnold et al., 2015; Parés et al., 2018) y se componen principalmente de facies fluviales probablemente coetáneas con el depósito de las terrazas fluviales T3 y T4 (Moreno et al., 2015). Las unidades del Pleistoceno medio (TD8 a TD11) datan de alrededor de 0,2 Ma (Berger et al., 2008) y están dominadas por facies de flujo por gravedad. Las unidades más bajas, TD1 y TD2, son facies autóctonas depositadas en condiciones de cuevas cerradas compuestas de limos arcillosos y arenosos, que son arqueológicamente estériles. Las unidades TD3 a TD11 son principalmente facies alóctonas de barros, gravas, brechas y algunas capas de espeleotemas (Campaña et al., 2017). Las unidades TD6 y TD10 son arqueológicamente excepcionales. TD6 tiene restos de homínidos de una nueva especie, *Homo antecessor*, asociada con herramientas de piedra primitivas de Modo 1 (Bermúdez de Castro et al., 1997). La unidad TD10 contiene dos capas de abundantes herramientas de piedra y fauna interpretada como parte de un campamento (TD10.1) y un *kill-site* (TD10.2) (Ollé et al., 2013; Rodríguez-Hidalgo et al., 2017) respectivamente. El conjunto Gran Dolina-Penal, junto con las secciones de cuevas cercanas TR20 y TR21, probablemente formaban parte de una sola cueva (Ortega, 2009).

El relleno del tramo Penal presenta una secuencia estratigráfica de facies alóctonas de 7 metros de espesor que, según sus restos paleontológicos, son correlativos a los sedimentos de las unidades TD4 a TD6 (Fernández-Jalvo, 1995). La parte inferior muestra dos pequeñas chimeneas ascendentes que pueden estar relacionadas con el nivel inferior de la cueva (Ortega et al., 2013). Las paleocorrientes ascendentes inferidas de los scalops visibles en estas chimeneas sugieren que este punto constituyó uno de los principales surgimientos del nivel inferior de la cueva (Eraso et al., 1998).

### Cueva Peluda

Cueva Peluda muestra sedimentos arcillosos con fauna y restos líticos del Pleistoceno Temprano y Medio (Ortega, 2009). El nivel inferior de la cueva contiene, como el resto de los conductos del sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo, depósitos fluviales que incluyen cantos rodados de cuarcita de tamaño decimétrico, arenas y limos (Ortega et al., 2018).

## **METODOLOGÍA**

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

##### 3.1.1 Introducción

###### Breve historia del método

Los orígenes de la prospección eléctrica se remontan al siglo XIX, cuando el inglés Robert Fox relacionó las corrientes eléctricas con algunos depósitos minerales (Fox, 1830). Posteriormente, miembros del "Geological Survey" de Estados Unidos usarían este método en las minas del estado de Nevada, y construirían los primeros electrodos impolarizables (Orellana, 1982). Si bien ya se había conseguido medir la resistividad eléctrica sobre muestras de sedimentos, no es hasta 1912 que el francés Conrad Schlumberger consigue aplicar este método en el subsuelo para la detección de minerales no magnéticos (Benech, 2013) y demostrar que rocas de naturalezas diferentes presentan resistividades distintas, tanto como para afectar el trazado de las curvas de equipotencial (Delacour, 2003). Para 1915, este ingeniero de minas, que es sin duda la figura más importante en el desarrollo de esta disciplina, había concebido ya la idea de usar un dispositivo creado por 4 electrodos (Schlumberger, 1920), algo similar a lo que Frank Wenner (1915, 1916) estaba desarrollando de manera paralela en los EEUU para medir la resistividad de la Tierra (De Beer, 2015).

En cualquier caso, esta técnica está siendo ya usada para 1929 por los ingenieros de la *Société de prospection électrique*, fundada por Conrad Schlumberger y su hermano Marcel, en la búsqueda de petróleo. A partir de este momento, la investigación en la prospección eléctrica se desarrolló principalmente por la escuela soviética, para el descubrimiento de yacimientos petrolíferos o de gas, y por la escuela sueca, para la detección de depósitos minerales (Orellana, 1982).

Su aplicación a la arqueología no se hace esperar y, entre los años 1946-47, aparecen los primeros estudios realizados en México por Helmut de Terra en varios sitios paleoindios, así como los de Richard Atkinson en Inglaterra (Atkinson, 1952; De Terra et al., 1949; Hesse, 2009). Su evolución durante los siguientes años estuvo principalmente ligada a Reino Unido e Italia, donde se desarrollaron resistímetros relativamente rápidos y económicos (Watters, 2009). Desde entonces, el desarrollo de nuevos hardware, cada vez más eficientes, ha aumentado la utilidad de las prospecciones eléctricas y su aplicación en terrenos que abarcan amplias superficies (Schollar et al., 1990; Panissod et al., 1998; Dabas et al., 2000).

En cuanto a su aplicación al karst, ésta se centró en un primer momento en estudios de carácter geotécnico, para la detección de huecos, dolinas o estructuras epikársticas (Greenfield, 1979; Militzer et al., 1979; Smith, 1986). Sin embargo, y a partir de los avances tecnológicos desarrollados en la década de 1990, las investigaciones en ambientes kársticos se enfocaron en gran medida en el ámbito de la hidrogeología (Chalikakis, 2011; Revil et al., 2012). El incremento de estas investigaciones hizo que el método se aplicara finalmente al estudio de yacimientos arqueológicos localizados en ambientes kársticos (Piro et al., 2001; Cardarelli et al., 2006; Weinstein-Evron et al., 2003; Valois et al., 2010; Ortega et al., 2010; Martínez-Moreno et al., 2013; Bermejo et al., 2017), que es el ámbito en el que se encuadra esta tesis doctoral.



### Principios del método

La resistividad eléctrica  $\rho$  (o su inversa, la conductividad  $\sigma$ ) es la propiedad física que determina la resistencia (o la habilidad) de las cargas eléctricas para moverse a través de un medio. La ley de Ohm estipula que, en un medio isótropo, la intensidad de corriente eléctrica  $I$  que atraviesa un circuito entre dos puntos, es proporcional al voltaje  $V$  entre dichos puntos e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica  $R$ . Esta relación se resume en la siguiente ecuación:

$$R = V/I$$

El método de prospección eléctrica consiste en la inyección de una corriente eléctrica a través de un par de electrodos ( $C_1$  y  $C_2$ ) y la medición de la diferencia de potencial a través de otro par de electrodos ( $P_1$  y  $P_2$ ) (figura 3.1). La corriente  $I$ , es medida en amperios  $A$ , mientras que la diferencia de potencial  $\Delta V$ , se mide en voltios  $V$ . La relación entre  $A$  y  $\Delta V$ , multiplicada por un coeficiente geométrico  $K$  que depende de la disposición de los electrodos (separación, dispositivo usado) y la forma del medio donde se lleve a cabo la medida, permite obtener la resistividad eléctrica aparente  $\rho_a$  de un espacio, que se mide en ohmios-metro,  $\Omega \cdot m$  (o en Siemens/metro,  $S/m$ , en el caso de la conductividad aparente  $\sigma_a$ ). Partiendo de la ley de Ohm, podemos por tanto calcular la resistividad aparente con la siguiente ecuación:

$$\rho_a = K \cdot (\Delta V/I)$$

Si el suelo es homogéneo, la resistividad aparente será igual a la resistividad intrínseca. En un medio heterogéneo, como es el objeto de estudio de este trabajo, obtendremos los valores de resistividad real a través de un método de inversión. Sin embargo, debido a la forma en la que circulan las corrientes eléctricas (figura 3.1), estos valores serán representativos de un volumen de terreno y no de un único punto.

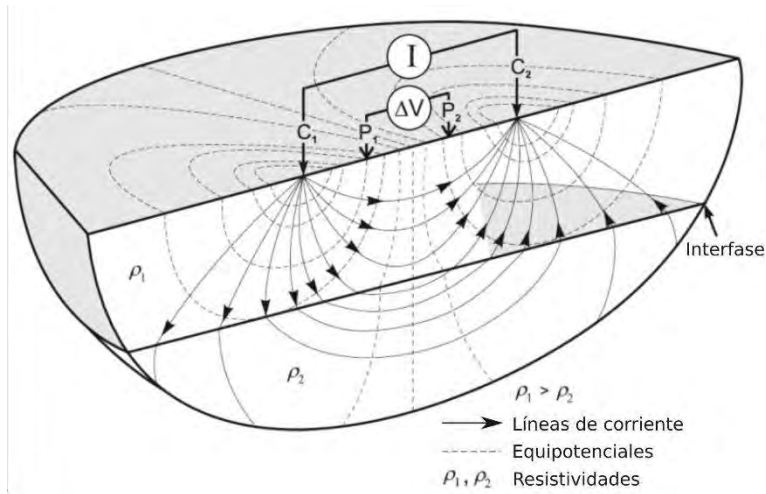


Figura 3.1. Principio de medida de la resistividad eléctrica con 4 electrodos sobre un semiespacio (modificada de Knödel et al., 2007).

La distribución de los valores de resistividad en un medio depende, además, de otros parámetros. Según la ley de Archie (1942), la circulación de la corriente eléctrica en una roca depende de la saturación en agua, la porosidad, la resistividad eléctrica del agua de imbibición y/o la litología. La resistividad depende igualmente de la temperatura: disminuye aproximadamente un 2% por cada grado que aumenta la temperatura (Campbell et al., 1948). En consecuencia, no puede atribuirse un valor concreto sino un rango de resistividad a cada roca o medio (figura 3.2), por lo que en este trabajo hemos atribuido un rango de valores de resistividad a cada elemento kárstico identificado.

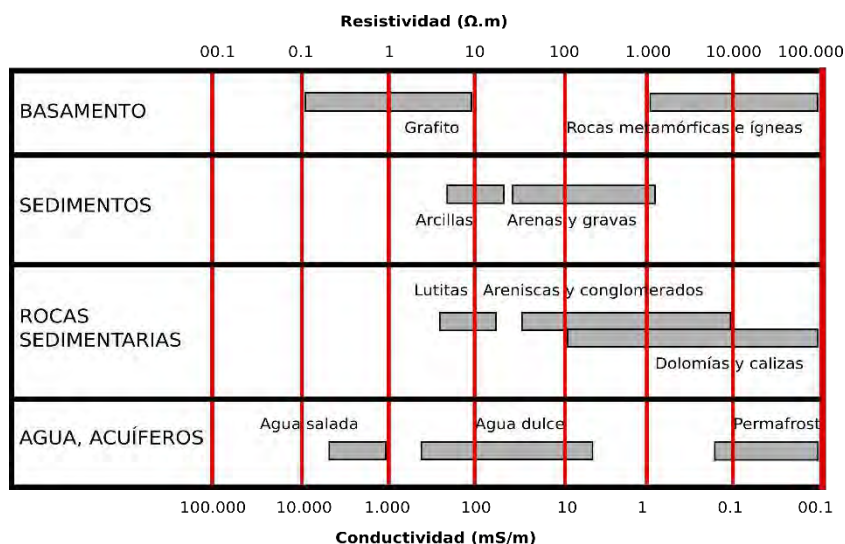


Figura 3.2. Valores de resistividad (y conductividad) de las rocas y medios más comunes (modificada de Chapellier, 2000).

Los elementos más comunes en un sistema kárstico son la roca caliza, cuyos valores de resistividad en este trabajo superan los 1000  $\Omega.m$ ; y los sedimentos arcillosos, que en este trabajo han mostrado un valor medio de entre 50 y 500  $\Omega.m$ . A esto hay que añadirle el aire de los tramos de las cuevas no colmatadas, que es infinitamente resistivo.

Por otro lado, la densidad y la capacidad de circulación de las líneas de corriente en un terreno heterogéneo dependen de las características de las capas o niveles que atraviesen. Así, en un terreno en el que la primera capa ofrezca una resistividad menor que la segunda capa, las líneas de corriente se concentrará en la primera y habrá menos corriente disponible para pasar a la segunda (figura 3.3 A). En el caso contrario, habrá más cantidad de corriente que pase a la segunda capa (figura 3.3 B), por lo que ésta podrá, además, alcanzar mayor profundidad.

En conclusión, para una correcta interpretación de los resultados es necesario conocer las características geológicas del medio prospectado.

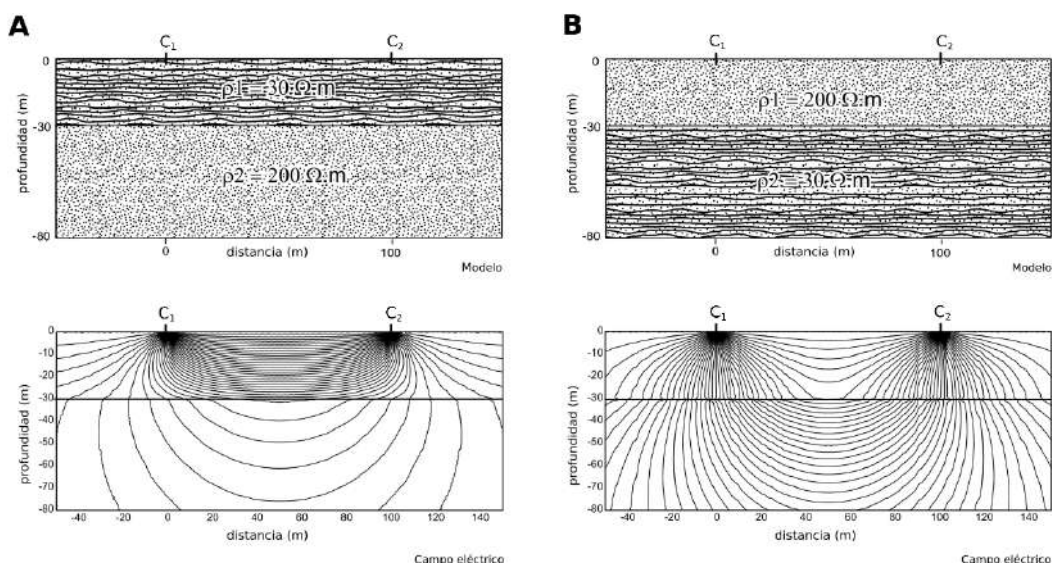


Figura 3.3. A: Modelo de dos terrenos,  $\rho_2 > \rho_1$  (modificada de Chapellier, 2000).

B: Modelo de dos terrenos,  $\rho_1 > \rho_2$  (modificada de Chapellier, 2000).

## Tomografía de resistividad eléctrica

La tomografía de resistividad eléctrica o ERT (del acrónimo inglés Electrical Resistivity Tomography) consiste en la creación de imágenes del subsuelo a través del uso de un resistímetro que, conectado a una serie de electrodos, realiza todas las combinaciones de cuadripolos (4 electrodos) posibles de manera automatizada. De esta manera, es posible adquirir numerosas medidas de resistividad a distintas profundidades en un periodo de tiempo relativamente corto.

En cuanto a la organización geométrica de los cuadripolos, existen varios tipos de configuraciones o dispositivos, cada uno de los cuales es más sensible a la detección de un tipo de estructura. Debido a la alta variabilidad de los entornos kársticos, es difícil evaluar cuál es el dispositivo más adecuado para una prospección, por lo que en este trabajo hemos empleado los dos dispositivos (figura 3.4) de diferente sensibilidad que proporcionan mayor resolución (Dahlin y Zhou, 2004) (figura 3.5 y 3.6):

-dipolo-dipolo (DD): es el más adecuado para detectar estructuras de carácter vertical (Dahlin y Zhou, 2004) (figura 3.6). Sin embargo, la resolución de los datos disminuye mucho en profundidad y es muy sensible a los errores de espaciado entre los electrodos (Zhou y Dahlin 2003) y a la presencia de cuerpos de carácter 3D (Dahlin y Loke, 1997).

-Wenner-Schlumberger (WS): es más sensible a la detección de estructuras horizontales (figura 3.6). Este dispositivo es el que consigue una mejor relación señal/ruido y resolución de datos en profundidad (Dahlin y Zhou, 2004).

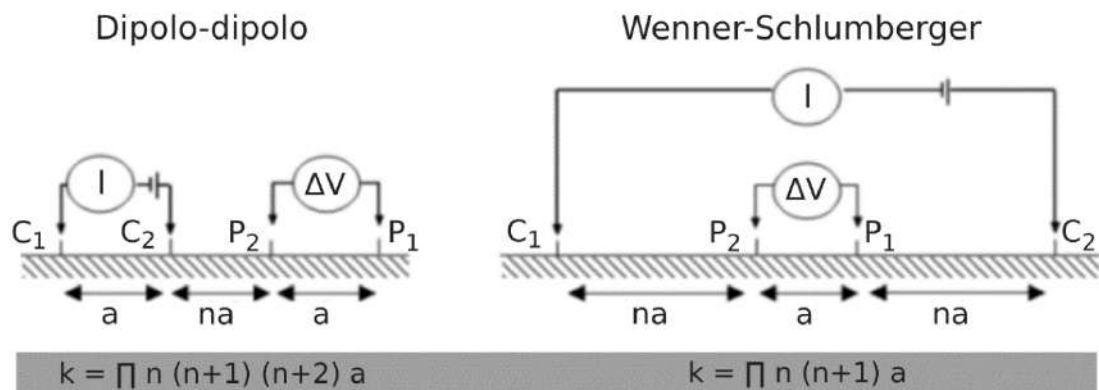


Figura 3.4. Configuración geométrica de los electrodos para dispositivos dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger.

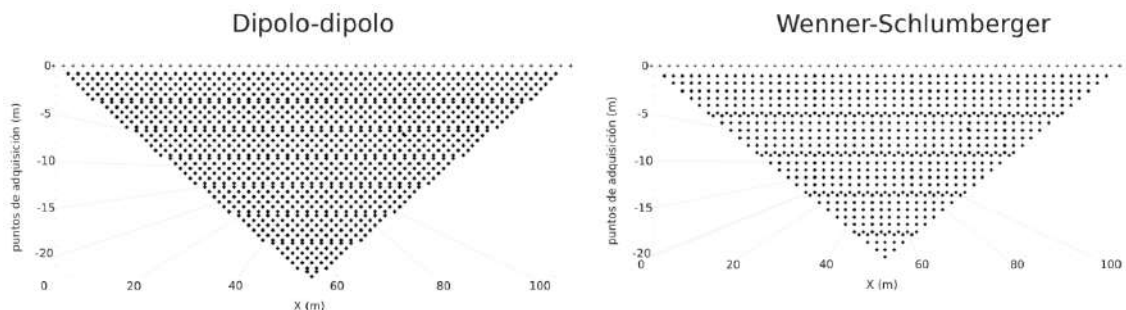


Figura 3.5. Distribución de los puntos de adquisición para los dispositivos dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger.

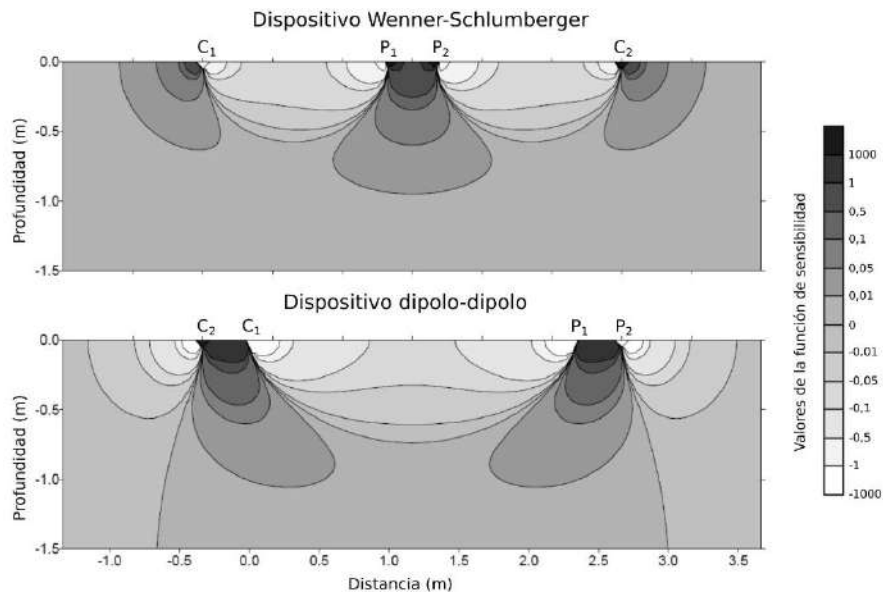


Figura 3.6. Valores de la función de sensibilidad para los dispositivos DD y WS. Esta función permite determinar en qué proporción la geometría de los cuerpos enterrados influye en la medida de la diferencia de potencial. Cuanto más elevado sea el valor de esta función, más influencia tiene en la medida de potencial (modificada de Chapellier, 2000).

En una tomografía de resistividad eléctrica 2D el conjunto de electrodos se dispone a lo largo de un perfil rectilíneo y las medidas de resistividad aparente se representan en una imagen llamada pseudosección, donde eje vertical o pseudoprofundidad (figura 3.7) es proporcional al tamaño del dispositivo (figura 3.5). Esta imagen tiene que ser invertida para obtener un modelo del subsuelo, que se representa como una sección de resistividad interpretada, donde el eje horizontal es la línea de electrodos, y el eje vertical es la profundidad real (figura 3.8).

Para generar un modelo 2D que pueda ser geológicamente interpretable, los programas de inversión subdividen el subsuelo en celdas (cuyo tamaño, por defecto, aumenta con cada nivel para reflejar la pérdida de resolución en profundidad) según la distribución de los datos medidos (Loke y Barker, 1996a; Edwards, 1977) (figura 3.7). A partir de este mallado, se aplica el método de la diferencia finita (Dey y Morrison 1979a, 1979b) o los elementos finitos (Silvester y Ferrari 1990) para calcular la resistividad aparente de las celdas. Para reducir la diferencia entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados, los métodos de optimización modifican de manera iterativa los valores de resistividad del modelo final (figura 3.8) minimizando la diferencia absoluta, en el caso de norma L1 (o inversión robusta) (Claerbout y Muir 1973), o la suma de los cuadrados, en el caso de la norma L2 (deGroot-Hedlin y Constable 1990). El porcentaje de error del modelo final dependerá de la diferencia entre los datos medidos y los calculados (figura 3.8). Para este trabajo hemos utilizado el programa Res2Dinv (Geotomo Software), que es el software comercial más empleado en el mundo académico y empresarial por su fácil y rápida aplicación.

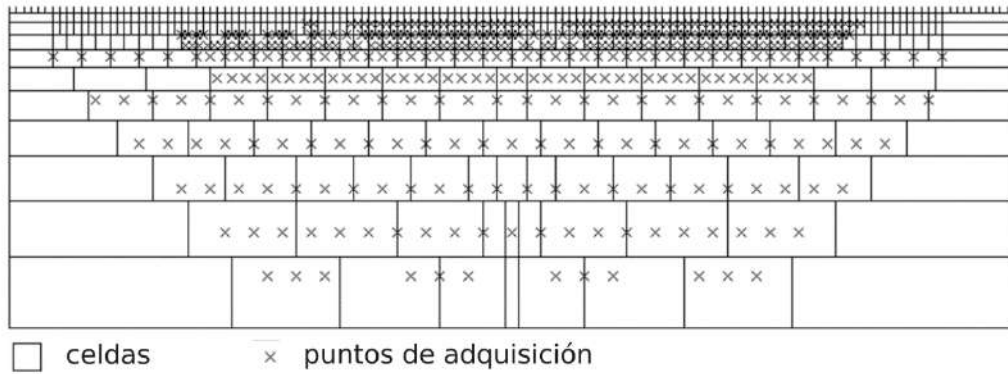


Figura 3.7. Subdivisión del subsuelo en celdas rectangulares (con un espesor que va creciendo en profundidad) para crear un modelo de resistividad 2D en el software Res2Dinv (modificada de Loke, 2011). El espesor de las celdas se adapta a la pseudoprofundidad de los puntos de adquisición.

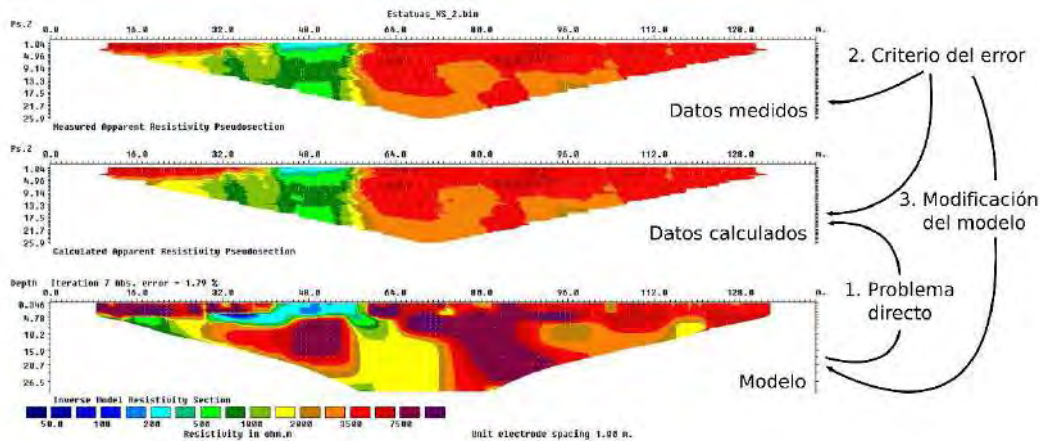


Figura 3.8. Inversión por el método iterativo en el software Res2Dinv (modificada de Chapellier, 2000).

La principal limitación de realizar perfiles 2D con este método es que los software de inversión consideran que la geometría del subsuelo es también 2D, por lo que no pueden compensar las variaciones de resistividad debidas a la complejidad de las estructuras geológicas (tan características de los sistemas kársticos) que ocurran en el espacio 3D por el que circula la corriente (figura 3.1). En este sentido, es necesario tener en cuenta los objetos 3D conocidos (cuevas, topografía) para interpretar correctamente los perfiles 2D.

La solución a este problema puede ser la realización de una tomografía de resistividad eléctrica 3D, que consiste en situar los electrodos de inyección de corriente ( $C_1$  y  $C_2$ ) en los nodos de una malla rectangular y medir todos los posibles potenciales (Loke y Barker, 1996b). Sin embargo, debido a la complejidad logística de este método, la práctica más común es crear una inversión 3D a partir de varios perfiles 2D paralelos y/o transversales. Este procedimiento ha sido estudiado por numerosos autores (Gharibi and Bentley 2005; Papadopoulos et al., 2006) que concuerdan que una densa adquisición de perfiles 2D compensa la pérdida de resolución en el resultado final, por el ahorro de tiempo en el trabajo de campo y en el tratamiento de datos.

En este trabajo hemos realizado principalmente prospecciones de carácter 2D, si bien en lugares de especial interés hemos dispuesto varios perfiles de forma paralela para obtener modelos 3D. La separación entre los perfiles paralelos ha sido igual o inferior a la separación entre electrodos, para obtener una buena resolución de datos (Aizebeokhai et al., 2009).

#### Utilidad de la ERT en los karst de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña

Diversos estudios han demostrado que la ERT es uno de los métodos de prospección geofísica más adecuados para caracterizar los diferentes elementos que componen un sistema kárstico (Chalikakis et al. 2011). En el caso de los karst de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña lo hemos elegido como método principal de estudio por el alto contraste de resistividad que existe entre la caliza (roca caja) y los sedimentos que rellenan las cuevas (figura 3.2), y porque ofrece una buena resolución de datos respecto a la profundidad de investigación requerida y las dimensiones de los objetos de estudio.

### **3.1.2 Adquisición de datos**

#### Sierra de Atapuerca

Las características generales de adquisición de los perfiles han sido las siguientes:

-se ha usado el resistímetro Syscal Pro (IRIS Instruments) junto con un dispositivo de conexión de 72 electrodos, disponible en el laboratorio de Cartografía Digital y Análisis 3D del CENIEH.

-los electrodos se han colocado a lo largo de un perfil rectilíneo y clavado a una distancia equidistante entre sí.

-se ha registrado la posición de cada electrodo con un GPS/GNSS LEICA GS15 de precisión centimétrica (del laboratorio de Cartografía Digital y Análisis 3D del CENIEH) para realizar la corrección topográfica en las inversiones e introducir las variaciones en la geometría del perfil.

-todos los perfiles se han adquirido en condiciones de máxima sequedad para evitar confusiones derivadas de la circulación de agua por el subsuelo (o las fisuras del karst). La mayor parte del trabajo ha sido realizado entre los meses de junio y julio, excepto los perfiles ERT\_45-ERT\_55 que se realizaron entre febrero y marzo porque la zona se encuentra sembrada en verano, por ser terreno rústico.

-la resistencia entre los electrodos no ha excedido los 10 k $\Omega$ , por lo general. Como el terreno calcáreo sobre el que se han clavado los electrodos es muy resistivo, ha sido necesario utilizar agua salada en muchos de los contactos electrodo-tierra para facilitar el paso de las corrientes eléctricas. Además, en algunos puntos, ha sido necesario perforar la caliza para colocar algunos electrodos. En estos casos, las perforaciones en las que se han introducido los electrodos se han rellenado con tierra húmeda.

-se ha establecido que 200 mV es el voltaje recibido máximo necesario y 3 mA la inyección mínima requerida para este medio. En los perfiles en los que la intensidad de inyección fue menor, los errores en la inversión han resultado más altos.

-todos los perfiles se han medido con los dispositivos dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger. Para acortar el tiempo de adquisición, el dispositivo WS ha sido aplicado en modo recíproco gracias al sistema multicanal del resistímetro.

-en algunos perfiles se ha medido también la polarización inducida o IP (ver apartado 3.2.2).

-todos los perfiles se han realizado a cielo abierto, excepto uno ERT\_43, que se hizo en el interior de Cueva Peluda.

## Ojo Guareña

Todos los perfiles realizados en el complejo kárstico de Ojo Guareña se han desarrollado en el interior de cuevas y han sido únicamente de carácter 2D. Las fechas en las que se han realizado las prospecciones han sido variadas, ya que las condiciones del interior del karst son estables a lo largo del año, entre los 10-11°C (Turrero et al., 2015), variando en los sectores de entrada por la influencia del exterior. Tampoco se ha hecho ninguna medida de polarización inducida. Por lo demás, las características de los perfiles de Ojo Guareña coinciden con las descritas para los perfiles de la Sierra de Atapuerca.

### 3.1.3 Tratamiento de datos

#### Filtrado

A lo largo de este trabajo hemos determinado que los siguientes pasos constituyen el procedimiento más adecuado para conseguir resultados de buena calidad con respecto a los datos obtenidos:

1) filtrado de los datos originales en el software Prosys II (IRIS Instruments) para conservar sólo los puntos que cumplan las siguientes características:

-rho: min 0; max 1000  $\Omega$ .m

-intensidad > 3 mA

-desviación estándar <10%

Además, en este programa se pueden introducir las coordenadas UTM de cada electrodo para corregir los valores de  $\rho_a$ , en el caso de que existan variaciones en los valores del coeficiente geométrico del perfil.

2) visualización de los datos en el software X2ipi (© Alexei A. Bobachev; Robain y Bobachev, 2017) para identificar y, en su caso, filtrar o eliminar los efectos P (generados por un electrodo de medida de potencial) y C (generados por un electrodo de inyección de corriente) (figura 3.9 y 3.10). Estos efectos están relacionados con las heterogeneidades del terreno y generan anomalías verticales y oblicuas (Ritz et al., 1999; Robain y Bobachev, 2017), respectivamente, en los perfiles medidos con un dispositivo WS y sólo oblicuas (con diferentes ángulos) en el caso del dispositivo DD.

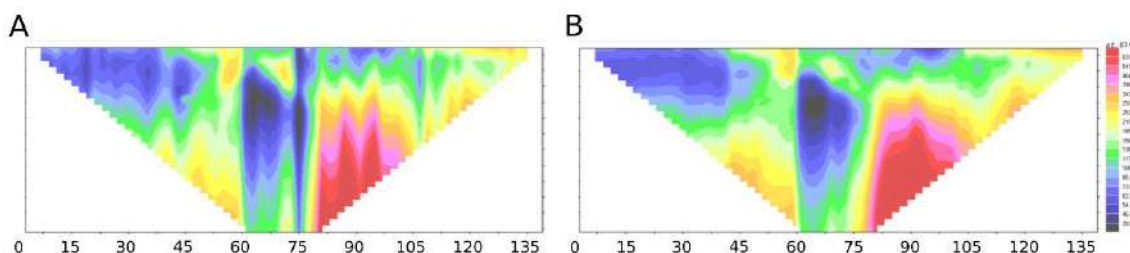


Figura 3.9. A: perfil con efectos P. B: mismo perfil con los efectos P filtrados en el software X2ipi.

Los puntos 1 y 2 están estrechamente relacionados entre sí ya que, sin el correcto filtrado en Prosys II, puede que algunos errores no sean identificables en X2ipi. Esto sucede especialmente en los perfiles que no son del todo rectilíneos y en los que el resultado de corregir de los valores  $\rho_a$  a partir de la posición de cada electrodo es realmente significativo (figura 3.10).



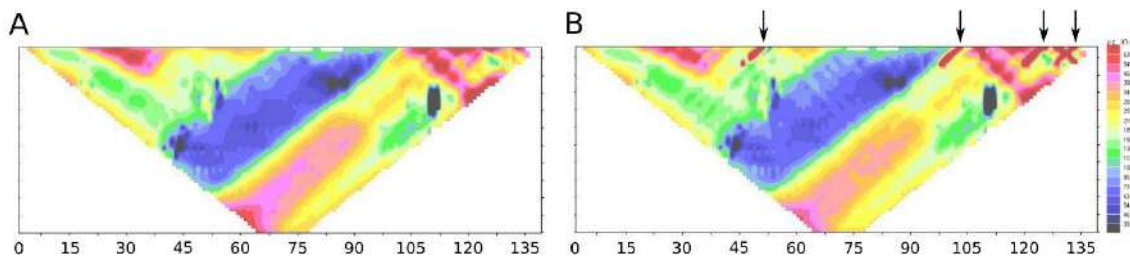


Figura 3.10. A: perfil sin cambios en los valores del coeficiente geométrico. B: mismo perfil con corrección de los valores  $\rho_a$  a partir de la localización de cada electrodo, en el que se aparecen varios efectos C (señalados con flechas) que no se apreciaban previamente.

### Procesado

Para crear modelos de resistividad 2D, la inversión de los datos se ha realizado en el software Res2Dinv (versión 4.04.01, Geotomo Software). Para los modelos 3D a partir de varios perfiles 2D paralelos, la inversión se ha hecho en el software Res3Dinv (versión 3.10.02, Geotomo Software). En ambos software se ha optado por una inversión de tipo robusta, que es menos sensible a los errores de potencial (Zhou y Dalin, 2003) y produce modelos con límites más rectos y nítidos entre los diferentes valores de resistividad (Loke et al., 2003), tal y como se espera en un ambiente kárstico.

El software Res2Dinv también permite calcular el índice de profundidad de investigación o DOI (del acrónimo inglés Depth Of Investigation), que establece el límite de fiabilidad de los datos en profundidad. Este índice, definido por Oldenburg y Li (1999) y modificado por Marescot et al. (2003), ha sido empleado en el estudio de entornos kársticos que requerían una gran profundidad de investigación (Robert et al., 2011; Martínez-Moreno et al., 2013).

En la Sierra de Atapuerca, se calculó el DOI para una parte de los perfiles (Bermejo et al., 2017), a pesar de que la profundidad de investigación no superaba los 30 m de profundidad. Este estudio reveló que, en todos los casos, los datos de mayor incertidumbre correspondían únicamente a los límites del perfil y a las zonas de muy alta resistividad. Por esta razón, hemos decidido no extender el cálculo del DOI al resto de perfiles presentados en este trabajo.

### Presentación

La elaboración de las imágenes finales de todos los perfiles y plantas se ha realizado en el software Surfer 12 (Golden Software). En algunos casos, estas imágenes se presentan en combinación con los planos y alzados de los sistemas kársticos de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña, cuyo diseño ha sido realizado por el Grupo Espeleológico Edelweiss (GEE) (Martín et al., 1981; GEE, 1986; Ortega, 2009, Ortega et al., 2012, 2013) en el software AutoCAD (Autodesk, Inc.).

Para facilitar la lectura de los perfiles, en este manuscrito se presenta un solo resultado final por dispositivo y perfil y no así los pasos de filtrado intermedio, cuyo procedimiento se especifica en el apartado anterior.

También hemos establecido el criterio de situar el norte y el oeste en el lado izquierdo del perfil. Por otro lado, y a no ser que los perfiles tengan que compararse entre sí, se ha priorizado el uso de una escala métrica que favorezca su lectura y no una proporcional al resto de perfiles, que cuentan con longitudes muy diferentes entre sí.



En cuanto a la escala de color para reflejar los cambios de resistividad, hemos optado por una escala tipo jet o arcoíris, en la que los colores fríos (azules) representan las resistividades más bajas y los cálidos (rojos) las resistividades más altas. Esta escala ha sido aplicada de manera tradicional porque ayuda a la interpretación de los resultados, lo que resulta especialmente útil en un foro no especializado en tomografía eléctrica (como puede ser la arqueología). Para algunos autores, sin embargo, impide una lectura crítica de los resultados, por lo que proponen el uso de otras escalas perceptualmente más uniformes (Van der Walt y Smith, 2015).

En este sentido, el uso de la escala viridis es el que más consenso ha generado. Además, esta escala tiene la ventaja de que la progresión de valores sigue siendo inteligible si se convierte en escala de grises y también es la más adecuada para personas con deficiencia visual (Nuñez et al., 2018; Rudis et al., 2018; Van der Walt y Smith, 2020). Por todas estas razones, hemos incluido en el anexo II una versión de los perfiles y plantas presentados en el capítulo de resultados, con la escala viridis.

### 3.1.4 Modelización

La modelización es un proceso ideado para mostrar los efectos de los diferentes tipos de dispositivos en los datos de tomografía eléctrica (Dahlin y Loke, 1998; Dahlin y Zhou, 2004; Athanasiou et al., 2007), con el fin de que el usuario escoja el dispositivo más adecuado para su estudio. No obstante, en este trabajo hemos aplicado la modelización para descartar o mantener algunas de las hipótesis desarrolladas a partir de la interpretación de los perfiles.

Tal y como se ha explicado anteriormente, los programas de inversión convierten la resistividad aparente en un modelo del terreno que posteriormente debe ser interpretado por el usuario, teniendo en cuenta los principios del método y las características del medio. En este sentido, algunos modelos pueden resultar ambiguos, difíciles de interpretar o incluso geológicamente inverosímiles. Las causas que pueden generar un conflicto de interpretación son variadas:

- un conjunto de datos inconsistentes o de baja calidad provoca, generalmente, la aparición de artefactos no apoyados por los datos, durante el proceso de inversión. También es común que estos artefactos aparezcan en un horizonte en el que haya un alto contraste de resistividades.

- los límites de un objeto que no se encuentre recogido en su totalidad dentro de un perfil estarán mal delimitados, lo que puede dar lugar a interpretaciones erróneas, sobre todo en cuanto a su relación (conexión) con otros objetos.

- puesto que las corrientes eléctricas circulan por el espacio 3D (figura 3.1), los objetos situados a su alcance (cuyo rango dependerá de la separación entre electrodos, la corriente de inyección empleada o la resistividad del medio) pueden influenciar los valores de resistividad representados en el modelo 2D.

- las estructuras conductoras pueden concentrar las corrientes eléctricas, provocando que las zonas situadas debajo o al lado de dicha estructura aparezcan caracterizadas de manera errónea.

La manera de acercarse a la solución de estos problemas es construir la interpretación a la inversa, es decir, crear un modelo del subsuelo con la localización y el valor de resistividad que atribuimos a cada objeto (según nuestra interpretación) e invertirlo como si fueran datos reales. En cualquier caso, la interpretación de estos resultados deber ser realizada con la misma precaución que los de datos reales, ya que hay que tener en cuenta que el proceso de inversión genera un modelo que supone una solución entre una infinidad.

En este trabajo, hemos usado el programa Res2Dmod (ver. 3.01, Geotomo Software) para calcular la resistividad aparente de diferentes modelos, que hemos exportado (sin añadir ningún tipo de ruido) en formato Res2Dinv e invertido con los mismos parámetros que el resto de perfiles. Para estudiar la influencia del espacio 3D en un perfil 2D hemos diseñado modelos 3D del subsuelo en el programa Res3Dmod (ver. 3.04, Geotomo Software), de los que hemos extraído pseudosecciones de resistividad aparente para invertirlas en software Res2Dinv.

## 3.2 GEORRADAR

### 3.2.1 Introducción

#### Breve historia del método

El georradar o GPR (del acrónimo inglés Ground-Penetrating Radar) surge de la aplicación del radar (del acrónimo inglés RAdio Detection And Ranging) para la prospección del subsuelo. El primero en usarlo con este propósito fue Stern (1929), quien determinó la potencia de hielo de un glaciar en Austria. Sin embargo, este método cayó en desuso hasta la década de 1950, cuando un accidente aéreo en Groenlandia puso de nuevo de manifiesto la capacidad de penetración de las ondas radar en el subsuelo. El accidente se produjo porque los técnicos del ejército del aire de USA, interpretaron erróneamente la distancia de la superficie de aterrizaje al confundirla con las reflexiones provocadas por la base del glaciar (Milsom y Eriksen, 2011; Conyers, 2013). Así, el GPR empezó a ser utilizado en estudios del permafrost (Cook, 1960; Barringer, 1965; Swithinbank, 1968; Watts et al., 1975), a la par que nuevas técnicas de procesamiento procedentes de la prospección sísmica mejoraban la resolución del método (Milsom y Eriksen, 2011). A partir de la década de 1970, los sistemas GPR empezaron a fabricarse de manera comercial, lo que incrementó de manera drástica su uso y aplicación en ámbitos tan diversos como la minería, la construcción, la agricultura, estudios medioambientales, la detección de cuevas y túneles y la investigación forense (Piro, 2009).

En arqueología, el GPR se utilizó por primera vez en Chaco Canyon, Nuevo México, para la detección de muros enterrados a una profundidad de un metro (Vickers y Dolphin, 1975; Vickers et al., 1976), tras lo cual se aplicó para la localización de estructuras en diversas investigaciones arqueológicas (Bevan y Kenyon, 1975; Kenyon, 1977; Fischer et al., 1980; Sheets et al., 1985). Estos primeros estudios se realizaron en ambientes secos y eléctricamente resistivos, que son los más adecuados para el GPR, y no fue hasta 1982-83, en el estudio de Red Bay, Labrador (Vaughan, 1986), que este método se aplicó en un entorno con suelos húmedos y estratigrafía compleja. Este estudio fue, además, el primero en calcular con precisión la profundidad a la que se hallaban los objetos enterrados (Conyers, 2013). A partir de este momento, el método se desarrolló especialmente en Japón (Imai et al., 1987; Goodman y Nishimura, 1993), donde los avances en la informática permitieron convertir por primera vez los datos de GPR en archivos digitales que procesar en softwares diseñados específicamente para ello (Goodman, 1994, 1996; Conyers y Goodman, 1997).

A pesar de que el uso del GPR para la detección de contactos litológicos empezó a utilizarse en este mismo periodo (Doolittle, 1982; Davis y Annan, 1989; Baker, 1991), su aplicación al karst se centró en el ámbito de la hidrogeología para la identificación de zonas saturadas (Holub y Dumitresku, 1994; Al-Fares et al., 2002), dolinas (Carpenter et al., 1998) y cavidades vacías (McMechan et al., 1998; Beres et al., 2001), generalmente en combinación con otros métodos. En este sentido, pocos trabajos se han centrado en el estudio de rellenos kársticos por el carácter arcilloso de sus sedimentos (Piscitelli et al., 2007; Schrott y Sass, 2008; Kaufmann y Deceuster, 2014; Lanzarone et al., 2019).

### Principios del método

El georradar es un método electromagnético que utiliza ondas con frecuencias entre los 10 MHz y los 4 GHz para detectar interfases entre materiales con diferentes propiedades dieléctricas, cuya aplicación puede realizarse de diferentes maneras.

Por un lado, la adquisición con el método de onda reflejada se realiza con dos antenas que se mueven a la par: una funciona de emisor (Tx), radiando pulsos de ondas a una frecuencia determinada; y la otra de receptor (Rx), registrando parte de la energía que se refleja cuando la onda encuentra una heterogeneidad, mientras que la energía restante sigue penetrando en el subsuelo hasta que se disipa. Una unidad de almacenamiento, conectada a las antenas, registra la energía reflejada a medida que las antenas se deslizan por la superficie (figura 3.12).

El eje vertical de los perfiles o radargramas adquiridos de esta manera se expresa en tiempo (nanosegundos, *ns*) de ida y vuelta, también llamado twt (del acrónimo inglés two-way travel time), que es el tiempo que tarda la energía desde que es emitida por la antena Tx hasta que es recibida de nuevo por la Rx (figura 3.12). Calculando la velocidad de propagación de la onda, con el análisis de la curvatura de las líneas asintóticas de las hipérbolas, se puede convertir el twt en profundidad (metros, *m*).

Por otro lado están los métodos de onda directa, que miden el tiempo de ida transcurrido entre que una antena emite y la otra recibe, para el estudio de un área que debe encontrarse entre las dos antenas. La velocidad se calcula conociendo la distancia entre las dos antenas con la técnica CMP (del acrónimo inglés common mid-point) o WARR (del acrónimo inglés wide-angle refraction and reflection) (Conyers y Lucius 1996).

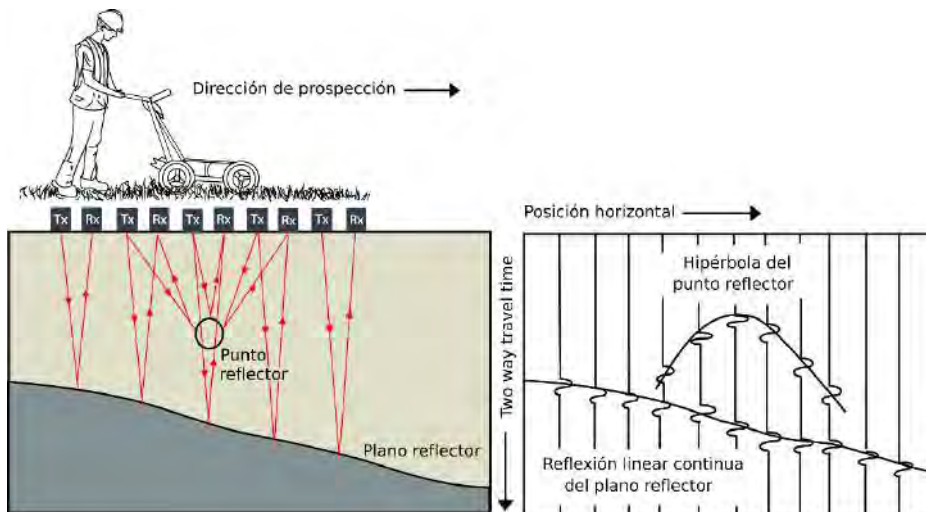


Figura 3.12. Método de adquisición de perfiles GPR (modificada de Scantech Geosciences, 2020).

La capacidad de propagación de una onda depende principalmente de las propiedades dieléctricas del subsuelo, que a su vez están controladas por su contenido en agua, y en menor medida de sus propiedades magnéticas y de la conductividad eléctrica, que contribuye a su atenuación. La permitividad dieléctrica relativa puede calcularse a partir del radio de curvatura de una reflexión hiperbólica, como la de la figura 3.12.

La velocidad de las ondas radar (*V*) obedece a las ecuaciones de Maxwell y se expresa con la siguiente ecuación:

$$V = c/V (\mu_r \cdot \epsilon_r)$$

en la que  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ),  $\mu_r$  es la permeabilidad magnética relativa y  $\epsilon_r$  la permitividad dieléctrica relativa.

La longitud de onda, cuyo tamaño determina la resolución vertical de la prospección GPR, es igual a la velocidad de la onda dividida por la frecuencia de la antena. Así, el tamaño y la profundidad a la que se hallen los objetos determinarán la frecuencia de la antena necesaria para cada estudio.

Para evaluar la calidad de los datos obtenidos es importante observar el comportamiento de la señal reflejada. Un pulso ideal se compone de ondículas individualizadas, correspondientes a diferentes interfases, cuya amplitud depende del contraste de permitividad dieléctrica entre los niveles de dicha interfase (figura 3.13). Los pulsos registrados en un medio natural adquieren, sin embargo, formas complejas (figura 3.14 A). Esto puede ser debido a interferencias u ondículas superpuestas, resultado de dos interfases con una distancia inferior a la longitud de onda (figura 3.14 B), o al ruido de fondo provocado por ondas de radio o de teléfonos móviles.

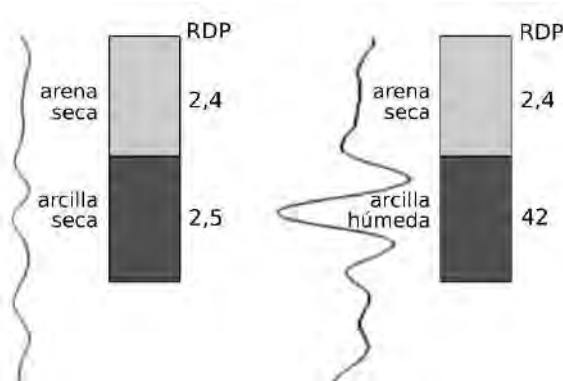


Figura 3.13. Comportamiento de un pulso ante diferentes contrastes de permitividad dieléctrica relativa (RDP) (modificada de Conyers, 2012).

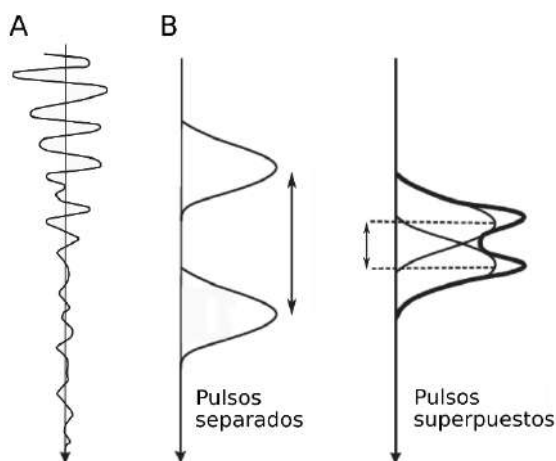


Figura 3.14. A: Pulso normal con ondículas superpuestas y ruido de fondo. B: Resolución temporal entre dos pulsos: el de la izquierda mayor a la longitud de onda y el de la derecha inferior (modificada de Reynolds, 2011).

La polaridad de las ondas puede determinar, además, la localización de espacios vacíos. Según la teoría de “polaridad inversa” descrita por Conyers (2013), la óndula de una interfase techo-vacío tendrá una polaridad inversa a la óndula generada en la primera interfase de la señal, ya que la velocidad de la onda incrementará al entrar en un espacio vacío (figura 3.15).

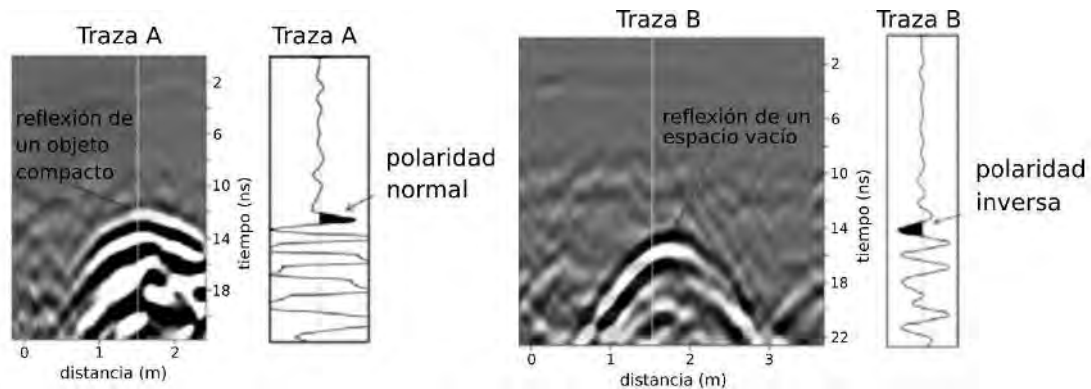


Figura 3.15. Ejemplos de polaridad normal y polaridad inversa (modificada de Conyers, 2013).

Una de las mayores ventajas del GPR es su rapidez de empleo, lo que permite adquirir numerosos perfiles en un periodo de tiempo relativamente corto. Por ello, es común plantear la adquisición de varios perfiles paralelos, separados entre sí de manera equidistante. A partir de este mallado, se pueden construir mapas del área de estudio en los que se representen las reflexiones correspondientes a una determinada profundidad. Estos mapas permiten visualizar, en detalle, la extensión y forma de las estructuras enterradas con respecto a las similitudes entre las amplitudes de reflexión registradas en los diferentes perfiles paralelos. En algunas ocasiones permiten, incluso, identificar estructuras que habrían pasado desapercibidas en la interpretación de perfiles individuales. Finalmente, es posible crear modelos 3D del subsuelo compilando mapas horizontales consecutivos (figura 3.16).

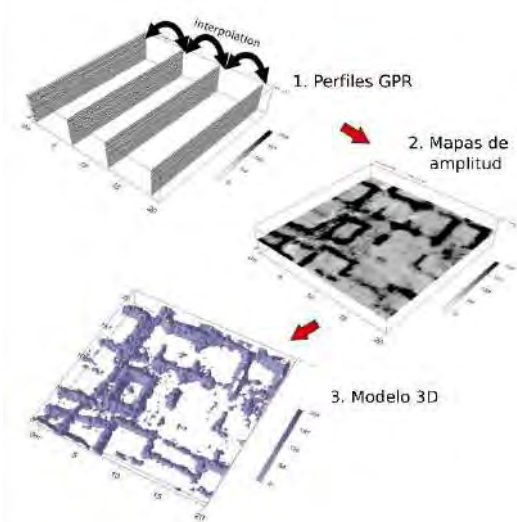


Figura 3.16. Proceso de creación de un modelo 3D (modificada de Sala et al., 2012).

En este trabajo hemos adquirido principalmente perfiles de carácter 2D, si bien en lugares de especial interés hemos dispuesto varios perfiles de forma paralela para obtener mapas de amplitud y modelos 3D.

## Utilidad del GPR en la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña

Hemos aplicado el GPR en estos yacimientos por su rapidez de adquisición y porque, en áreas con ausencia de sedimentos, aporta información complementaria a la prospección ERT, en concreto en zonas eléctricamente muy resistivas y, por lo tanto, mal definidas por la prospección eléctrica, en las que el GPR puede aportar información más detallada de una estructura, así como determinar o descartar la presencia de un vacío.

### **3.2.2 Adquisición de datos**

#### Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña

Las características generales de adquisición de los perfiles han sido las siguientes:

- todos los perfiles se han adquirido con el método de onda reflejada.
- la mayoría de los perfiles se han adquirido con el software Synchro 3 y unas antenas VIY®3 (Transient Technologies) de 300 MHz, disponibles en el laboratorio de Cartografía Digital y Análisis 3D del CENIEH.
- para los perfiles realizados en la Trinchera del ferrocarril de la Sierra de Atapuerca se han utilizado unas antenas de 270 MHz y una unidad de almacenamiento GSSI SIR-300 aportada por el Dr. Lawrence B. Conyers, de la Universidad de Denver.
- todos los perfiles son rectilíneos y de una longitud máxima de 100 m.
- se ha registrado el inicio y el final de cada perfil con un GPS/GNSS LEICA GS15 de precisión centimétrica (del laboratorio de Cartografía Digital y Análisis 3D del CENIEH), así como cambios significativos en la topografía de su recorrido para su corrección.
- la prospección se ha limitado a caminos y a zonas llanas del interior de las cuevas porque la abrupta superficie del resto del área de estudio impide mantener la antena en constante contacto con la superficie.
- los perfiles paralelos se han adquirido con una distancia de 50 cm de separación entre sí, para no solapar el alcance lateral de la energía propagada por el radar.
- los perfiles de exterior se han adquirido en condiciones de máxima sequedad para alcanzar una mayor profundidad de investigación. Por esta razón, la mayor parte del trabajo ha sido realizado entre los meses de junio y julio, excepto los perfiles GPR\_93-96, que se realizaron en abril porque la zona de trabajo es un terreno rústico que se encuentra sembrada en verano.
- las fechas de los perfiles realizados en el interior de las cuevas han sido variadas, ya que las condiciones del interior del karst son estables a lo largo del año, con unos 11 ° C y 99 % de humedad.

### **3.2.3 Tratamiento de datos**

#### Filtrado

A lo largo de este trabajo hemos determinado que los siguientes pasos constituyen el procedimiento más adecuado para conseguir resultados de buena calidad con respecto a los datos obtenidos:

- 1) filtrado de alta y baja frecuencia de los valores por encima de 500 MHz y por debajo de 100 MHz para eliminar el ruido de fondo.
- 2) modificación manual de las ganancias para resaltar estructuras poco visibles, sobre todo en profundidad.
- 3) cálculo de la velocidad de propagación de la onda radar, a partir de los radios de curvatura de las reflexiones hiperbólicas completas, para convertir el twt en profundidad.

Para los datos adquiridos con las antenas VIY®3, estos procesos se han realizado con los software Synchro 3 (ver. 3.10.1.7), Reflex2DQuick (ver. 4.0) y GPR-slice (ver 7.0), este último disponible en el Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, Roma. Para los de las antenas GSSI, este filtrado se ha realizado con el software GPR Viewer (ver. 1.6.2.0).

#### Procesado

Los mapas de amplitud se han elaborado con el software GPR-slice para los perfiles adquiridos con las antenas VIY®3, y con el programa GPR Process (ver. 1.7.6) para los de las antenas GSSI. En ambos software hemos escogido una ventana temporal igual o mayor a la longitud de onda para representar correctamente las dimensiones de las estructuras enterradas.

Los modelos 3D del subsuelo se han realizado con el software de procesado de imágenes ImageJ (ver. 1.52, National Institute of Health), a partir de mapas de amplitud consecutivos.

En el caso de Cueva Peluda (Sierra de Atapuerca), se ha usado el software Cloud Compare (ver. 2.10.2) para comparar el modelo 3D de la cueva con un escaneo de la misma realizado con un escáner láser Faro Focus X330, disponible en el laboratorio de Cartografía Digital y Análisis 3D del CENIEH.

#### Presentación

Para facilitar su lectura, en este manuscrito se presenta un solo resultado final por perfil y no los pasos de filtrado intermedio. También hemos establecido el criterio de situar el norte y el oeste en el lado izquierdo del perfil. Por otro lado, y a no ser que los perfiles tengan que compararse entre sí, se ha priorizado el uso de una escala métrica y no una proporcional al resto de perfiles, que cuentan con longitudes muy diferentes entre sí.

En cuanto a la escala de color para los perfiles GPR, hemos optado por una escala de grises, en la que las reflexiones de mayor amplitud están representadas por los colores más claros. En los perfiles procesados con el software GPR-slice, sin embargo, están representadas por colores cálidos.

La elaboración de las imágenes finales de los mapas de amplitud creados con el programa GPR Process, se ha realizado en el software Surfer 12. En algunos casos, estas imágenes se presentan en combinación con los planos de los sistemas kársticos de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña, cuyo diseño ha sido realizado por el G.E.E (Ortega et al., 2012, 2013) en el software AutoCAD.



## **RESULTADOS**

## 4. RESULTADOS

### 4.1 SIERRA DE ATAPUERCA

#### 4.1.1 Planificación del trabajo de campo

Las prospecciones geofísicas realizadas para el estudio del karst de la Sierra de Atapuerca se desarrollaron en varias fases que se describen a continuación.

##### 4.1.1.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

La validez de los resultados de las prospecciones de ERT realizadas entre 2003 y 2006 para la tesis doctoral de Ana Isabel Ortega (2009) (figura 4.1) alentaron la continuidad de estos trabajos para el estudio de las cavidades seccionadas por la trinchera del ferrocarril. Por esta razón, en 2007 se encargó a la empresa AGS (Análisis y Gestión del Subsuelo) la realización de dos mallas de perfiles de ERT sobre los yacimientos de Gran Dolina-Galería y Sima del Elefante (figura 4.1), que se corresponden con los perfiles de la malla ERT\_M publicados en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1) y los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 que se presentan en este manuscrito, respectivamente. Además, se realizaron dos perfiles (2.1 y 2.2) en la trinchera del ferrocarril para conocer la profundidad del relleno sedimentario del yacimiento de la Sima del Elefante (figura 4.1), que se recogen en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2).

Posteriormente, para el proyecto de la presente tesis doctoral, se establecieron nuevas áreas de estudio que permitieran completar la relación entre las cavidades conocidas y los conductos colmatados descubiertos en los trabajos anteriores, así como su relación con los valles y los límites de la Sierra de Atapuerca. En este sentido, algunos de los perfiles de esta nueva investigación se sitúan alrededor o paralelos a los anteriores y en las zonas de mayor densidad se disponen de manera perpendicular o se cruzan entre sí (figura 4.1).

Asimismo, se ha primado el estudio de localizaciones de relevancia arqueológica, por lo que los yacimientos de Cueva Fantasma, Gran Dolina, el Complejo Galería, Galería de las Estatuas, Sima del Elefante, Cueva Peluda y Sala de los Cíclopes son los que concentran la mayor parte de los perfiles de ERT, mientras que en zonas inexploradas o menos susceptibles de contener restos arqueológicos se han realizado perfiles singulares (figura 4.1).

Finalmente, hay que tener en cuenta dos agentes adicionales que han condicionado en gran medida la disposición de los perfiles de ERT. En primer lugar, el desarrollo de la erosión de la ladera ha retirado gran parte del paquete calizo que se superpone sobre los conductos del nivel inferior e intermedio, lo que permite su estudio con mayor detalle. Sin embargo, el nivel superior del karst resulta más profundo con respecto a la superficie, lo que implica una pérdida de precisión en los resultados de la prospección eléctrica que en la mayor parte de los casos ha disuadido de su empleo. En segundo lugar, la orografía de la Sierra de Atapuerca presenta numerosos huecos de canteras, escombreras y diversas construcciones antrópicas (como la propia trinchera del ferrocarril) que impiden la realización de perfiles de cierta longitud y/u orientación (figura 4.1).

En total, en el periodo de tiempo transcurrido entre 2015 y 2019 se ha realizado 46 nuevos perfiles de ERT (figura 4.1).

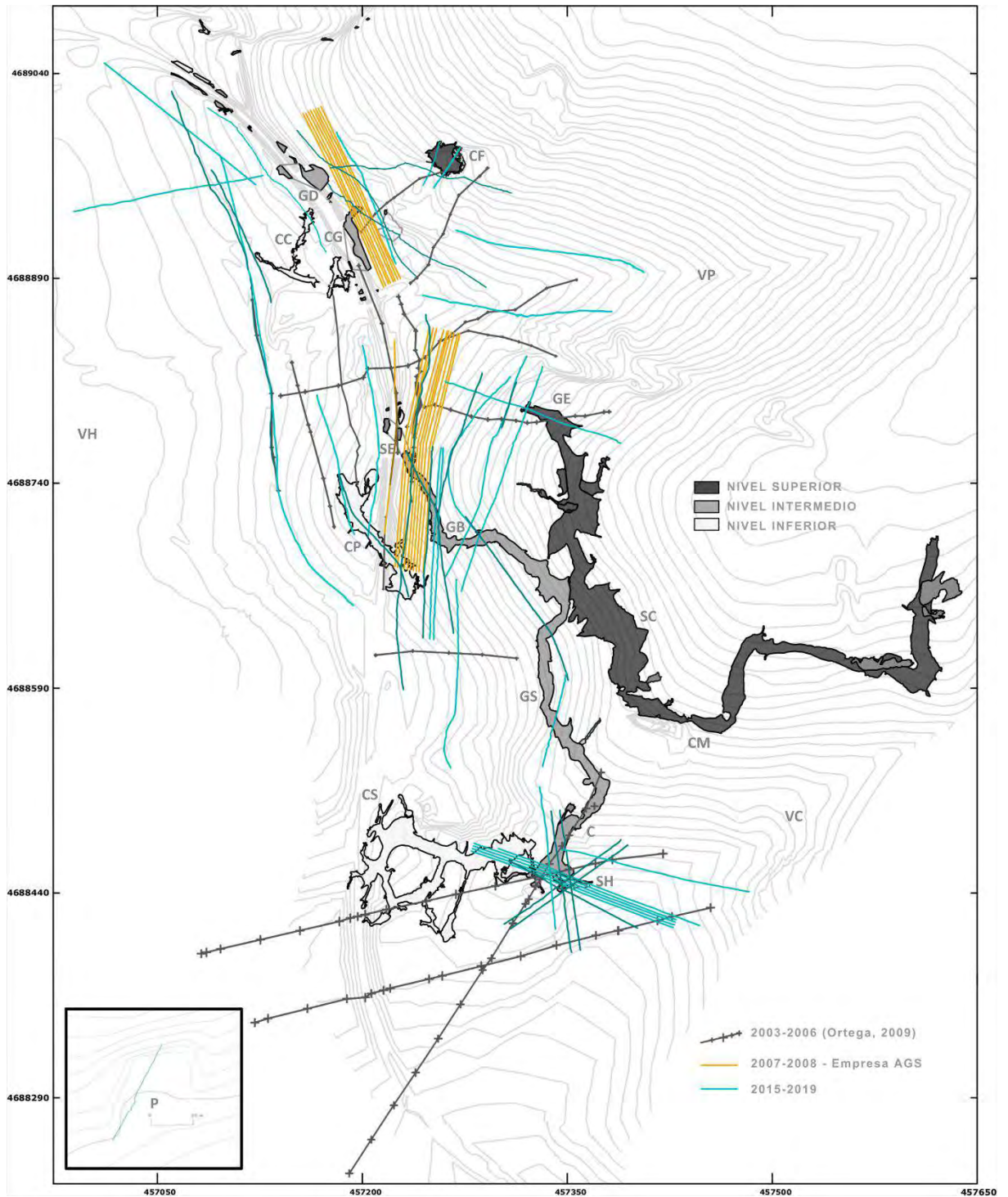


Figura 4.1. Localización de los perfiles de ERT realizados en el karst de la Sierra de Atapuerca. CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; SC Salón del Coro; CM Cueva Mayor; VC Valle de Cueva Mayor; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor; SE Sima del Elefante; GB Galería Baja; GS Galería del Silo; C Sala de los Cíclopes; SH Sima de los Huesos; CP Cueva Peluda; CS Cueva del Silo; VH Valle de Valhondo, y P Paredeja.

Las características específicas de cada uno de los perfiles que se presentan en este trabajo se recogen en la siguiente tabla:

Nombre	Separación electr. (m)	Longitud total (m)	Sector karst	Nivel karst
ERT_1	0.50	35.50	Trinchera	Superior
ERT_2	0.50	35.50	Trinchera	Superior
ERT_3	2.00	142.00	Trinchera	Superior
ERT_4	2.00	142.00	Trinchera	Superior
ERT_5	2.00	142.00	Trinchera	Int./Inf.
ERT_6	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
ERT_7	1.50	106.50	Trinchera	Intermedio
ERT_8	2.00	142.00	Trinchera/ V. Propiedad	Intermedio
ERT_9	2.00	142.00	Trinchera	Inferior
ERT_10	2.00	142.00	Trinchera	Inferior
ERT_11	2.00	142.00	Trinchera/V. Valhondo	Inferior
ERT_12	1.50	106.50	Trinchera	Inferior
ERT_13	5.00	355.00	Trinchera/V. Propiedad/C. Mayor	Inferior
ERT_14	2.00	142.00	V. Propiedad	Superior
ERT_15	2.00	142.00	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_16	2.00	142.00	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_17	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_18	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_19	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_20	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_21	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_22	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_23	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_24	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_25	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_26	2.50	177.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_27	2.00	142.00	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Inferior
ERT_28	1.50	106.50	V. Propiedad/C. Mayor-C. Silo	Inferior
ERT_29	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Superior
ERT_30	1.50	106.50	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_31	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_32	2.50	177.50	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_33	0.50	35.50	C. Mayor-C. Silo	Superior
ERT_34	2.50	177.50	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_35	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_36	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_37	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Sup./Int.
ERT_38	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Superior
ERT_39	1.00	71.00	C. Mayor-C. Silo	Superior
ERT_40	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Intermedio
ERT_41	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Int./Inf.
ERT_42	2.00	142.00	C. Mayor-C. Silo	Int./Inf.

ERT_43	1.50	106.50	C. Mayor-C. Silo	Inferior
ERT_44	2.00	106.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Sup./Int.
ERT_45	1.50	106.50	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Sup./Int.
ERT_46	1.50	106.50	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Sup./Int.
ERT_47	2.00	142.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Sup./Int.
ERT_48	1.50	106.50	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Sup./Int.
ERT_49	1.50	106.50	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Sup./Int.
ERT_50	3.00	159.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Int./Inf.
ERT_51	3.00	159.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Int./Inf.
ERT_52	3.00	159.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Int./Inf.
ERT_53	3.00	159.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Int./Inf.
ERT_54	3.00	159.00	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Int./Inf.
ERT_55	1.50	106.50	C. Mayor-V. Cueva Mayor	Int./Inf.
ERT_56	1.00	53.00	La Paredaja	Inferior
1 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
2 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
3 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
4 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
5 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
6 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
7 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
8 (ERT_M)	2.00	142.00	Trinchera	Intermedio
2.1	1.00	71.00	Trinchera	Int./Inf.
2.2	2.00	142.00	Trinchera	Int./Inf.

Figura 4.2. Características de cada uno de los perfiles de ERT presentados en este trabajo.

#### 4.1.1.2 Georradar (GPR)

Una vez que los resultados de las prospecciones de ERT habían apuntado el potencial de la geofísica en la identificación de diferentes morfologías endokársticas, se decidió aplicar un método de prospección complementario para mejorar la interpretación de los datos adquiridos. De entre los métodos electromagnéticos se eligió el georradar por su rápida y fácil aplicación, que permite cubrir grandes extensiones de terreno en un periodo de tiempo relativamente corto, y por la poca influencia que generan las construcciones antrópicas, como las líneas de electricidad o los andamios de las excavaciones, en las frecuencias utilizadas para este tipo de prospecciones.

Debido a que las antenas de radar tienen que estar en contacto constante con el suelo, ya que, de lo contrario, se generan cambios de acoplamiento que impiden la correcta interpretación de los datos registrados, la adquisición de los perfiles de GPR debía llevarse a cabo en superficies desprovistas de obstáculos y preferiblemente llanas. En este sentido, el terreno de estudio de la Sierra de Atapuerca es limitado. El relieve irregular generado por los huecos de canteras, escombreras y diversas construcciones antrópicas y el denso bosque presente en la ladera oeste de la sierra restringen el área de prospección a los caminos de servicio de las canteras y a la trinchera del ferrocarril (figura 4.3). Posteriormente, la limpieza del yacimiento de Cueva Fantasma permitiría la realización de varios perfiles paralelos en las superficies más uniformes.

En total, los trabajos de prospección permitieron adquirir 96 perfiles de GPR (figura 4.4), cuyo detallado estudio se presentan en el apartado de resultados.

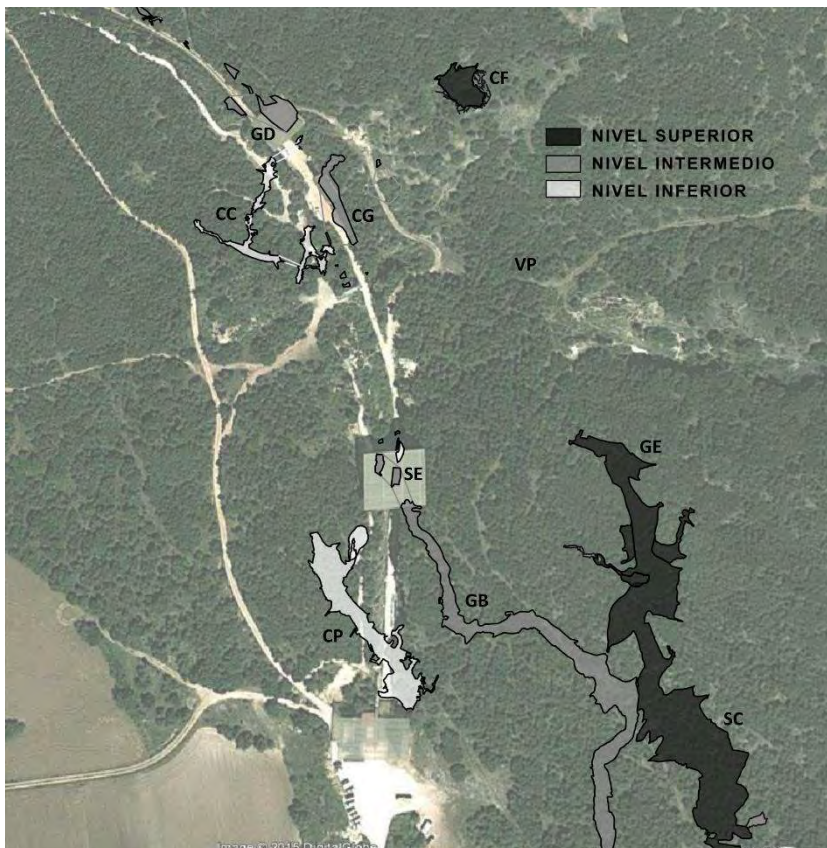


Figura 4.3. Figura de detalle del karst de la Sierra de Atapuerca sobre la ortofoto IBERPIX (IGN 2005) en la que se aprecian los caminos y la densidad del bosque. CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; SC Salón del Coro; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor; SE Sima del Elefante; GB Galería Baja.



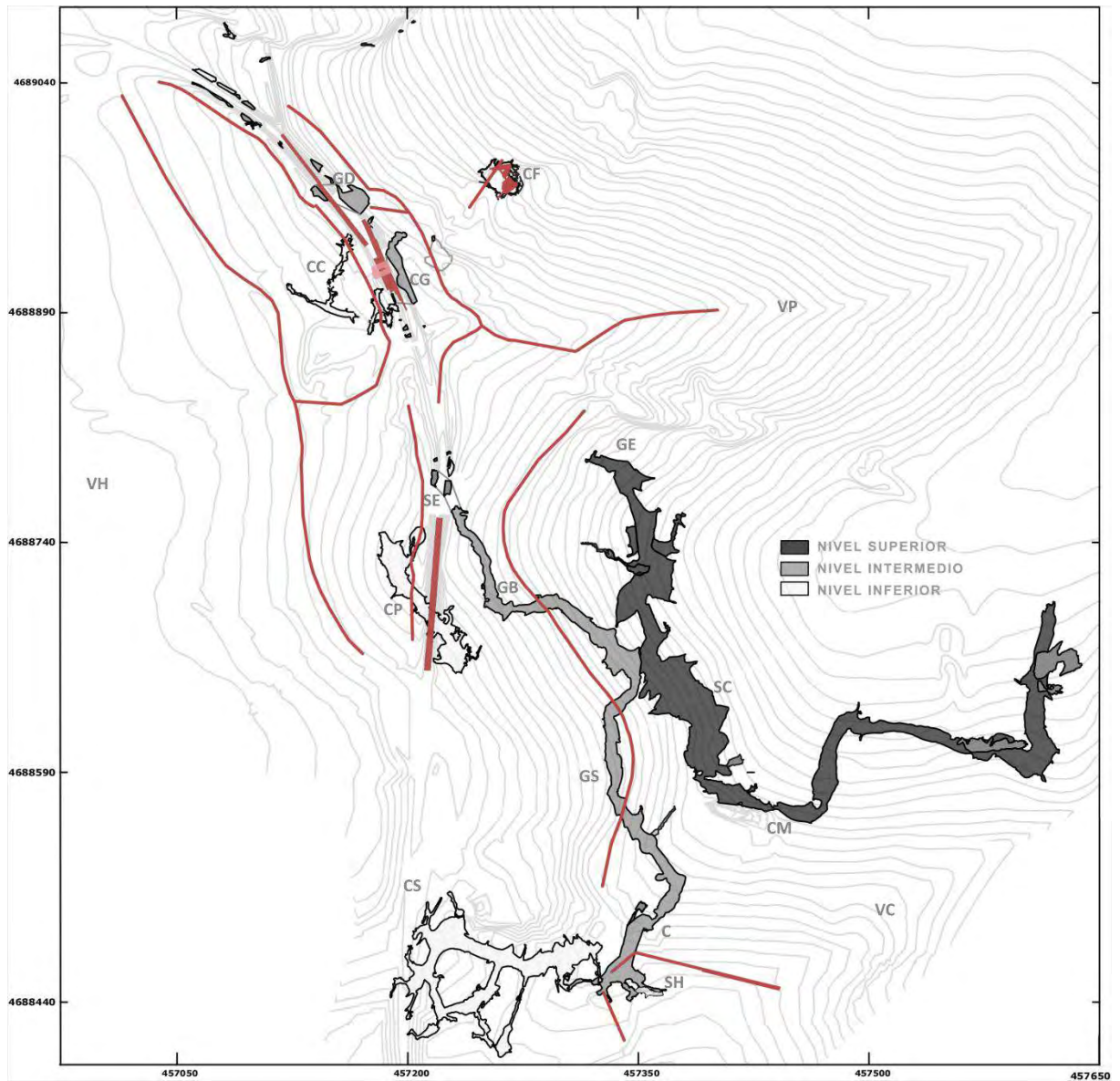


Figura 4.4. Localización de los perfiles de GPR realizados en el karst de la Sierra de Atapuerca. CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; SC Salón del Coro; CM Cueva Mayor; VC Valle de Cueva Mayor; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor; SE Sima del Elefante; GB Galería Baja; GS Galería del Silo; C Sala de los Cíclopes; SH Sima de los Huesos; CP Cueva Peluda; CS Cueva del Silo, y VH Valle de Valhondo.

Las características específicas de cada uno de los perfiles que se presentan en este trabajo se recogen en la siguiente tabla:

<b>Nombre</b>	<b>Longitud total (m)</b>	<b>Sector karst</b>	<b>Nivel karst</b>
GPR_1	37.50	Trinchera	Superior
GPR_2	9.00	Trinchera	Superior
GPR_3	9.00	Trinchera	Superior
GPR_4	13.00	Trinchera	Superior
GPR_5	9.00	Trinchera	Superior
GPR_6	12.00	Trinchera	Superior
GPR_7	11.00	Trinchera	Superior
GPR_8	4.50	Trinchera	Superior
GPR_9	5.00	Trinchera	Superior
GPR_10	7.00	Trinchera	Superior
GPR_11	6.00	Trinchera	Superior
GPR_12	6.00	Trinchera	Superior
GPR_13	5.00	Trinchera	Superior
GPR_14	2.50	Trinchera	Superior
GPR_15	5.50	Trinchera	Superior
GPR_16	5.50	Trinchera	Superior
GPR_17	6.50	Trinchera	Superior
GPR_18	7.00	Trinchera	Superior
GPR_19	8.00	Trinchera	Superior
GPR_20	7.50	Trinchera	Superior
GPR_21	8.00	Trinchera	Superior
GPR_22	8.00	Trinchera	Superior
GPR_23	14.00	Trinchera	Superior
GPR_24	10.00	Trinchera	Superior
GPR_25	9.00	Trinchera	Superior
GPR_26	10.00	Trinchera	Superior
GPR_27	9.00	Trinchera	Superior
GPR_28	9.00	Trinchera	Superior
GPR_29	9.00	Trinchera	Superior
GPR_30	3.00	Trinchera	Superior
GPR_31	23.00	Trinchera	Intermedio
GPR_32	38.00	Trinchera	Intermedio
GPR_33	27.00	Trinchera	Intermedio
GPR_34	33.00	Trinchera	Intermedio
GPR_35	24.00	Trinchera	Intermedio
GPR_36	26.00	Trinchera	Intermedio
GPR_37	12.00	Trinchera	Intermedio
GPR_38	17.00	Trinchera	Intermedio
GPR_39	22.00	Trinchera	Intermedio
GPR_40	29.00	Trinchera	Intermedio
GPR_41	24.00	Trinchera	Intermedio
GPR_42	10.00	Trinchera	Intermedio
GPR_43	23.00	Trinchera	Intermedio



GPR_44	17.00	Trinchera	Intermedio
GPR_45	47.00	Trinchera	Intermedio
GPR_46	24.00	Trinchera	Intermedio
GPR_47	57.00	Trinchera	Inferior
GPR_48	40.00	Trinchera	Inferior
GPR_49	37.00	Trinchera	Inferior
GPR_50	38.00	Trinchera	Inferior
GPR_51	22.00	Trinchera	Inferior
GPR_52	26.00	Trinchera	Inferior
GPR_53	33.00	Trinchera	Inferior
GPR_54	41.00	V. Propiedad	Superior
GPR_55	37.00	V. Propiedad	Superior
GPR_56	33.00	V. Propiedad	Superior
GPR_57	29.00	V. Propiedad	Superior
GPR_58	24.00	V. Propiedad	Intermedio
GPR_59	27.00	V. Propiedad	Intermedio
GPR_60	33.00	V. Propiedad	Intermedio
GPR_61	25.00	V. Propiedad	Intermedio
GPR_62	25.00	V. Propiedad	Inferior
GPR_63	38.00	V. Propiedad	Inferior
GPR_64	37.00	V. Propiedad	Inferior
GPR_65	29.00	V. Propiedad	Inferior
GPR_66	29.00	V. Propiedad	Inferior
GPR_67	30.00	V. Propiedad	Inferior
GPR_68	25.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_69	24.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_70	32.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_71	28.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_72	34.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_73	31.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_74	38.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_75	41.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_76	28.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_77	33.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_78	21.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_79	33.00	C. Mayor- C. Silo	Superior
GPR_80	26.00	C. Mayor- C. Silo	Intermedio
GPR_81	34.00	C. Mayor- C. Silo	Intermedio
GPR_82	19.00	C. Mayor- C. Silo	Intermedio
GPR_83	24.00	C. Mayor- C. Silo	Intermedio
GPR_84	28.00	C. Mayor- C. Silo	Intermedio
GPR_85	26.00	V. Propiedad/C. Mayor- C. Silo	Inferior
GPR_86	35.00	C. Mayor- C. Silo	Inferior
GPR_87	33.00	C. Mayor- C. Silo	Inferior
GPR_88	25.00	C. Mayor- C. Silo	Inferior
GPR_89	19.00	C. Mayor- C. Silo	Inferior

GPR_90	34.00	V. Cueva Mayor	Superior
GPR_91	21.00	V. Cueva Mayor	Superior
GPR_92	62.00	V. Cueva Mayor	Superior
GPR_93	51.00	V. Cueva Mayor	Superior
GPR_94	51.00	V. Cueva Mayor	Superior
GPR_95	51.00	V. Cueva Mayor	Superior
GPR_96	50.00	V. Cueva Mayor	Superior

Figura 4.5. Características de cada uno de los perfiles de GPR presentados en este trabajo.

#### 4.1.2 RESULTADOS

Para facilitar su lectura y consulta, los resultados de este apartado se presentan organizados según el método geofísico utilizado, el sistema kárstico al que pertenecen y el nivel del karst al que corresponden. Además, en cada sección, se describen (ordenadas de norte a sur y de oeste a este) las diferentes características kársticas identificadas, agrupadas según la cueva o sector al que están asociados.

##### 4.1.2.1 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT)

La comparación de los resultados obtenidos en las prospecciones de resistividad eléctrica con los elementos kársticos conocidos y los datos aportados por los sondeos mecánicos ha permitido asociar rangos de valores de resistividad a elementos kársticos y litológicos concretos. Así, los valores más conductivos, inferiores a 50  $\Omega$ .m, aparecen asociados a las margas, que se encuentran sólo en algunos perfiles, situados en los límites del karst. Los sedimentos arcillosos que rellenan las cuevas registran valores de entre 50  $\Omega$ .m y 500  $\Omega$ .m y los más arenosos o carbonatados de entre 500  $\Omega$ .m y 800  $\Omega$ .m. Las calizas se sitúan a partir de los 1.000  $\Omega$ .m y el aire de los tramos de las cuevas no colmatadas, que es infinitamente resistivo, se corresponde con valores de más de 10.000  $\Omega$ .m. Estos valores muy resistivos pueden encontrarse también en rellenos modernos, que en la Sierra de Atapuerca están especialmente relacionados con los escombros de las canteras.

Para hacer evidentes estos valores, se ha elegido una escala de color tipo jet o arcoíris que permita identificar de manera visual cada uno de estos rangos. Así, los colores azules corresponden a los sedimentos más arcillosos, los verdes a los más arenosos o carbonatados, los amarillos y rojos a las calizas y los marrones a las cuevas no colmatadas o rellenos modernos. Todos los perfiles se presentan con la misma escala de color excepto los del nivel inferior del karst y los realizados sobre los valles, en los que, para poder identificar los diferentes cuerpos conductivos presentes en esta zona (tales como sedimentos fluviales o margas terciarias), ha sido necesario acotar el rango de valores de resistividad a las diferentes intensidades de la gama de azules y verdes. Lo mismo sucede con los perfiles presentados con la escala viridis.

Los perfiles presentados en este apartado incluyen dos imágenes, que se corresponden con los datos obtenidos mediante el dispositivo dipolo-dipolo (DD) y Wenner-Schlumberger (WS). Puesto que la sensibilidad varía en cada dispositivo (ver apartado 3.1.1), los resultados presentan ligeras diferencias. En el caso de los perfiles que cubren más de un sector, estos se muestran y analizan por separado. En cualquier caso, los perfiles completos se recogen en el anexo II para su consulta individualizada. escala de valores de baja resistividad.

#### 4.1.2.1.1 Sistema Trinchera

Los perfiles de ERT realizados al norte del Valle de la Propiedad, en el sistema kárstico de Trinchera, comprenden los perfiles ERT\_1-ERT\_13, que se sitúan en torno a las cavidades de Cueva Fantasma, Gran Dolina-Penal, el Complejo Galería y la Cueva del Compressor (figura 4.10).

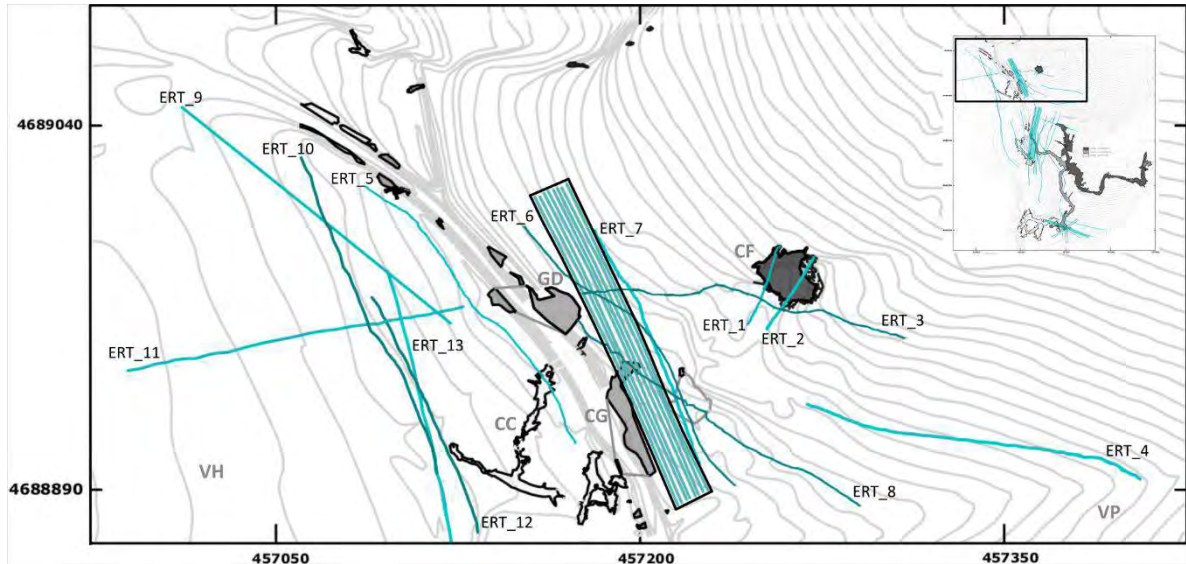


Figura 4.10. Localización de los perfiles de ERT realizados en el sistema kárstico de Trinchera. El recuadro representa el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2017 (anexo I.1). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.

##### 4.1.2.1.1.1 Nivel superior

Los perfiles de ERT que abarcan el nivel superior del sistema de Trinchera se sitúan en torno a Cueva Fantasma y un área situada al SE de esta cavidad, al norte del Valle de la Propiedad (figura 4.11).

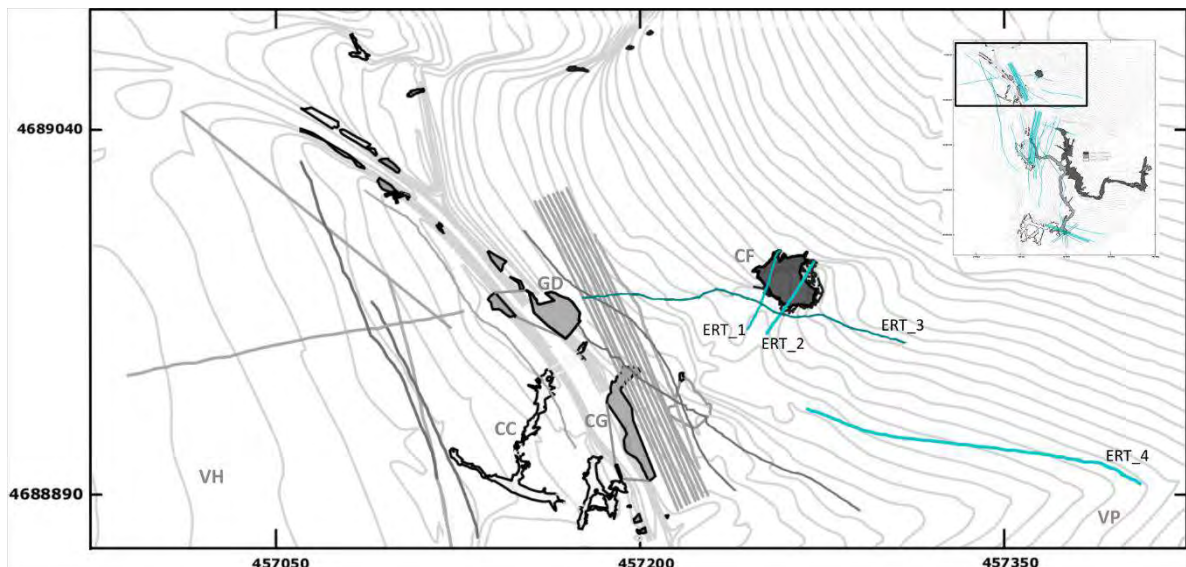


Figura 4.11. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre el nivel superior del sistema de Trinchera (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.

- Cueva Fantasma

Los perfiles de ERT realizados en el interior de Cueva Fantasma cruzan los dos sectores sedimentarios definidos en la cavidad. El perfil ERT\_1 se sitúa en el sector de entrada (también denominado *cueva* o CF según la nomenclatura usada en su excavación) y el perfil ERT\_2 en el sector oriental (denominado *sala* o SF) (figura 4.12). En estos perfiles, los valores de resistividad asociados al relleno sedimentario de la cavidad (inferiores a 150  $\Omega.m$ ) muestran un espesor máximo de 7,5 m en perfil ERT\_1 o sector CF (figura 4.13) y de 3,5 m en el perfil ERT\_2 o sector SF (figura 4.14).



Figura 4.12. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT y los sondeos mecánicos realizados en torno a Cueva Fantasma.

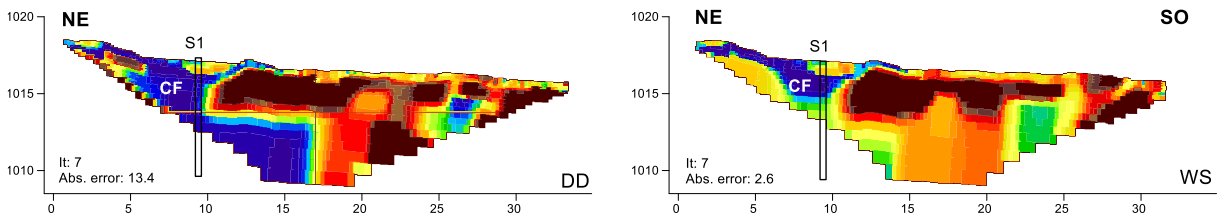


Figura 4.13. Perfil ERT\_1. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. CF indica el relleno del sector Cueva Fantasma y S1 el sondeo mecánico.

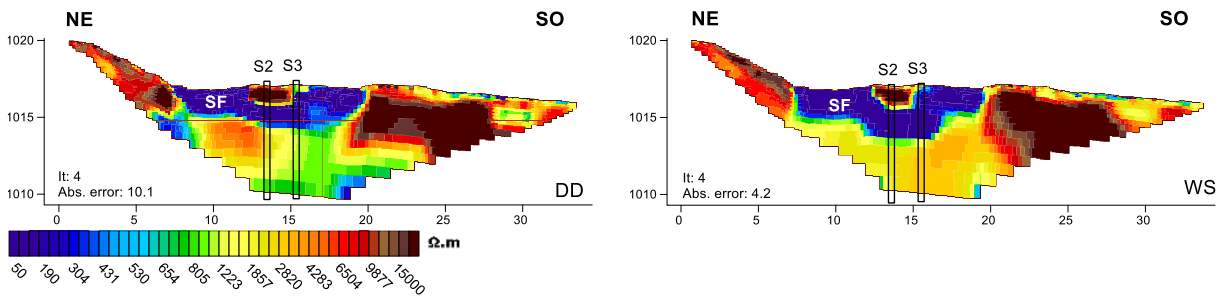


Figura 4.14. Perfil ERT\_2. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SF indica el relleno del sector Sala Fantasma. Los sondeos mecánicos S2 y S3 están proyectados sobre el perfil (figura 4.12).

El sondeo mecánico S1, realizado sobre el perfil ERT\_1 (figuras 4.12 y 4.13), recuperó 12 metros de rellenos sedimentarios limo-arcillosos (figura 4.15) que coinciden con los resultados de los 7,5 m de profundidad que alcanza el perfil ERT\_1 en este punto (figura 4.13), así como con el frente de excavación de este sector (figura 4.16).

Los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S2 y S3 (figuras 4.12 y 4.14) encontraron 8,5 m y 12,5 m de rellenos, respectivamente, en los que los primeros 4,5 m corresponden, en ambos casos, a niveles carbonatados y los siguientes, a arcillas compactas (figuras 4.15). A pesar de que los



sondeos S2 y S3 se sitúan junto al perfil ERT\_2, a unos 2-3 m de distancia (figura 4.12), los datos aportados por los testigos no coinciden con los resultados del perfil de ERT, que refleja un relleno sedimentario de apenas 3,5 m de profundidad a esta altura (figura 4.14).

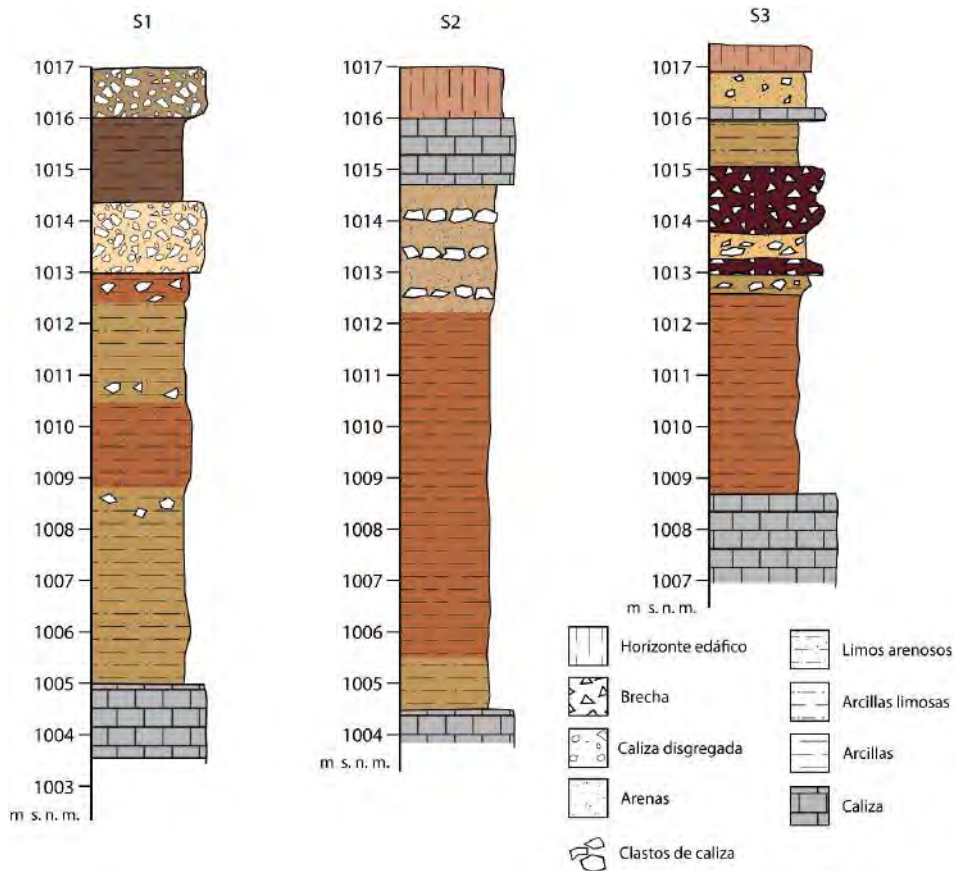


Figura 4.15. Descripción esquemática de la litología de los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S1, S2 y S3.



Figura 4.16. Sector "Cueva Fantasma" en 2017. Se aprecia la secuencia sedimentaria del frente de excavación y su relación con la localización del sondeo mecánico S1. (Fotografía: A. I. Ortega).

Los valores de resistividad extremadamente altos que se observan en los perfiles ERT\_1 y ERT\_2 (figuras 4.13 y 4.14) pueden explicarse por la presencia de escombros de la cantera (figura 4.17 A), que se fueron retirando de manera paulatina durante la adecuación del yacimiento entre los años 2016 y 2018 (figura 4.17 B). A pesar de que las líneas de corriente hayan sido distorsionadas por estos valores altamente resistivos (ocasionando seguramente los errores elevados de los perfiles DD), el contacto lateral con los valores asociados a los rellenos sedimentarios coincide con las paredes calizas de la cueva (figura 4.18), cuya ubicación ha podido observarse tras la limpieza y excavación de este espacio (figura 4.19).

Por su parte, la anomalía resistiva que se encuentra entorno al metro 13 en el perfil ERT\_2 (figuras 4.14 y 4.18) corresponde al gran cuerpo estalagmítico documentado en superficie (figura 4.19).



Figura 4.17. A: Cueva Fantasma en 2015 durante la realización del perfil ERT\_1. Se observan los rellenos de cantera cubriendo todo el espacio. B: Cueva Fantasma en 2017 durante la realización del perfil ERT\_2. Los rellenos de cantera se sitúan sólo en la parte derecha de la imagen.

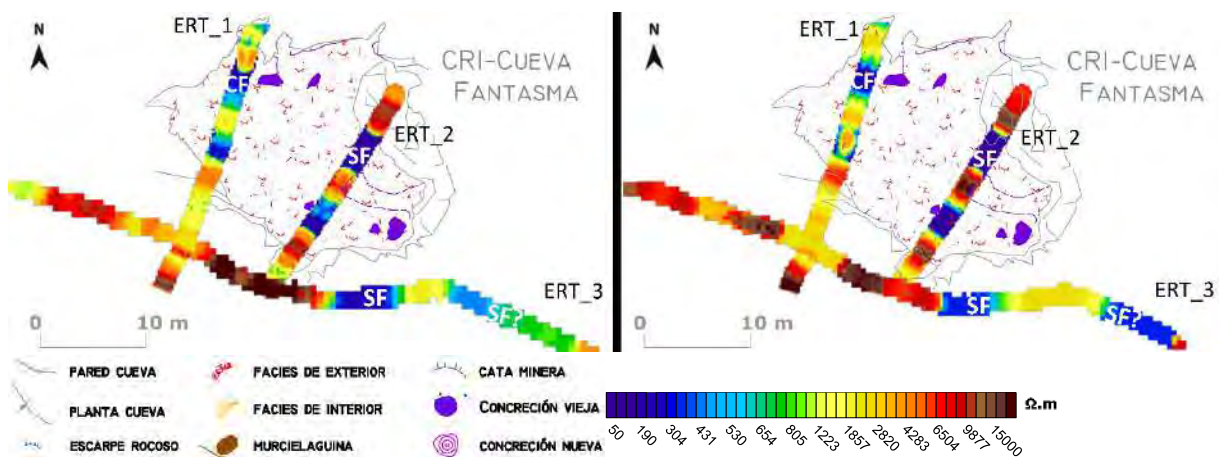


Figura 4.18. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_1, ERT\_2 y ERT\_3 en torno a los 1015 m s.n.m. y su relación con Cueva Fantasma. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. CF indica el relleno del sector *Cueva Fantasma* y SF el relleno de *Sala Fantasma*.



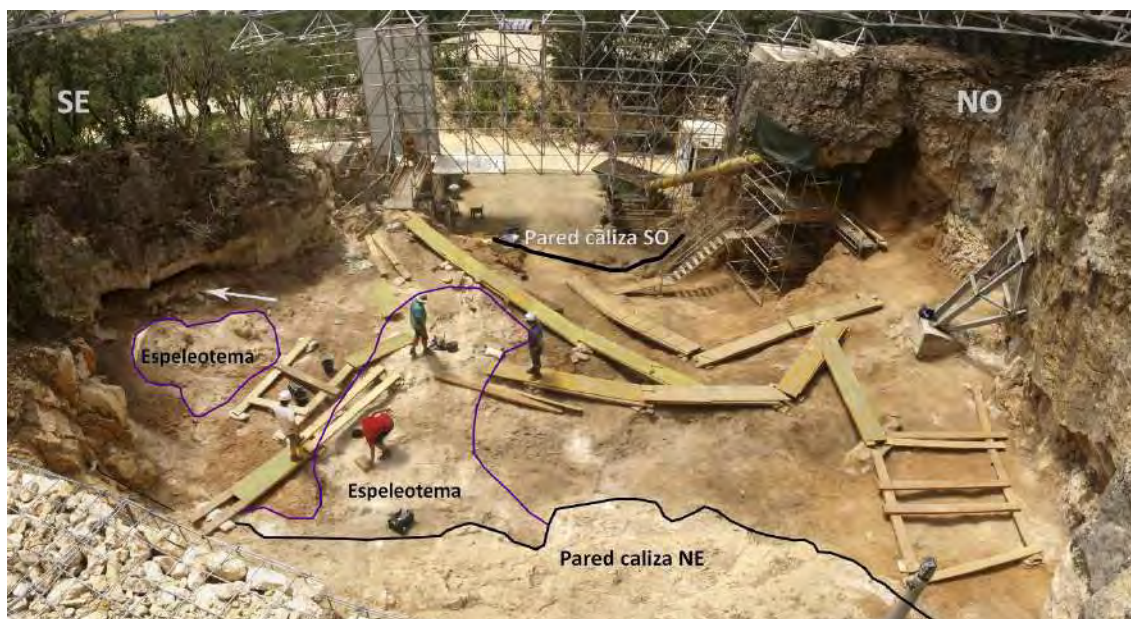


Figura 4.19. Cueva Fantasma durante la campaña de excavaciones de 2019. Las paredes de la cueva se indican con un trazo negro y el cuerpo espeleotémico con un trazo morado. La flecha blanca señala el conducto colmatado por sedimentos. (Fotografía: A. I. Ortega).

En cuanto a la continuidad del conducto de Cueva Fantasma, cuyas paredes indican una dirección NO-SE (figuras 4.12 y 4.19), el perfil ERT\_3, que se dispone con esta misma orientación (figura 4.12), muestra varias anomalías conductivas que pueden relacionarse con los rellenos de esta cavidad (figura 4.20). Por proximidad y cota la anomalía conductiva SF, localizada hacia el metro 90, a partir de los 1016 m s.n.m., y posiblemente también la anomalía SF? situada hacia el metro 115, a partir de los 1019 m. s.n.m. (figuras 4.18 y 4.20), podrían asociarse a esta cavidad, representando la continuación de los rellenos que colmatan la sección SE (figura 4.19). Por su parte, las anomalías resistivas situadas en torno a los metros 70 y 85 (figura 4.20) podrían corresponder a tramos huecos de la cueva o a las escombreras de la cantera que se extienden sobre la ladera.

Por otro lado, las anomalías conductivas que se encuentran en el perfil ERT\_3 hacia los metros 30, 45 y 60 en el dispositivo DD y 25, 45 y 57 en el dispositivo WS (figura 4.20), pueden corresponder igualmente a conductos del nivel superior del karst, ya que sus techos se sitúan a unos 1010 m s.n.m. Por sus dimensiones, estas anomalías podrían representar la sección de diferentes conductos o varios tramos de un mismo conducto. Sin embargo, la falta de elementos kársticos conocidos en su derredor, exceptuando Cueva Fantasma (figura 4.11), dificulta establecer su relación con el resto del sistema kárstico.

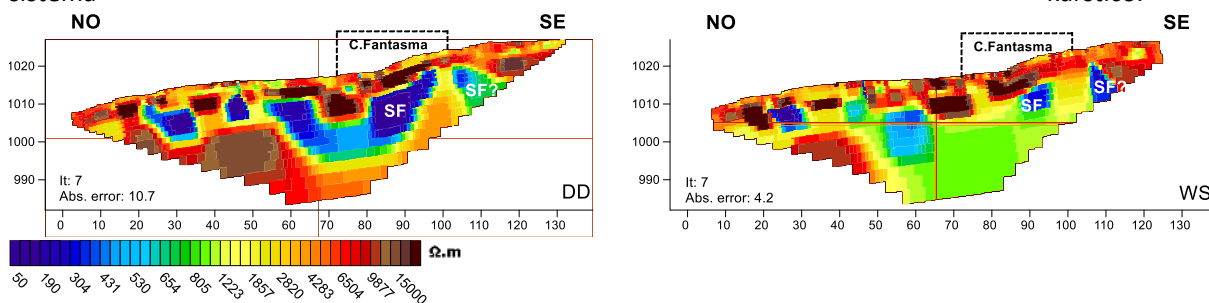


Figura 4.20. Perfil ERT\_3. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. La línea discontinua marca la proyección de las paredes de Cueva Fantasma. SF indica el relleno del sector *Sala Fantasma*.



- Sector oriental

El estudio del nivel superior del sistema kárstico de Trinchera se completa con el perfil ERT\_4, que fue realizado en el extremo oriental de esta área de estudio, al norte del Valle de la Propiedad, con un trazado longitudinal respecto al eje del valle (figura 4.21).

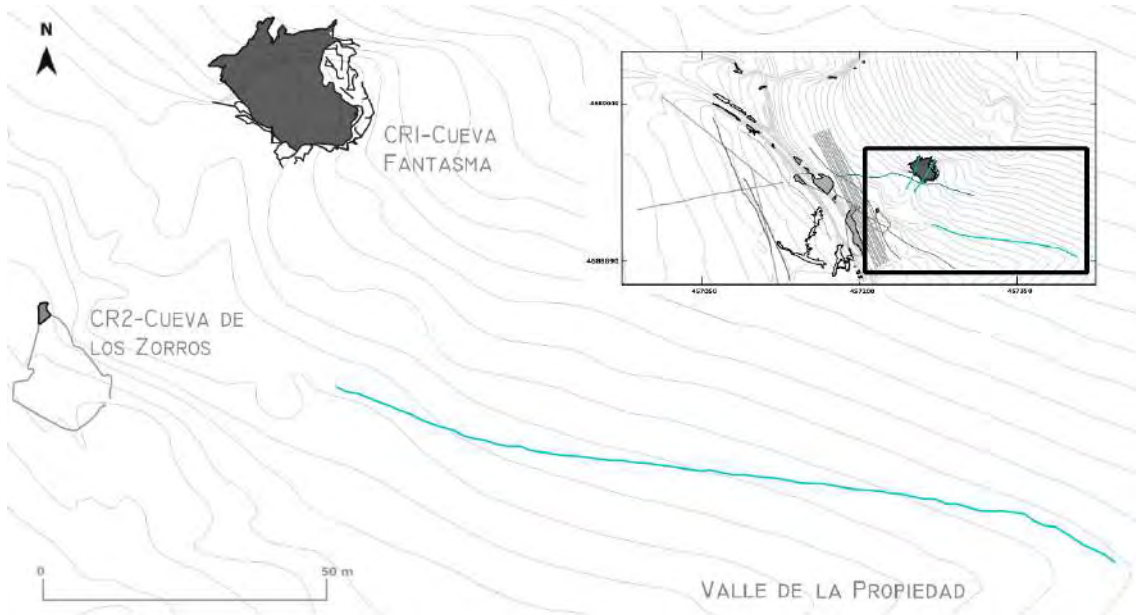


Figura 4.21. Mapa de detalle de la localización del perfil ERT\_4.

El perfil ERT\_4 se sitúa a unos 20 m al norte del eje del Valle de la Propiedad (figura 4.21), pero no muestra ningún tipo de estructura que pueda relacionarse con el mismo. La mayor parte de este perfil recoge unos valores de resistividad asociados a la roca caliza que se agrupan en estructuras paralelas, con una inclinación media aparente de 20° hacia el ONO, indicando la estratificación de la roca (figura 4.22). Sólo entre los metros 40 y 75 se refleja un cuerpo conductor (que presenta la misma inclinación que las estructuras asociadas a los estratos de la roca caliza) con valores compatibles con un relleno sedimentario, especialmente entre los primeros 3 m de profundidad de los metros 45-60. No obstante, carecemos de datos que permitan conocer la naturaleza de los estos sedimentos.

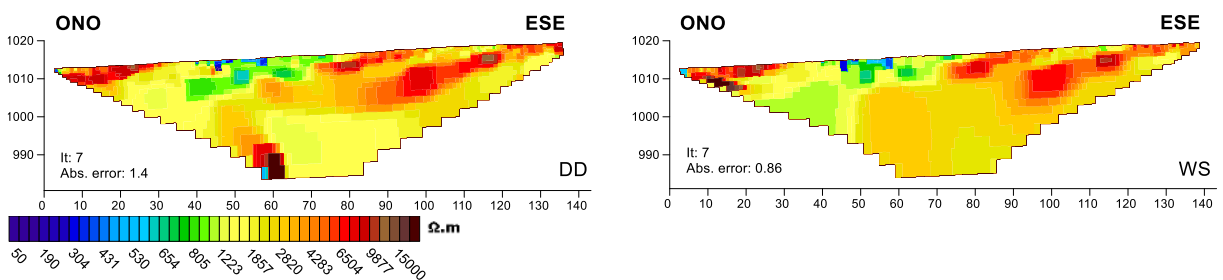


Figura 4.22. Perfil ERT\_4. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS.

#### 4.1.2.1.1.2 Nivel intermedio

Los perfiles de ERT que abarcan el nivel intermedio del sistema de Trinchera se sitúan en torno a los conductos de Gran Dolina-Penal, el Complejo Galería y la Cueva de los Zorros (figura 4.23).

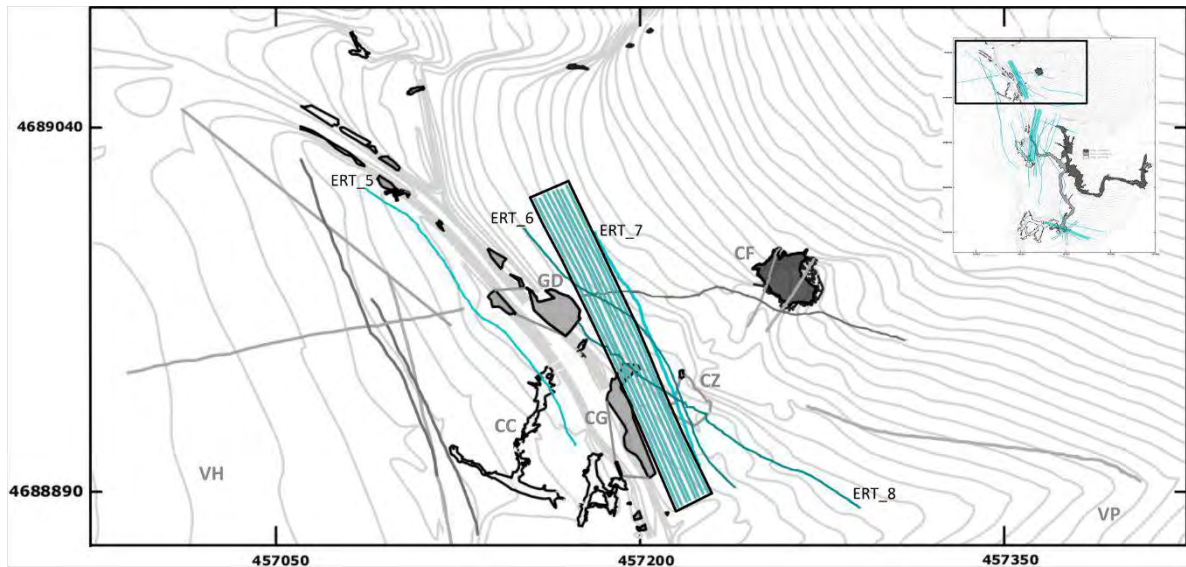


Figura 4.23. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre nivel intermedio del sistema de Trinchera (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). El recuadro delimita la malla de perfiles publicada en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CZ Cueva de los Zorros; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.

La cavidad de Gran Dolina-Penal, junto con las secciones TR20 y TR21, ha sido el objeto de estudio de numerosos perfiles de ERT. Algunos de ellos, en concreto una malla de 8 perfiles WS (en adelante, ERT\_M), se recogen en el artículo Bermejo et al., 2017 (anexo I.1), por lo que en esta sección se describen en detalle los resultados de los perfiles ERT\_5-ERT\_8 (figura 4.24) y se comparan con los ya publicados.

En el anexo II se recogen los 8 perfiles de la malla ERT\_M correspondientes al dispositivo DD, que, si bien no se incluyeron en la publicación por presentar un error elevado y valores inconsistentes en su parte inferior, sí permiten establecer ciertas comparaciones.

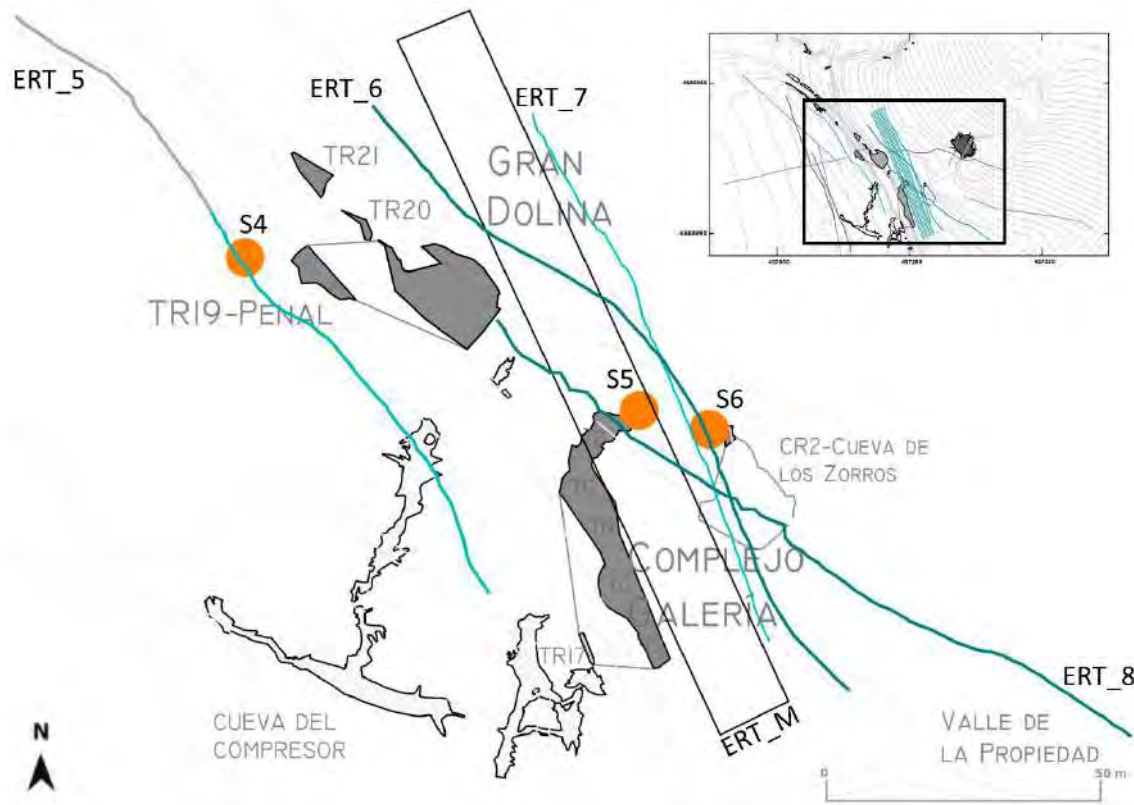


Figura 4.24. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT y los sondeos mecánicos realizados en torno a Gran Dolina, el Complejo Galería y la Cueva de los Zorros. El recuadro delimita la malla de perfiles ERT\_M. TZ indica Covacha de los Zarpazos; TG Galería; TN Sima Norte; TC Sima Central, y TS Sima Sur.

Por el oeste, el conjunto Gran Dolina-Penal está definido por el perfil ERT\_5, que presenta, entre los metros 55 y 70 aproximadamente, una anomalía conductiva asociada al relleno sedimentario de TR19-Penal (figura 4.25). Este relleno, que se encuentra en contacto con la superficie hacia los 996 m s.n.m. (tal como puede observarse en el camino sobre el que se hizo el perfil (figura 4.26)), muestra una potencia de hasta 5,5 m de profundidad, lo que concuerda con la secuencia vista desde la sección de Trinchera (figura 1.X) y con el sondeo mecánico S4, que reveló más de 7 m de niveles arcillosos y arenosos intercalados por roca caliza (figura 4.27).

Por su parte, la anomalía cerrada CC?, que sitúa hacia el metro 100, a partir de los 993 m s.n.m, puede relacionarse, por localización y cotas, con la Cueva del Compressor, del nivel inferior del karst (figuras 4.24 y 4.25). Así, esta anomalía, que presenta valores más conductivos en el perfil WS, podría representar una chimenea ascendente, como las que se observan en el interior de esta cavidad (Ortega, 2009), pero colmatada de sedimentos.

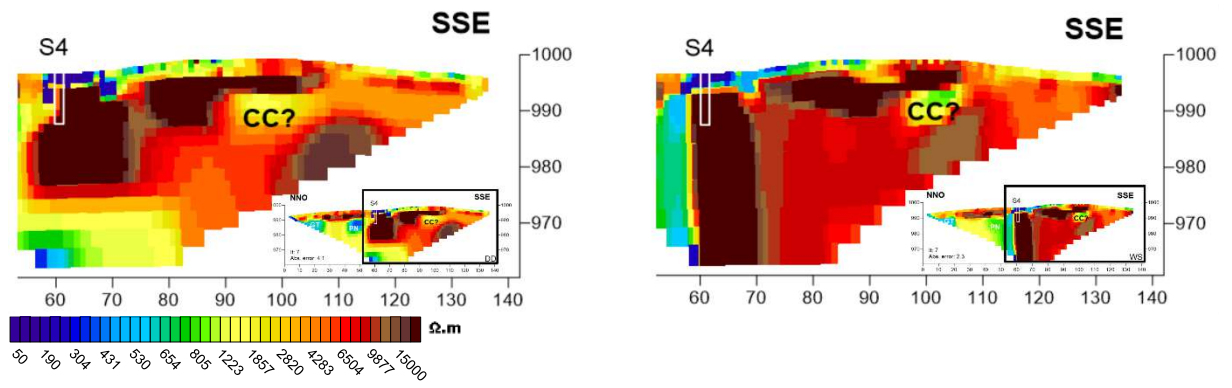


Figura 4.25. Detalle del perfil ERT\_5. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. CC? Indica la posible relación con la Cueva del Compresor. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.



Figura 4.26. Perfil ERT\_5 a su paso por el yacimiento de Penal, durante su realización en 2015. A mano izquierda se pueden observar los sedimentos terrígenos que rellenan la cueva.



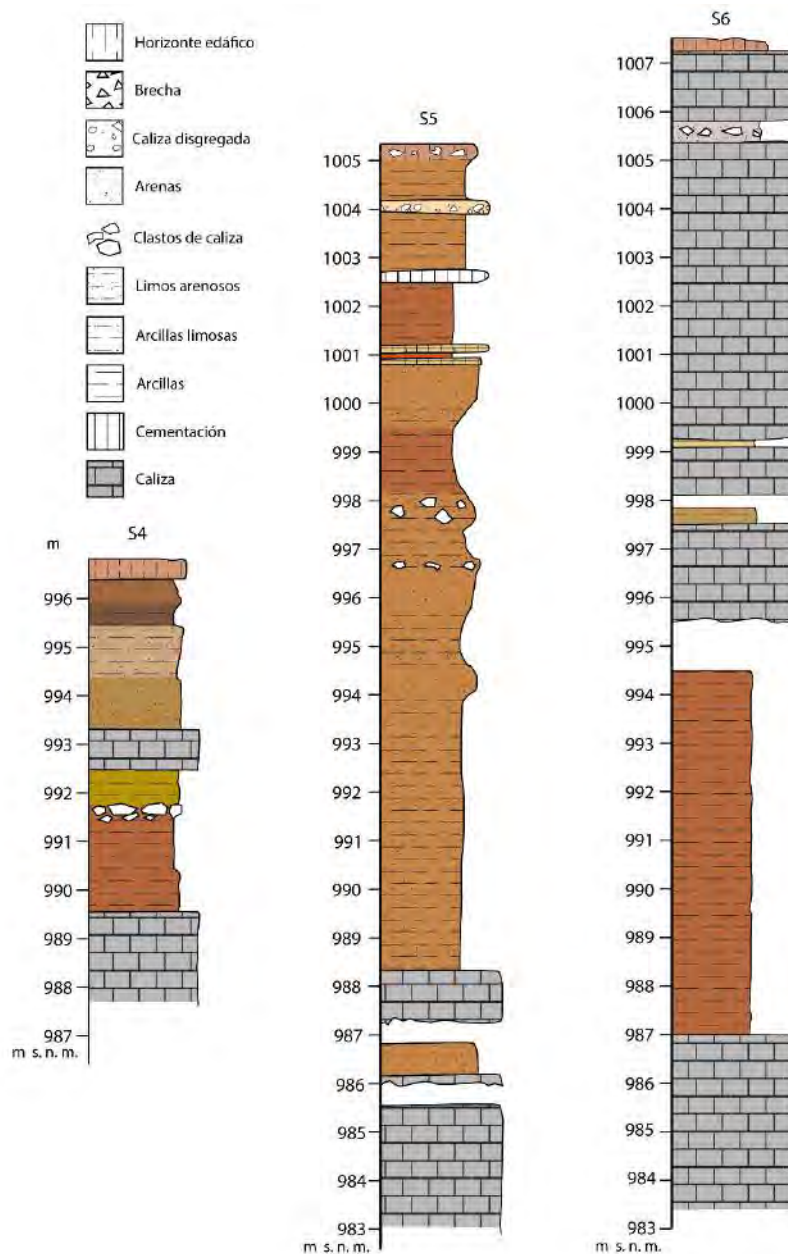


Figura 4.27. Descripción esquemática de la litología de los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S4, S5 y S6.

Hacia el este, la continuación del conducto de Gran Dolina-Penal resulta difícil de definir. La inversión 3D de la malla ERT\_M publicada en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1) sugiere que el conducto colmatado de Gran Dolina continúa en dirección SE (anomalía A), separado del Complejo Galería (anomalía B). Estos dos rellenos podrían confluir hacia el final del conducto de Covacha de los Zarpazos (TZ), cerca de una entrada de sedimentos (anomalía AB) que se encuentra en contacto con la superficie y que fue verificada por el sondeo mecánico S5 (figuras 4.24 y 4.27). Este trabajo reveló, además, la existencia de varios rellenos de pequeñas dimensiones (anomalías C, D y E) situados al norte de la anomalía A, así como otros posibles conductos rellenos (F y G) situados en el extremo E del área de estudio.

Los perfiles ERT\_6, ERT\_7 y ERT\_8, que rodean la malla ERT\_M (figura 4.24), aportan información complementaria acerca del desarrollo de estos conductos. En primer lugar, las anomalías conductivas

de pequeño tamaño situadas hacia el metro 30 del perfil ERT\_6 y 20 del perfil ERT\_7, a unos 1003 m s.n.m. (figuras 4.28, 4.29 y 4.30) pueden relacionarse, por su localización, con la anomalía C, aunque muestran unos valores de resistividad ligeramente más elevados (figura 4.31).

En cuanto al conducto de Gran Dolina, el dispositivo DD del perfil ERT\_6 muestra una anomalía conductiva de 20 m de longitud entre los metros 45 y 65, a partir de los 994 m s.n.m. (figura 4.28), que podría coincidir con la anomalía A, si consideramos que el perfil ERT\_6 la cruza de forma longitudinal (figura 4.31). El dispositivo WS, sin embargo, muestra una anomalía conductiva distinta, que se sitúa hacia el metro 70, a unos 1000 m s.n.m. (figura 4.28), y que coincide con la localización de la anomalía conductiva situada hacia el metro 50 del perfil ERT\_7 DD, a partir de los 996 m s.n.m (figuras 4.29 y 4.30). Este relleno se sitúa cercano a la anomalía AB, pero no está en contacto con la superficie, por lo que podría constituir la continuación de la anomalía A hacia el SE (figura 4.31).

La continuidad del Complejo Galería es también complicada de definir. La anomalía conductiva situada hacia el metro 25 del perfil ERT\_8, a unos 1002 m s.n.m. (figura 4.32), parece representar el relleno de TZ (figura 4.24), mientras que la que se encuentra hacia el metro 35, a unos 994 m s.n.m. (figura 4.32), podría estar relacionada con la anomalía B, al menos según la extensión que muestra esta anomalía en los perfiles del dispositivo DD (figura 4.31). Por su parte, la gran anomalía conductiva situada hacia el metro 95 del perfil ERT\_6, a partir de los 994 m s.n.m. (figura 4.28), podría relacionarse con la anomalía G, si bien esta anomalía muestra unos valores de resistividad más conductivos que los de la malla ERT\_M (Bermejo et al., 2017, anexo I.1). El sondeo mecánico S6 (figura 4.24) reveló en este punto, a unos 13 m de la superficie, la existencia de un relleno de arcillas compactas de más de 7 m de espesor (figura 4.27), que podría constituir un conducto colmatado relacionado con las bóvedas del conducto visibles en la Cueva de los Zorros (figuras 4.24 y 4.33). A pesar de las considerables dimensiones de este relleno, esta anomalía no se refleja en el perfil ERT\_7, que, a esta altura, es paralelo al perfil ERT\_6 (figuras 4.24, 4.29 y 4.30), seguramente porque debería situarse en el límite inferior del perfil.

Por último, cabe destacar la pequeña anomalía cerrada (CZ), de menos de 3 m de espesor, situada hacia el metro 65 del perfil ERT\_8 (figura 4.32), a unos 997 m s.n.m. Esta anomalía parece corresponder a un conducto colmatado del nivel intermedio y sólo puede relacionarse, por su localización, con los conductos arrasados por la cantera de la Cueva de los Zorros (figura 4.30).

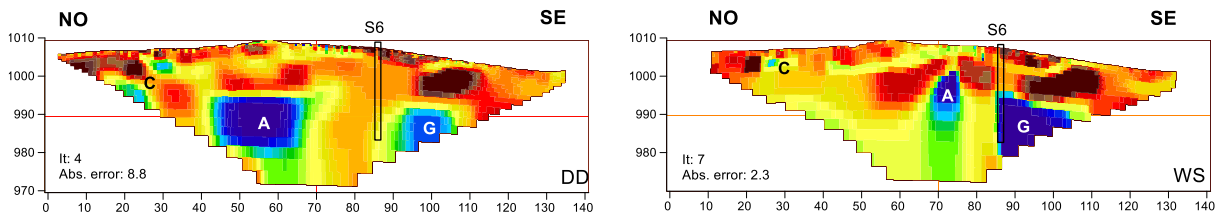


Figura 4.28. Perfil ERT\_6. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. A, C y G representan las anomalías identificadas en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1).

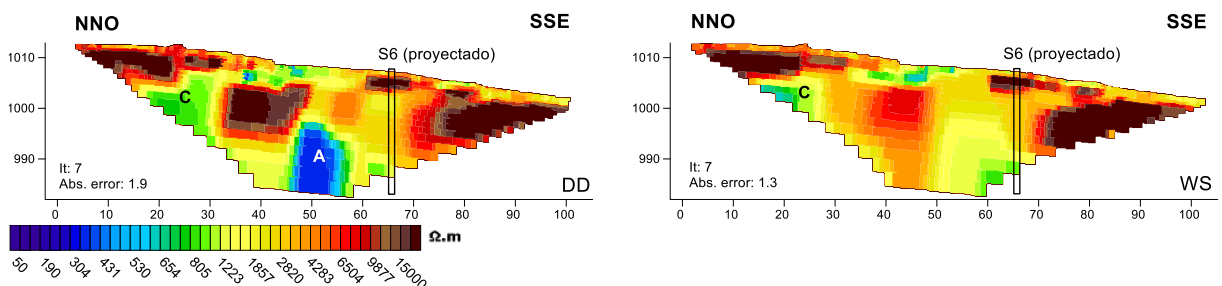


Figura 4.29. Perfil ERT\_7. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. A y C representan las anomalías identificadas en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1).

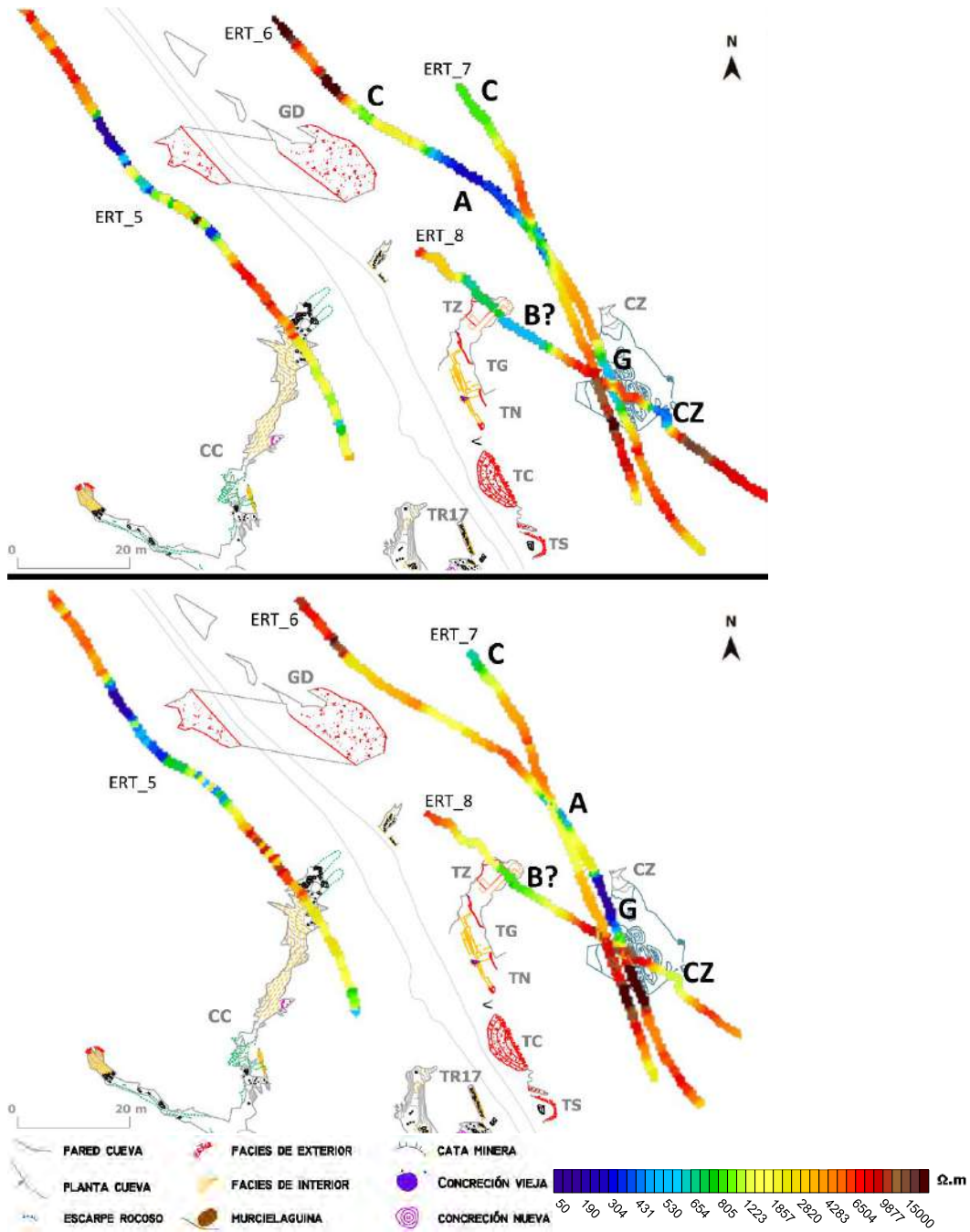


Figura 4.30. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_5- ERT\_8 en torno a los 995 m s.n.m. y su relación con Gran Dolina y el Complejo Galería. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. GD indica Gran Dolina; TZ Covacha de los Zarpazos; TG Galería; TN Sima Norte; TC Sima Central; TS Sima Sur; CZ Cueva de los Zorros, y CC Cueva del Compressor. A-G representan las anomalías identificadas en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1).

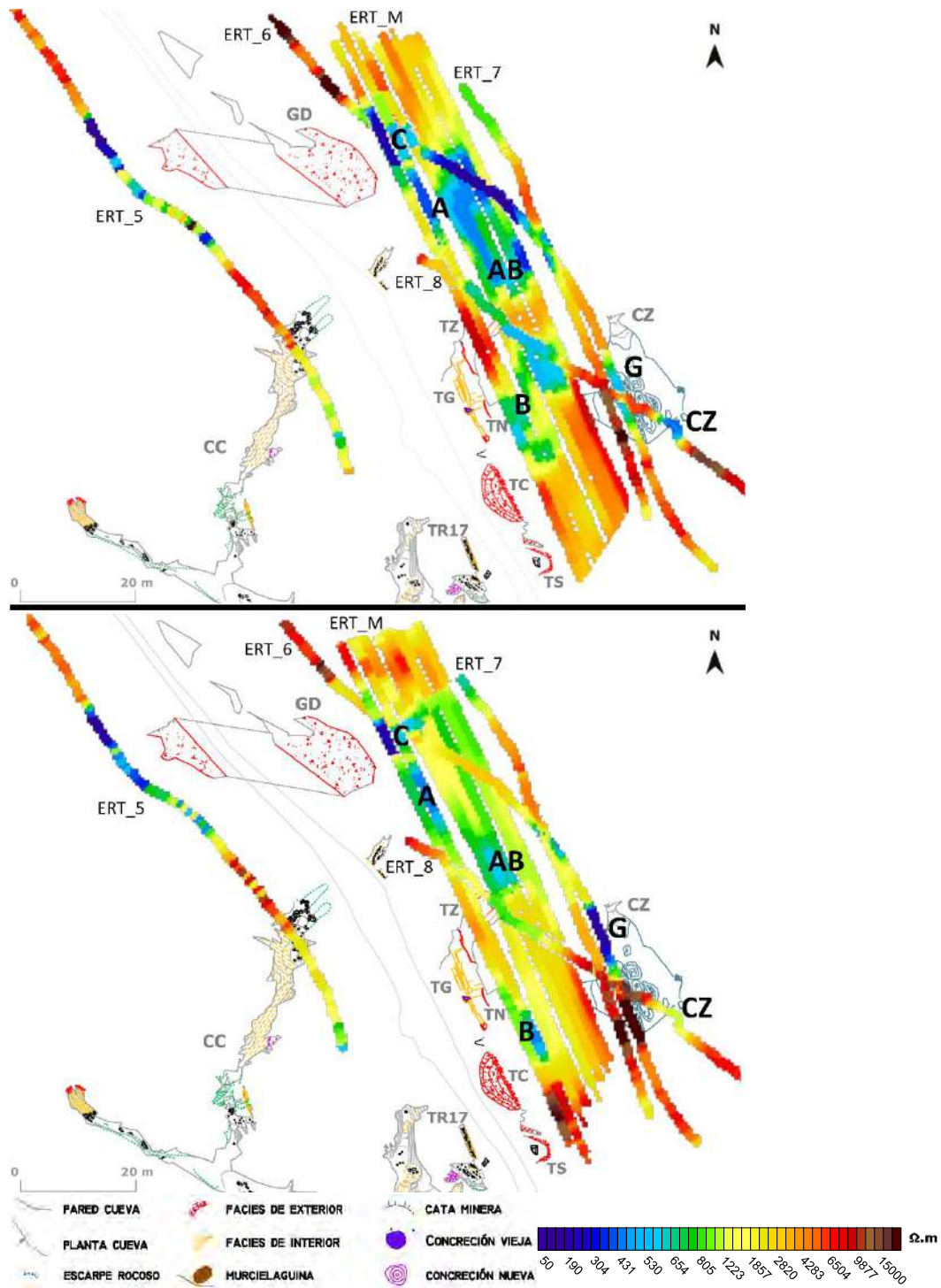


Figura 4.31. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_5- ERT\_8 en torno a los 995 m s.n.m. y su relación con la malla ERT\_M (Bermejo et al., 2017). Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. GD indica Gran Dolina; TZ Covacha de los Zarpazos; TG Galería; TN Sima Norte; TC Sima Central; TS Sima Sur; CZ Cueva de los Zorros, y CC Cueva del Compressor. A-G representan las anomalías identificadas en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1).



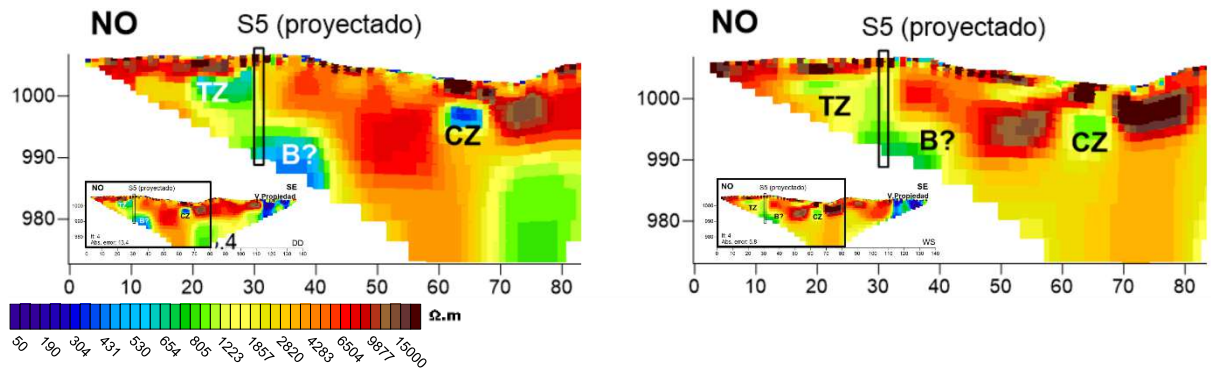


Figura 4.32. Detalle del perfil ERT\_8. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. TZ indica Covacha de los Zarpazos y CZ Cueva de los Zorros. B representa la anomalía identificada en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1). El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

En cuanto a los valores muy resistivos y su relación con tramos huecos de las cavidades, tan solo la anomalía resistiva situada hacia el metro 100 del perfil ERT\_6, sobre la anomalía conductiva G (figura 4.28), puede relacionarse con el tramo aéreo de la cantera de la Cueva de los Zorros, de desarrollo subterráneo (figura 4.33).



Figura 4.33. Cueva de los Zorros. Se aprecian las morfologías kársticas de la bóveda del conducto que fue seccionado por la cantera. (Fotografía: M. A. Martín, Archivo G.E.E.)

#### 4.1.2.1.1.3 Nivel inferior y Valle de Valhondo

Los perfiles de ERT realizados sobre el nivel inferior del sistema de Trinchera se sitúan al oeste de las secciones TR19-TR30 y en torno a la Cueva de Compressor (figuras 4.34 y 4.35). Estos perfiles comprenden asimismo los límites de la roca caliza y el Valle de Valhondo, que se describen al final de esta sección.

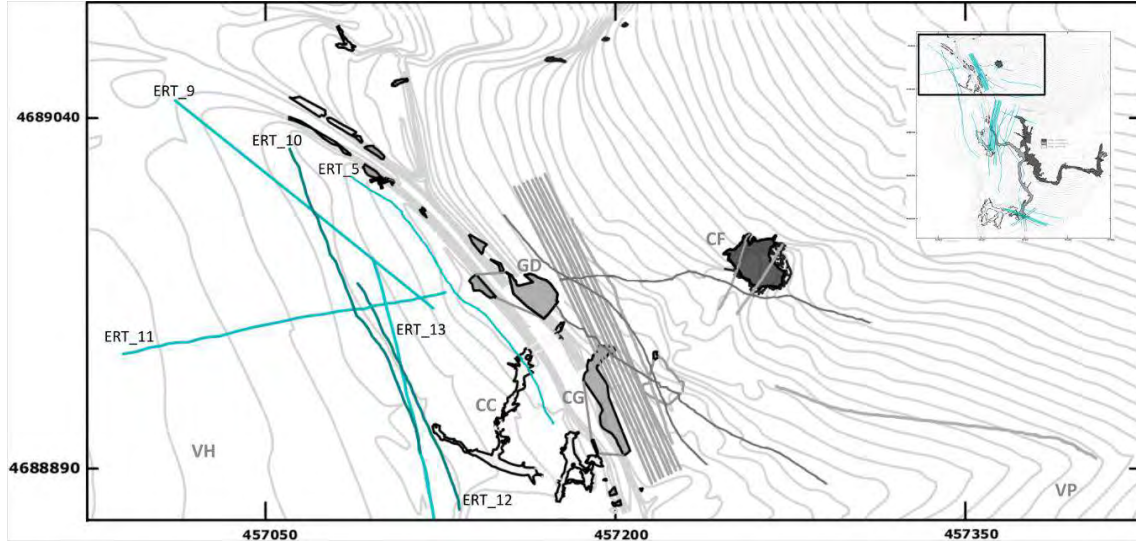


Figura 4.34. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre nivel inferior del sistema de Trinchera (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.

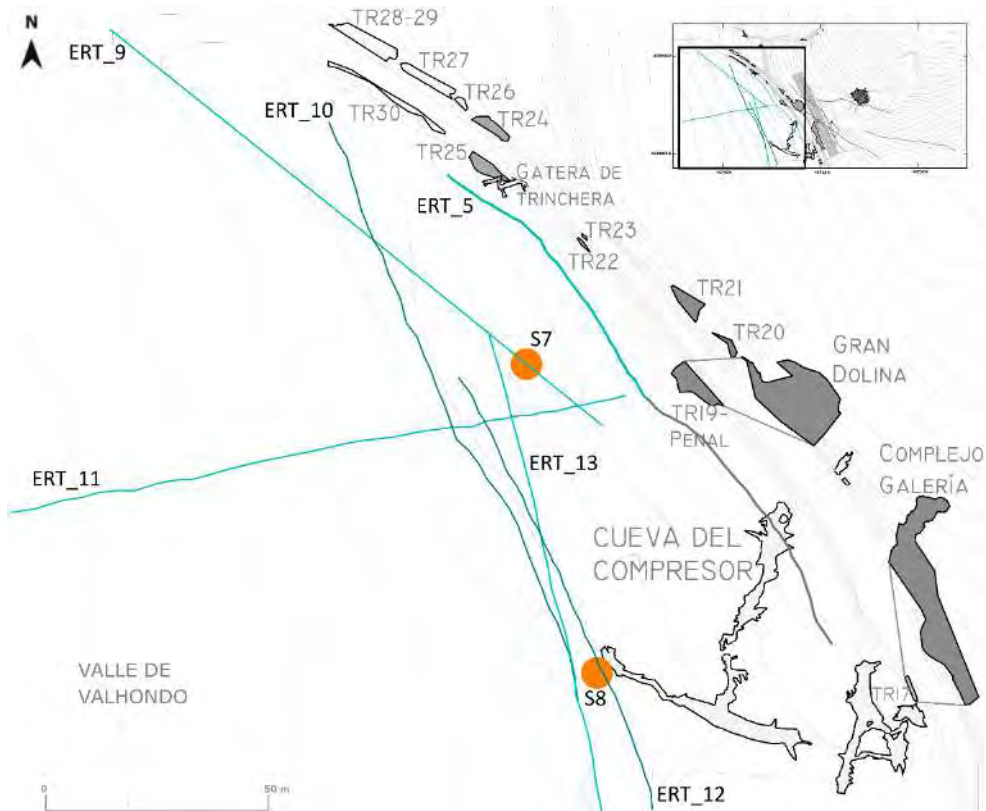


Figura 4.35. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT y los sondeos mecánicos realizados en torno a las secciones TR19-TR30 y la Cueva del Compressor.

En primer lugar, hay que indicar que, debido a los diferentes cuerpos conductivos presentes en esta área (sedimentos endokársticos, coluviones y margas), la escala de valores con la que se presentan estos perfiles es diferente a la de los niveles superior e intermedio. En este sentido, el perfil ERT\_5 se presenta de nuevo en esta sección con la escala para valores de baja de resistividad, con el fin de poder comparar correctamente su extremo NNO con las estructuras kársticas identificadas en el resto de perfiles. Los perfiles con esta escala se pueden encontrar en el anexo II.2.

- Rellenos endokársticos del nivel inferior

Con respecto a la continuación hacia el oeste de las secciones TR19-TR30 a cotas de nivel inferior del karst, el perfil ERT\_5, el más cercano a la trinchera (figura 4.35), muestra dos anomalías conductivas (GT y PN) que pueden corresponder a sendos rellenos sedimentarios (figura 4.36). La que ocupa los primeros 20 m de perfil puede relacionarse, por proximidad, con la Gatera de Trinchera (GT) (figura 4.37). Sin embargo, mientras que el techo del pequeño conducto de Gatera de Trinchera se localiza a unos 985 m s.n.m. (Ortega, 2009), los primeros metros de la anomalía GT parecen estar en contacto con la superficie, a unos 992 m s.n.m., y el resto a partir de los 988 m s.n.m, bajo unos niveles de resistividad que pueden asociarse a la caliza (figura 4.36). Así, la anomalía GT podría corresponder a un conducto desconocido relacionado o no con la Gatera de Trinchera.

Hacia el metro 50 se aprecia una segunda anomalía conductiva cerrada (PN), especialmente en el dispositivo DD, que se localiza entre los 990m s.n.m. y los 983 m s.n.m., aproximadamente. Esta estructura se sitúa al norte del relleno sedimentario TR19-Penal, con el que estaría conectado según el perfil WS, por lo que hemos decidido nombrar a esta anomalía PN, acrónimo de Penal Norte (figuras 4.36 y 4.37).

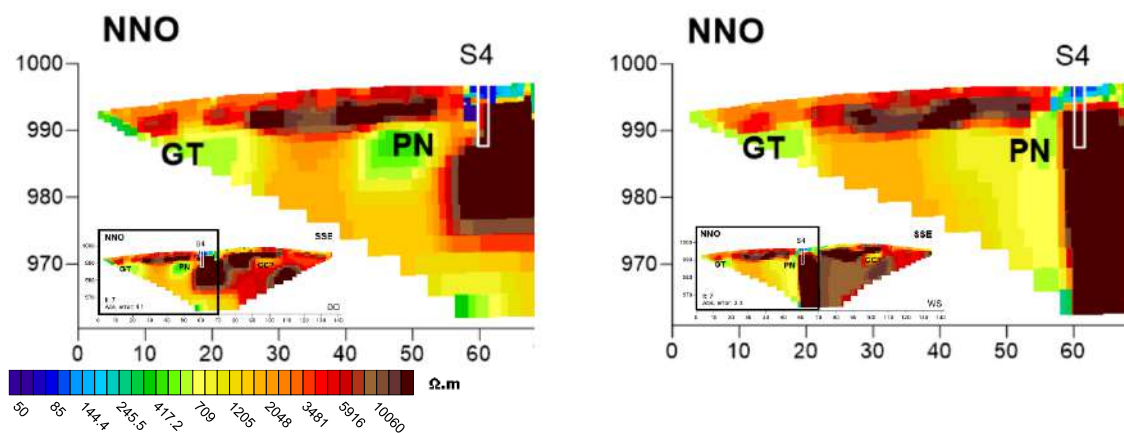


Figura 4.36. Detalle del perfil ERT\_5 Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GT indica Gatera de Trinchera y PN Penal Norte. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

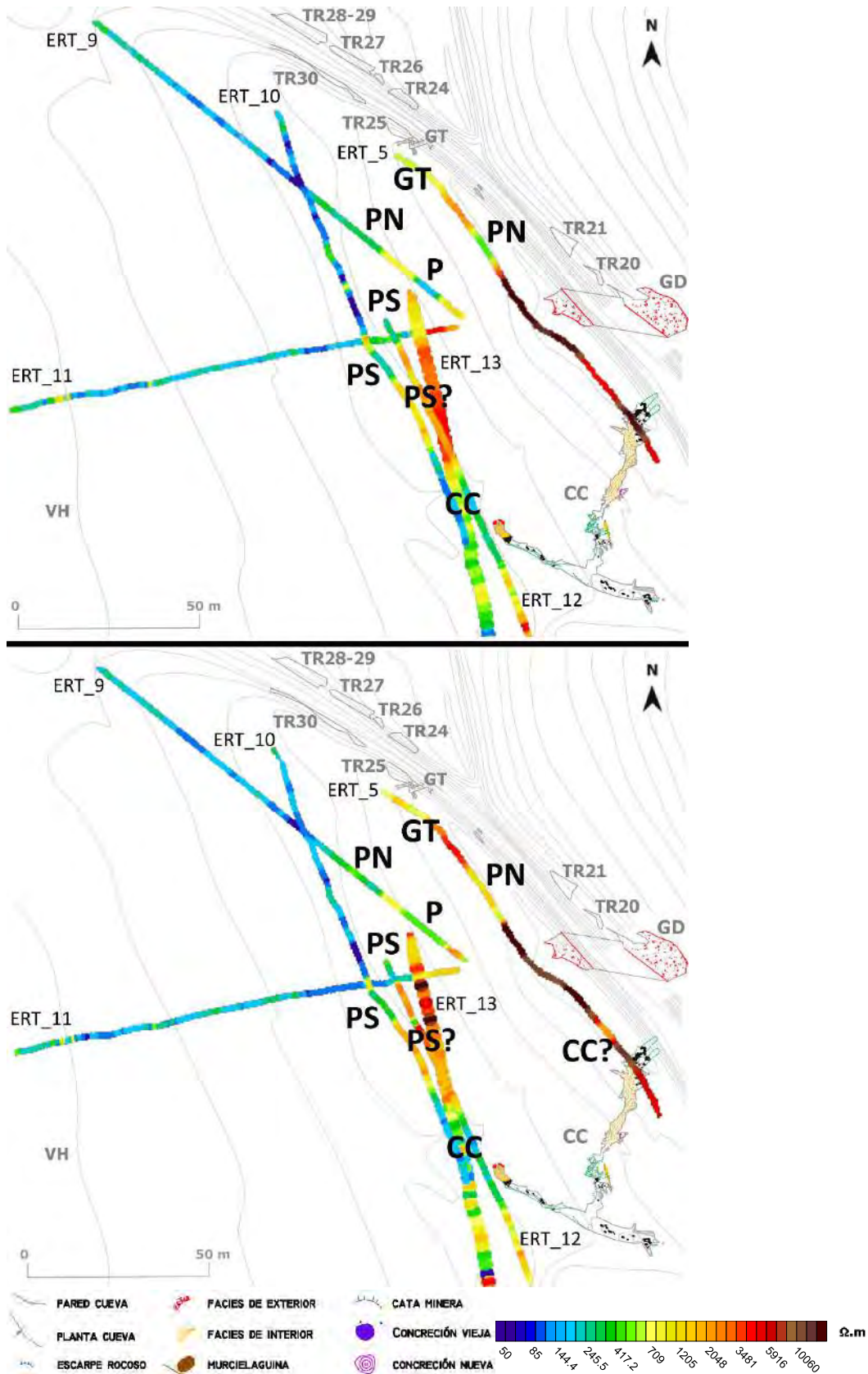


Figura 4.37. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_5 y ERT\_9-ERT\_13 en torno a los 985 m s.n.m. y su relación con las secciones TR19-TR30 y la Cueva del Compressor. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. GT indica Gatera de Trinchera; GD Gran Dolina; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.



Los perfiles ERT\_9-ERT\_13 se encuentran más alejados de la trinchera (figura 4.35), por lo que su conexión con las secciones TR19-TR30 resulta más complicada de definir. Aun así, es posible relacionar algunas estructuras entre sí, partiendo de las anomalías conductivas descritas en el perfil ERT\_5.

En este sentido, el perfil ERT\_9, que tiene un trazado paralelo a la trinchera (figura 4.35), muestra dos anomalías conductivas (PN y P) que pueden asociarse a sendos rellenos endokársticos (figura 4.38). La primera (PN), se sitúa entre los metros 90 y 100, aproximadamente, y presenta un relieve negativo, especialmente en el dispositivo WS, que podría corresponder a las paredes calizas de un conducto cuyo relleno se encuentra en contacto con la superficie hacia los 990 m s.n.m. y profundiza hasta los 983 m s.n.m (figura 4.38). Así, esta estructura puede suponer la continuación hacia el NNO de la anomalía PN descrita en el perfil ERT\_5 (figuras 4.36 y 4.37).

Pese a encontrarse en un extremo del perfil, hacia el metro 120, la segunda anomalía conductiva (P) del perfil ERT\_9 parece formar una estructura cerrada de unos 10 m de longitud, situada bajo 5 m caliza (figura 4.38). Por sus dimensiones y localización, esta anomalía puede representar la continuación hacia el NNO del relleno sedimentario del conducto TR19-Penal, cuyas paredes presentan la misma orientación (figura 4.37). El sondeo mecánico S7 (figuras 4.35 y 4.38) reveló, en este punto, un relleno de arcillas de un 1,5 m de potencia a más de 8 m de profundidad de la superficie (figura 4.39), lo que sitúa este relleno 3 m más profundo de lo que aparece reflejado en los perfiles de ERT.

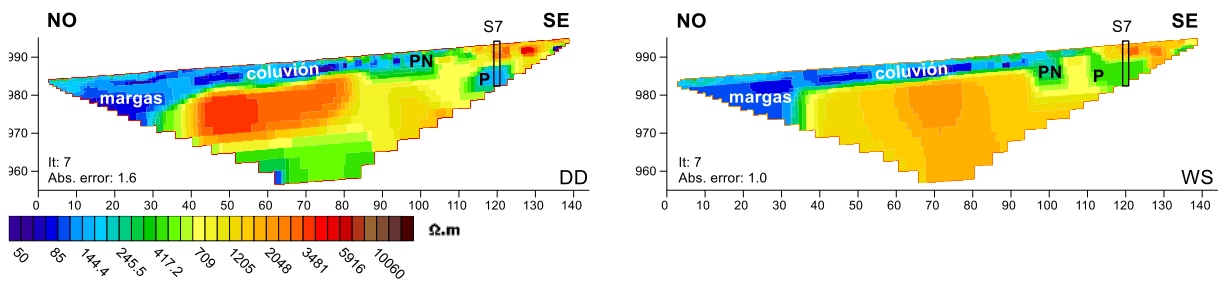


Figura 4.38. Perfil ERT\_9. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. PN indica Penal Norte y P Penal.

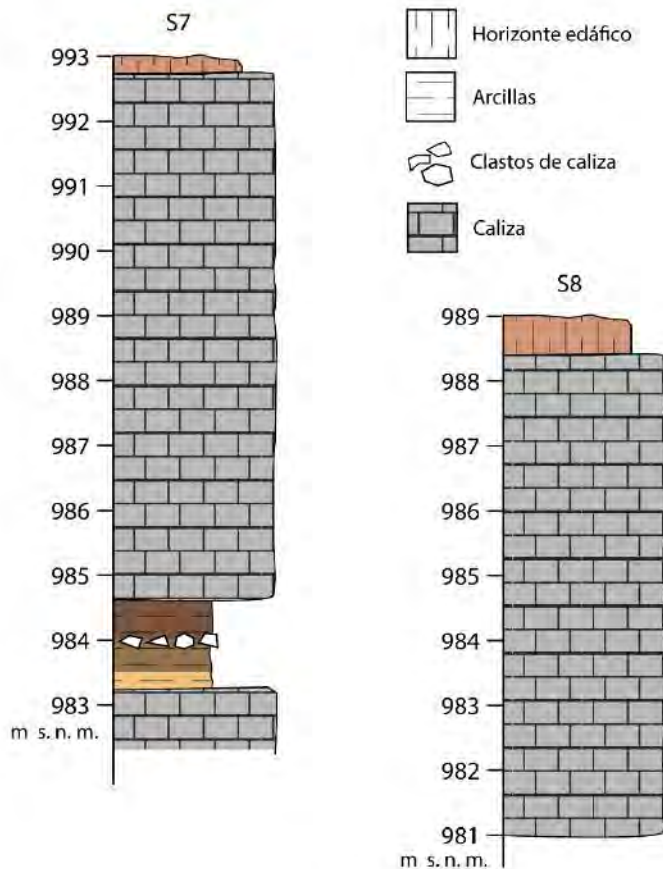


Figura 4.39 Descripción esquemática de la litología de los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S7 y S8.

Además, el perfil ERT\_9 muestra, entre los metros 35 y 90 aproximadamente, un nivel de materiales conductivos de unos 5 m de profundidad que se desarrolla paralelo a la pendiente de la superficie (figura 4.38). Este nivel, que también es reconocible en los primeros 70 m del perfil ERT\_10 (figura 4.40) y a partir del metro 65 del perfil ERT\_11 (figura 4.41), presenta lentejones de diferentes valores de resistividad, que varían entre los 50  $\Omega$ .m y los 150  $\Omega$ .m. Como estos valores son más conductivos que los de los rellenos endokársticos descritos en esta sección y ninguno de estos lentejones presenta una estructura que permita establecer una relación con los rellenos sedimentarios de las secciones TR19-TR30, es posible que este nivel corresponda a los depósitos de coluvión descritos por Benito-Calvo y Pérez-González (2015) en esta área (figura 1.X), en el que los valores más conductivos pertenezcan a las margas del sustrato. El perfil ERT\_10 muestra, hacia el metro 70, el límite sur de este nivel, que finaliza en una estructura resistiva vertical (con valores asociados a la roca caliza) de unos 3 m de grosor (figuras 4.37 y 4.40). Este mismo punto constituiría también su límite oeste, según el cambio en los valores de resistividad visible hacia el metro 110 del perfil ERT\_11 (figura 4.41).

Hacia el metro 80 del perfil ERT\_10 se aprecia una anomalía conductiva cerrada (PS), de unos 12 m de longitud (figura 4.40), que puede equivaler al tramo del perfil ERT\_11 que se encuentra entre los metros 110-135 (figura 4.41) y a la anomalía conductiva visible entre los metros 5 y 12 aproximadamente, del perfil ERT\_12 (figura 4.42). Esta anomalía conductiva presenta un espesor de 3-4 m de profundidad en todos los perfiles y se sitúa bajo unos 2 m de caliza, a unos 988-989 m s.n.m., excepto en el perfil ERT\_12, en la que su parte central se acerca a la superficie (figura 4.42). Estas características (dimensiones y espesor) son similares a las descritas para la anomalía P del perfil

ERT\_9 (figura 4.38), pero sus límites indican una orientación NE-SO, distinta a la del conducto Gran Dolina-Penal (figura 4.37). En cualquier caso, como ambas anomalías se encuentran separadas por más de 20 m de distancia, se ha optado por nombrar a la situada más al SW como PS, de Penal Sur (figuras 4.37, 4.40, 4.41 y 4.42), con el fin de señalar su singularidad sin descartar una posible conexión con la sección de TR19-Penal.

En esta misma área, el perfil ERT\_12 recoge, hacia el metro 25, una pequeña anomalía conductiva cerrada (PS?) de unos 2 m de longitud y 4 m de espesor, visible especialmente en el dispositivo WS (figura 4.42). Aunque esta anomalía no se refleja en otros perfiles, podría guardar cierta relación con anomalía PS, ya que se encuentra cercana al límite SSE reflejado en el perfil ERT\_10 (figuras 4.37 y 4.40).

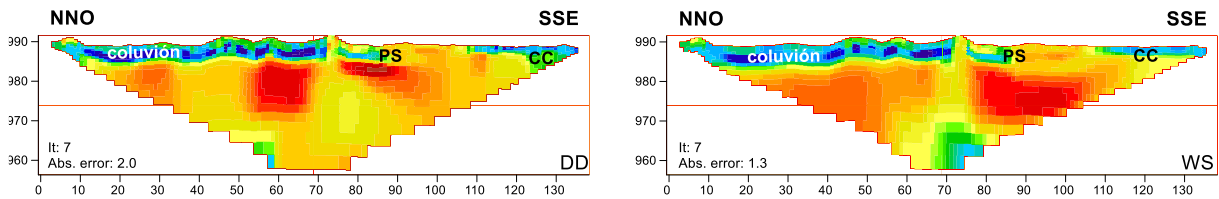


Figura 4.40. Perfil ERT\_10. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. PS indica Penal Sur y CC Cueva del Compressor.

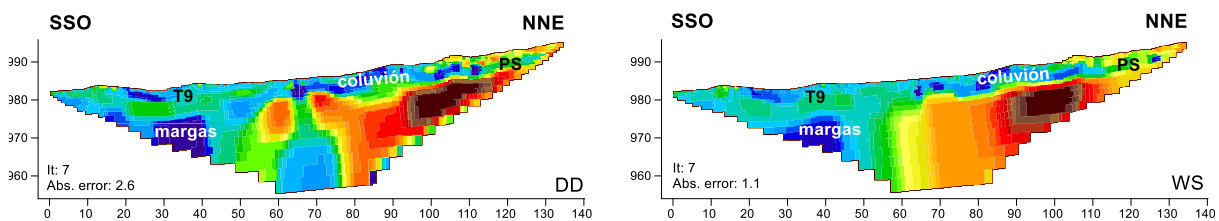


Figura 4.41. Perfil ERT\_11. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. PS indica Penal Sur.

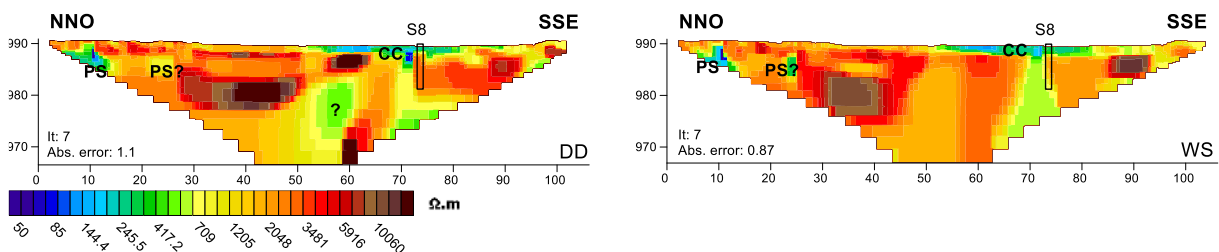


Figura 4.42. Perfil ERT\_12. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. PS indica Penal Sur y CC Cueva del Compressor.

Por último, los perfiles ERT\_10, ERT\_12 y ERT\_13 recogen una anomalía conductiva (CC) que puede relacionarse con la entrada de la Cueva del Compressor. En conjunto, estos 3 perfiles muestran una estructura de unos 30 m de longitud, 7 m de ancho y 2 m de espesor, de dirección NO-SE (figura 4.37), que se encuentra en contacto con la superficie hacia los 989 m s.n.m. (figuras 4.40, 4.42 y 4.43). Además, el perfil ERT\_12, el más cercano a la Cueva del Compressor (figura 4.35), muestra, hacia el metro 70, una anomalía vertical de hasta 16 m de profundidad, con valores de resistividad compatibles con un relleno sedimentario kárstico (figura 4.42). Esta anomalía vertical se encuentra 1,5 m al oeste del punto más oriental de la Cueva de Compressor (figura 4.44), en el que se han descrito facies de interior sobre el suelo de la cavidad y facies de exterior rellenando las chimeneas (figura 4.37), a unos 982 m s.n.m. (Ortega, 2009). Así, es posible que esta anomalía vertical represente una de estas chimeneas colmatadas. El sondeo con recuperación de testigo S8 (figura

4.35) que, por razones logísticas, se realizó 2 m más al SSE de esta anomalía (figura 4.42), reveló únicamente roca caliza (figura 4.39), lo que concuerda con los valores de resistividad reflejados en el perfil ERT\_12, pero no aporta información acerca de este relleno sedimentario.

En este mismo espacio, llama la atención la anomalía conductiva (?) que se sitúa hacia el metro 55 del perfil ERT\_12, a partir de los 982 m s.n.m., y que se refleja sólo el dispositivo DD (figura 4.42). Esta anomalía cerrada presenta valores de resistividad parecidos a los de la entrada vertical (sobre todo a los del perfil WS), pero no se recoge en los perfiles ERT\_11 y ERT\_13 (figuras 4.42 y 4.43), que se encuentran próximos en este punto al perfil ERT\_12 (figura 4.35). Por ello, hemos decidido descartar esta anomalía en la interpretación del nivel inferior del karst.

Asimismo, destaca un cuerpo conductivo de unos 30 m de longitud y 15 m de espesor que se sitúa hacia el metro 90 del perfil ERT\_13, bajo la anomalía CC (figura 4.43). Esta estructura se encuentra unos 10 m al sur de la posible chimenea colmatada descrita en el perfil ERT\_12 (figura 4.37) y a partir de los 970 m s.n.m., que es el punto más bajo conocido en el karst (Ortega, 2009). Estas cotas tan profundas y el hecho de que esta estructura tenga una mayor entidad en el dispositivo DD, que presenta un error elevado (figura 4.43), plantean la posibilidad de que esta anomalía conductiva corresponda a otro tipo de estructura geológica o a un artefacto del proceso de inversión.

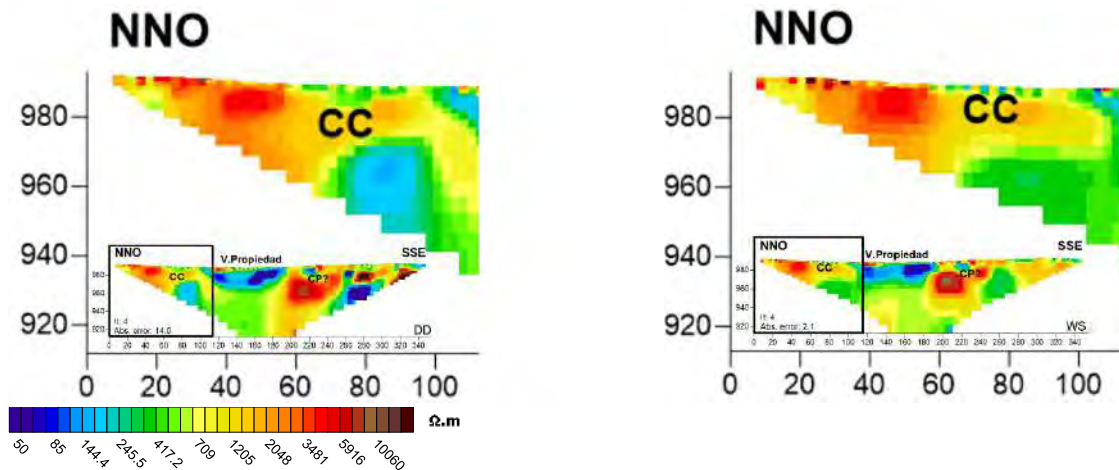


Figura 4.43. Detalle del perfil ERT\_13. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. CC indica Cueva del Compressor. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

En cuanto a los valores de resistividad muy elevados, presentes hacia el metro 100 del perfil ERT\_11 y los metros 40 y 90 del perfil ERT\_12 (figuras 4.41 y 4.42), estos no parecen presentar ninguna relación con cuevas o escombreras conocidas. Tan sólo la gran anomalía resistiva visible hacia el metro 60 del perfil ERT\_5 (figura 4.36) podría corresponder a las chimeneas huecas que se encuentran en la base de la sección TR19-Penal. Sin embargo, esta anomalía sobredimensiona notablemente el tamaño de las chimeneas, que no llegan a una decena de metros según el tramo visible desde la Trinchera del Ferrocarril (figura 1.X).



- Valle de Valhondo

Por otro lado, los perfiles ERT\_9 y ERT\_11 aportan información con respecto a los límites de la caliza cretácica y a su relación con las margas terciarias y el Valle de Valhondo.

El perfil ERT\_9 muestra, hacia el metro 35, un contacto vertical, de al menos 10 m de profundidad, entre los valores asociados al sustrato margoso y los asociados a la roca caliza (figura 4.38). Este punto coincide con el límite NO de la sección TR30, que marca el final del desarrollo kárstico en el sistema de Trinchera (figura 4.44). El perfil ERT\_11 recoge, hacia el metro 55, un contacto vertical similar, éste de hasta 20 m de profundidad (figura 4.41). En el dispositivo DD de este perfil se refleja una discontinuidad en este contacto hacia el metro 65, bajo la cual se encuentra una anomalía conductiva de unos 10 m de longitud y 10 m de espesor. A pesar de que este perfil no tiene un error elevado (figura 4.41), no es geológicamente verosímil que esta anomalía conductiva corresponda a un relleno sedimentario, ya que se encuentra a partir de los 970 m s.n.m., que constituye el punto más bajo registrado en el karst conocido.

Los sedimentos que se superponen al estrato margoso muestran diferentes características en los dos perfiles. El nivel superficial del perfil ERT\_9, que alcanza unos 3 m de profundidad y muestra valores de resistividad de hasta 150  $\Omega$ .m, parece corresponder a los mismos depósitos de coluvión descritos anteriormente en este perfil (figura 4.38). Sin embargo, los valores de resistividad que se superponen a las margas en el perfil ERT\_11 son ligeramente más resistivos, de hasta 300  $\Omega$ .m (figura 4.41). Este nivel, que alcanza unos 8 m de profundidad, puede corresponder a los sedimentos fluviales de la terraza T9 del Arlanzón, que ha sido descrita a esta altura por Benito-Calvo y Pérez González (2015) (figura 1.X). Además, es posible apreciar, hacia el metro 63 del perfil ERT\_11, el contacto lateral de estos sedimentos con los niveles de depósito de coluvión descritos anteriormente en este perfil (figura 4.41).

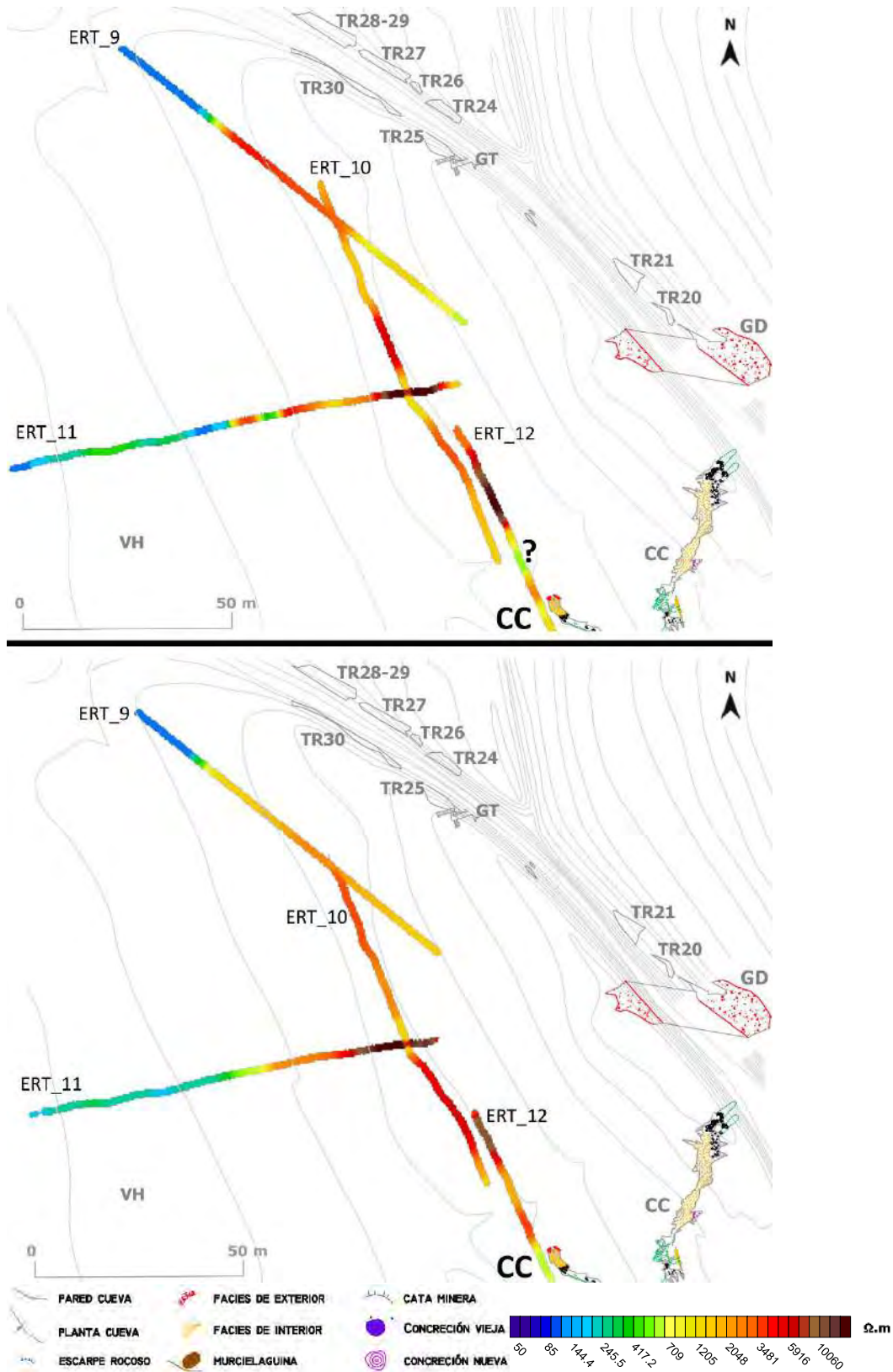


Figura 4.44. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_9-ERT\_12 en torno a los 980 m s.n.m. y su relación el valle de Valhondo. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. GT indica Gatera de Trincheras; GD Gran Dolina; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.

#### 4.1.2.1.2 Valle de la Propiedad

Los perfiles de ERT realizados sobre el Valle de la Propiedad comprenden el perfil ERT\_14 para el nivel superior del karst; los perfiles ERT\_8, ERT\_15, ERT\_16 y los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 para el nivel intermedio, y los perfiles ERT\_13, ERT\_27 y ERT\_28 para el nivel inferior (figura 4.45). El perfil 2.2, publicado en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2,) abarca tanto el nivel intermedio como el inferior, por lo que se presenta en ambos apartados.

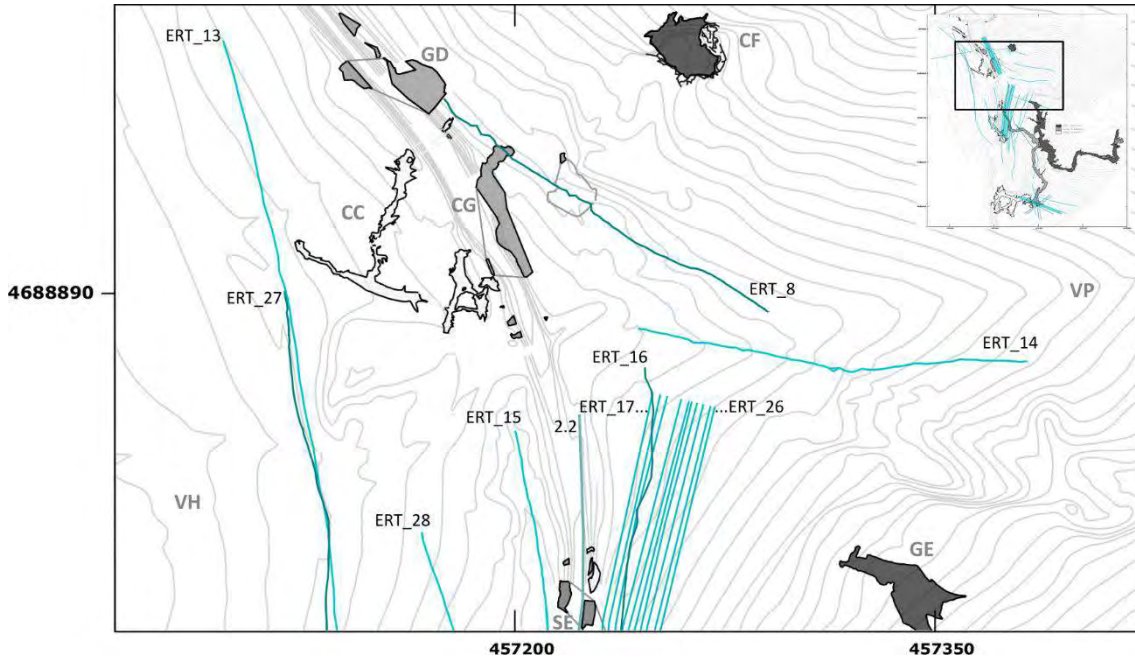


Figura 4.45. Localización de los perfiles de ERT realizados en el Valle de la Propiedad. CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; SE Sima del Elefante; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor, y VH Valle de Valhondo.

Tal y como se apuntaba al inicio de este apartado, los perfiles de ERT realizados sobre los valles y el nivel inferior del karst recogen diferentes cuerpos conductivos, como sedimentos aluviales o margas terciarias, que no se encuentran en los niveles superior e intermedio. Por ello, los perfiles de esta sección se presentan con la escala para valores de baja resistividad, en la que las diferentes intensidades de la gama de azules y verdes permiten diferenciar entre diferentes elementos conductivos. Los perfiles con esta escala pueden encontrarse en el anexo II.2. Lo mismo sucede con los perfiles presentados con la escala viridis en el anexo II.

#### 4.1.2.1.2.1 Nivel superior

El perfil ERT\_14, que se dispone de manera longitudinal al Valle de la Propiedad (figura 4.46), es el único que muestra una estratigrafía consistente con el relleno de un valle a cotas del nivel superior del karst.

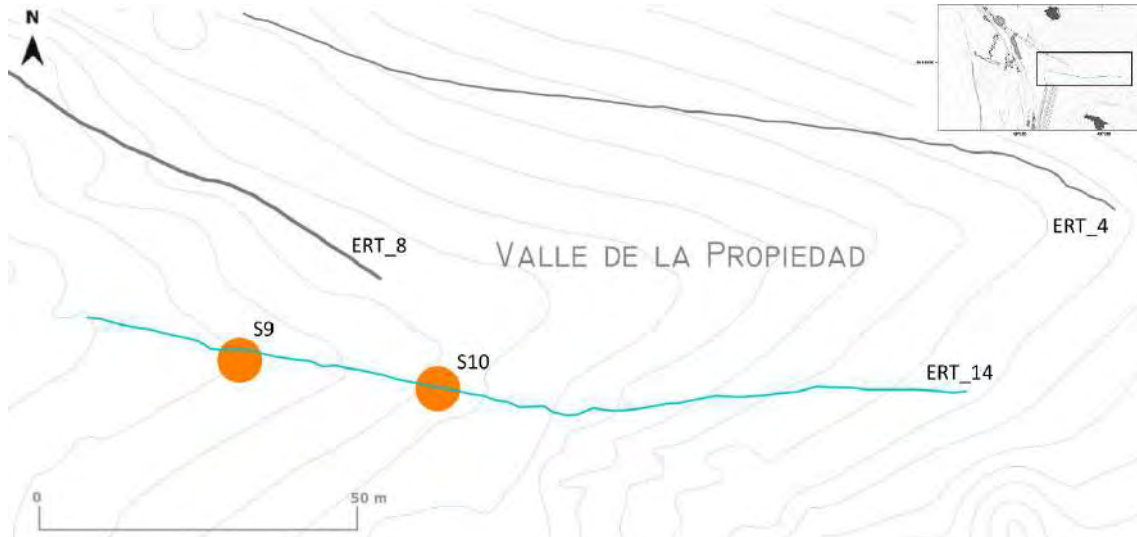


Figura 4.46. Mapa de detalle de la localización del perfil de ERT\_14 (en azul) y los sondeos mecánicos realizados en el Valle de la Propiedad, en relación con los perfiles de ERT más cercanos (en gris).

Los primeros 60 m del perfil ERT\_14 (figura 4.47) muestran un nivel superficial de materiales conductivos de unos 3 m de espesor y hasta 250  $\Omega.m$  que se deposita sobre una estructura, paralela a la pendiente de la superficie, con valores de resistividad asociados a la roca caliza (>1000  $\Omega.m$ ). Este relleno sedimentario, cuya base se encuentra entre los 998 m s.n.m del metro 8 y los 1004 m s.n.m. del metro 60, podría corresponder a la terraza fluvial identificada a esta altura (figura 4.48) y que, por cotas, correspondería a la terraza T3 del río Arlanzón (Benito-Calvo at al., 2017).

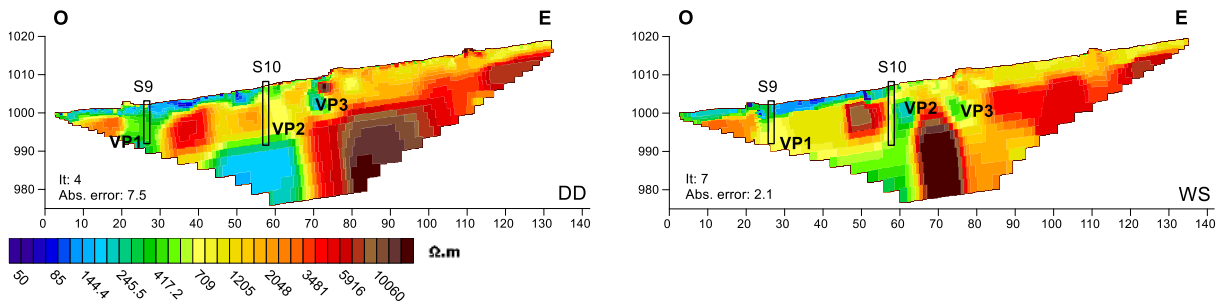


Figura 4.47. Perfil ERT\_14. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS.

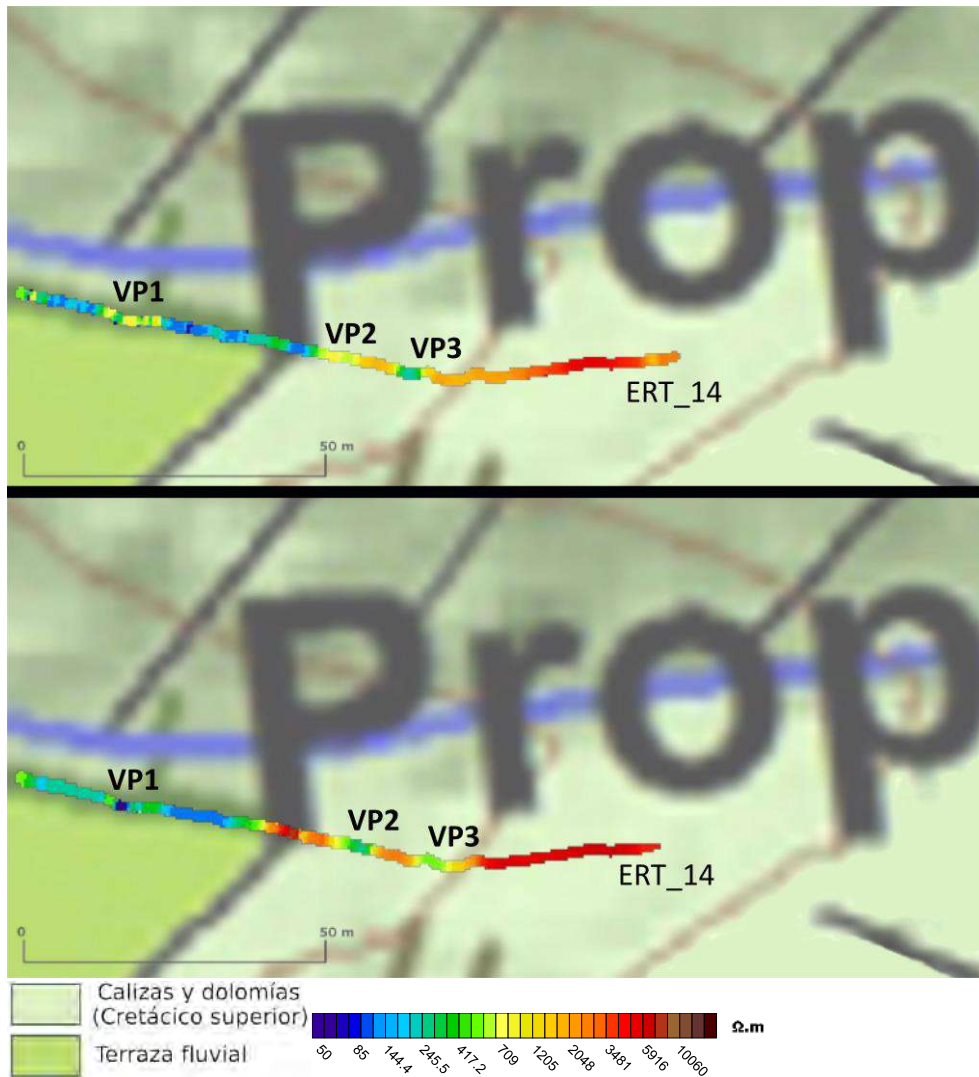


Figura 4.48. Mapa de detalle del perfil ERT\_14 en torno a los 1003 m s.n.m., superpuesto sobre el mapa geomorfológico (Benito-Calvo et al., 2017), y su relación con el Valle de la Propiedad. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS.

El sondeo mecánico S9 (figura 4.46), localizado hacia el metro 25 del perfil ERT\_14, sobre una discontinuidad en los valores de resistividad asociados a la caliza (VP1) (figura 4.47), reveló un primer relleno sedimentario de niveles arcillosos de unos 3 m de profundidad (que corresponderían al relleno superficial identificado en el perfil ERT\_14), seguido por más de 2 m de caliza, y un último nivel arcilloso de apenas 1 m de espesor (figura 4.49). Esta secuencia, con un estrato de caliza relativamente delgado, puede explicar la variedad de valores de resistividad que se observa entre los dispositivos DD y WS en este punto (figura 4.47).

Por su parte, el sondeo S10 (figura 4.46), realizado en el límite de este relleno superficial y sobre la discontinuidad VP2 que se observa hacia el metro 65 del perfil ERT\_14 (figura 4.47), desveló hasta 8 m de niveles de gravas en una matriz limo-arenosa (figura 4.49). Si bien en este punto se observan valores algo más resistivos que podrían explicar la diferencia litológica entre los testigos de los sondeos S9 y S10, no es posible relacionar la estratigrafía de este sondeo, que resulta bastante homogénea, con los cambios en los valores de resistividad que se recogen a lo largo de la discontinuidad VP2 (figura 4.47).



Por otro lado, y a pesar de que entre los 9 m y los 15 m de profundidad del sondeo S10 se recuperó un paquete de caliza compacta (figura 4.49), tampoco es posible determinar si los valores conductivos que se encuentran a partir de los 992 m s.n.m., tanto el modelo DD como el WS (figura 4.47), corresponden a un relleno sedimentario, ya que, por razones logísticas, no se pudo continuar el sondeo en profundidad.

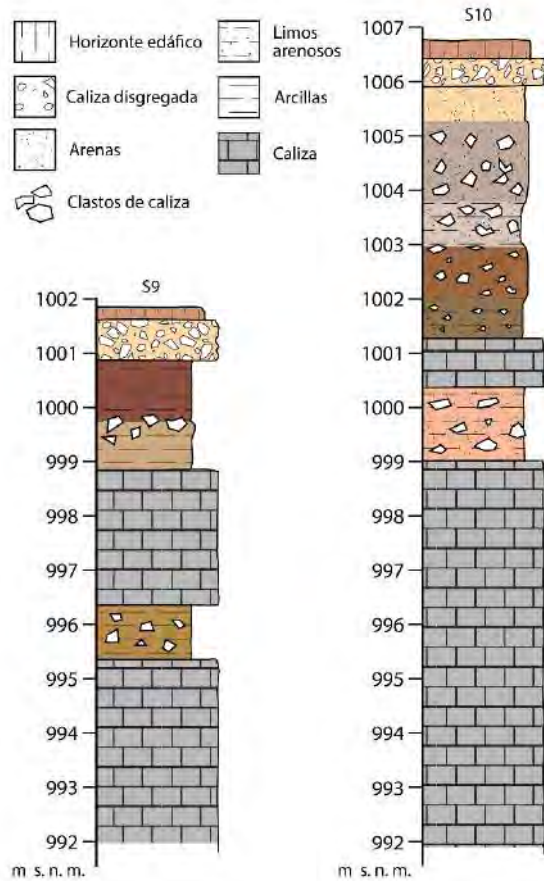


Figura 4.49. Descripción esquemática de la litología de los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S9 y S10.

En lo relativo a la mitad E del perfil ERT\_14, los valores de resistividad superficiales, que se encuentran por encima de los 1010 m s.n.m., no pueden relacionarse con un relleno fluvial, sino que se corresponden más bien con un nivel de caliza meteorizada que se deposita sobre un nivel de caliza sin alterar. Únicamente hacia el metro 75, coincidiendo con un escalón topográfico, se encuentra una anomalía conductiva cerrada (VP3) que podría corresponder a un relleno sedimentario (figura 4.47). Sin embargo, no hay datos que permitan asociar esta anomalía con ninguna morfología endokárstica conocida (figuras 4.46 y 4.48).

#### 4.1.2.1.2.2 Nivel intermedio

Los perfiles ERT\_8, ERT\_15 y ERT\_16 y los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26, junto con el perfil 2.2 publicado en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2), definen los límites del Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst (figuras 4.50 y 4.51).

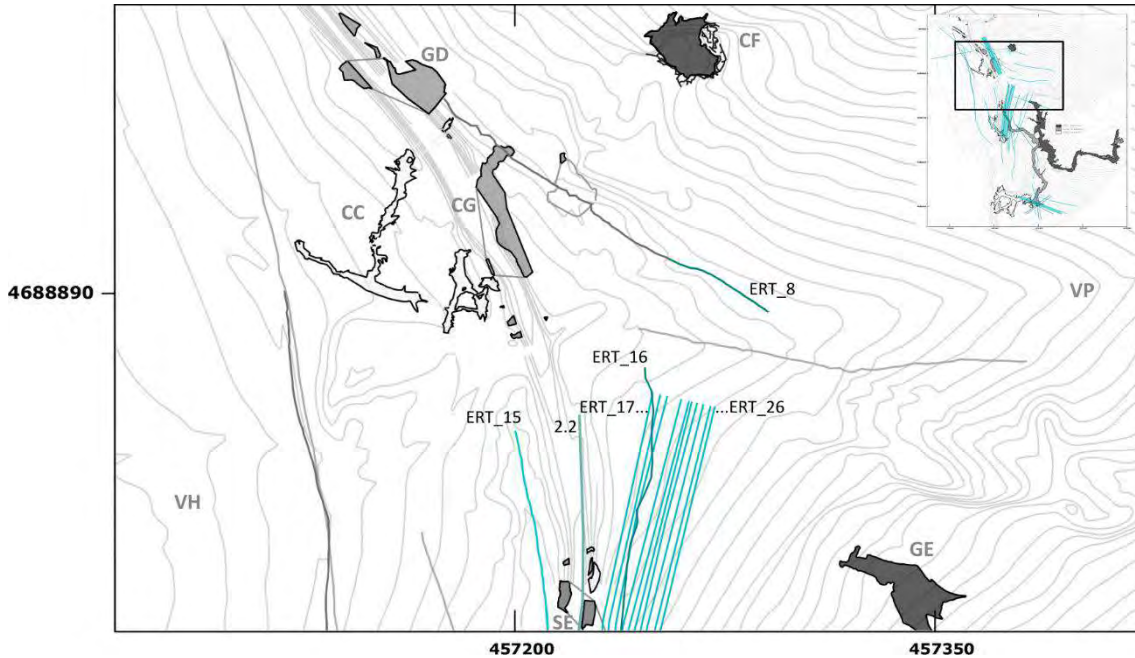


Figura 4.50. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre el Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este valle (en gris). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; SE Sima del Elefante GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor, y VH Valle de Valhondo.

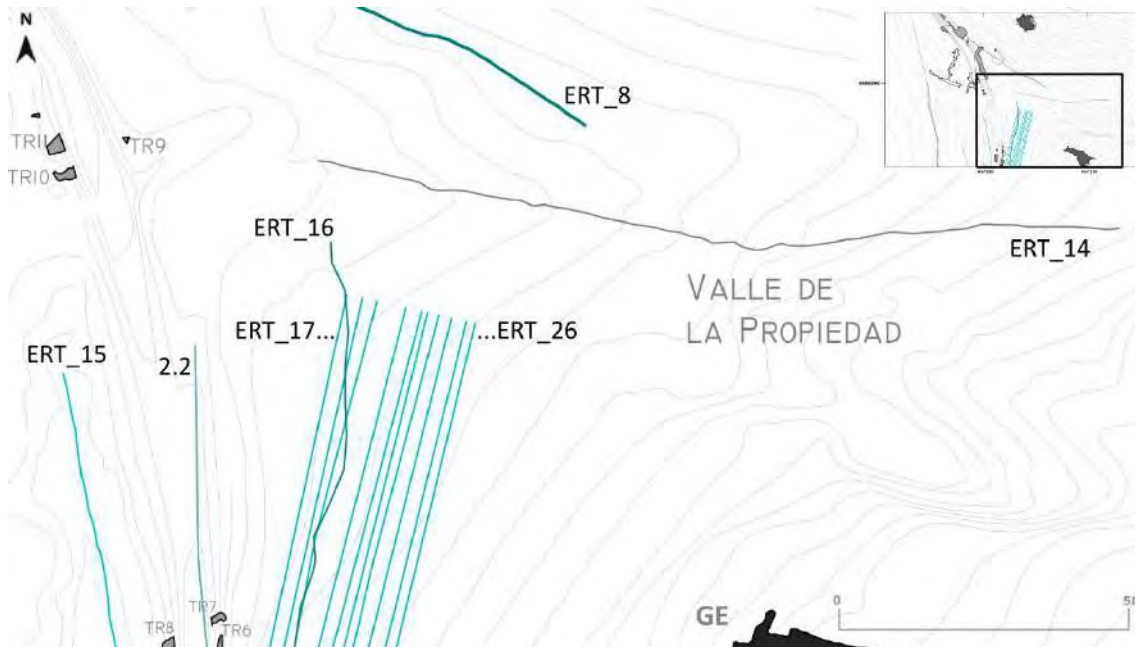


Figura 4.51. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT realizados en el Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst (en azul) y su relación con los perfiles de ERT más cercanos (en gris). GE indica Galería de las Estatuas.



Hacia el norte, el Valle de la Propiedad está definido únicamente por el perfil ERT\_8 (figuras 4.50 y 4.51) que recoge, a partir del metro 110, una anomalía conductiva heterogénea en la que los valores más conductivos, de 200-300  $\Omega.m$ , aparecen entre elementos más resistivos, de hasta 800  $\Omega.m$  (figura 4.52). Esta estructura, que se localiza desde la superficie, a 1003 m s.n.m, muestra un contacto de carácter vertical con los valores de resistividad asociados a las calizas, que alcanza al menos 12 m de profundidad. Así pues, es posible que esta anomalía corresponda al relleno más septentrional del valle, compuesto por arenas aluviales y conglomerados (figura 1.X) (Benito-Calvo, 2004).

Este tramo del perfil se encuentra en una zona deprimida, de vegetación cerrada, que impide aportar información complementaria acerca del sustrato (figura 4.53 A). Tan sólo las calcarenitas cementadas (figura 4.53 B), visibles en el corte de un camino situado a unos 20 m al SE de este punto (figura 4.54), podrían corresponder a este tipo de rellenos.

Espacialmente, el límite entre calizas y sedimentos del perfil ERT\_8 se alinea con la Sima Sur (TS) del Complejo Galería (figura 4.54), lo que podría indicar la existencia de una fractura común, de dirección E-O.

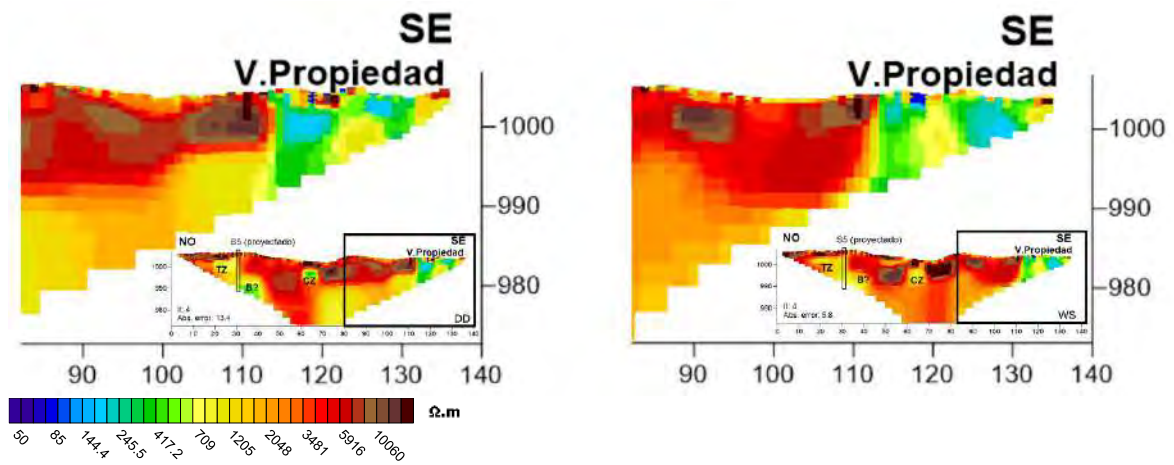


Figura 4.52. Detalle del perfil ERT\_8. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

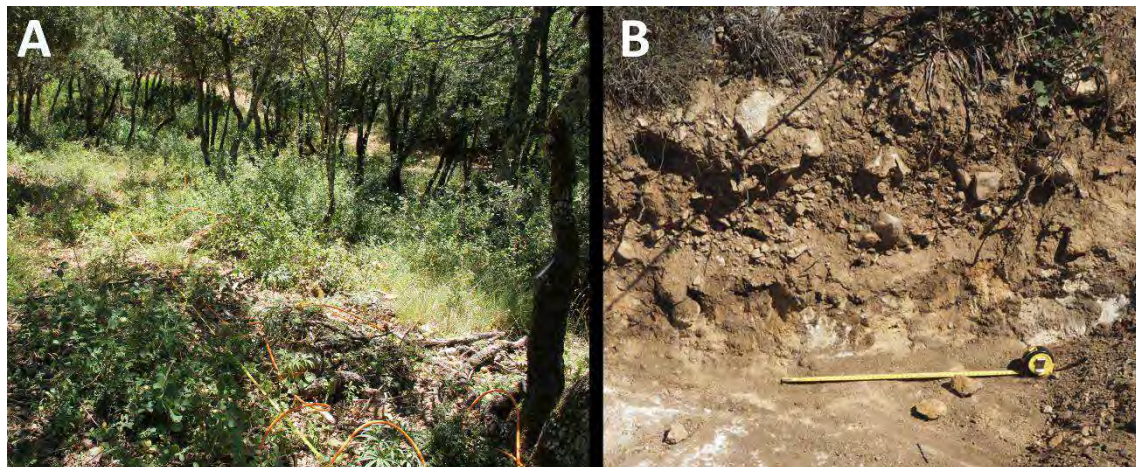


Figura 4.53. A: Tramo final del perfil ERT\_8 durante la prospección de 2016. Se aprecia cómo la vegetación cerrada dificulta la visibilidad de elementos geológicos. B: Detalle del corte visible en el camino del Valle de la Propiedad en cuya base se aprecian calcarenitas cementadas. La localización de esta imagen se indica en la figura 4.54.

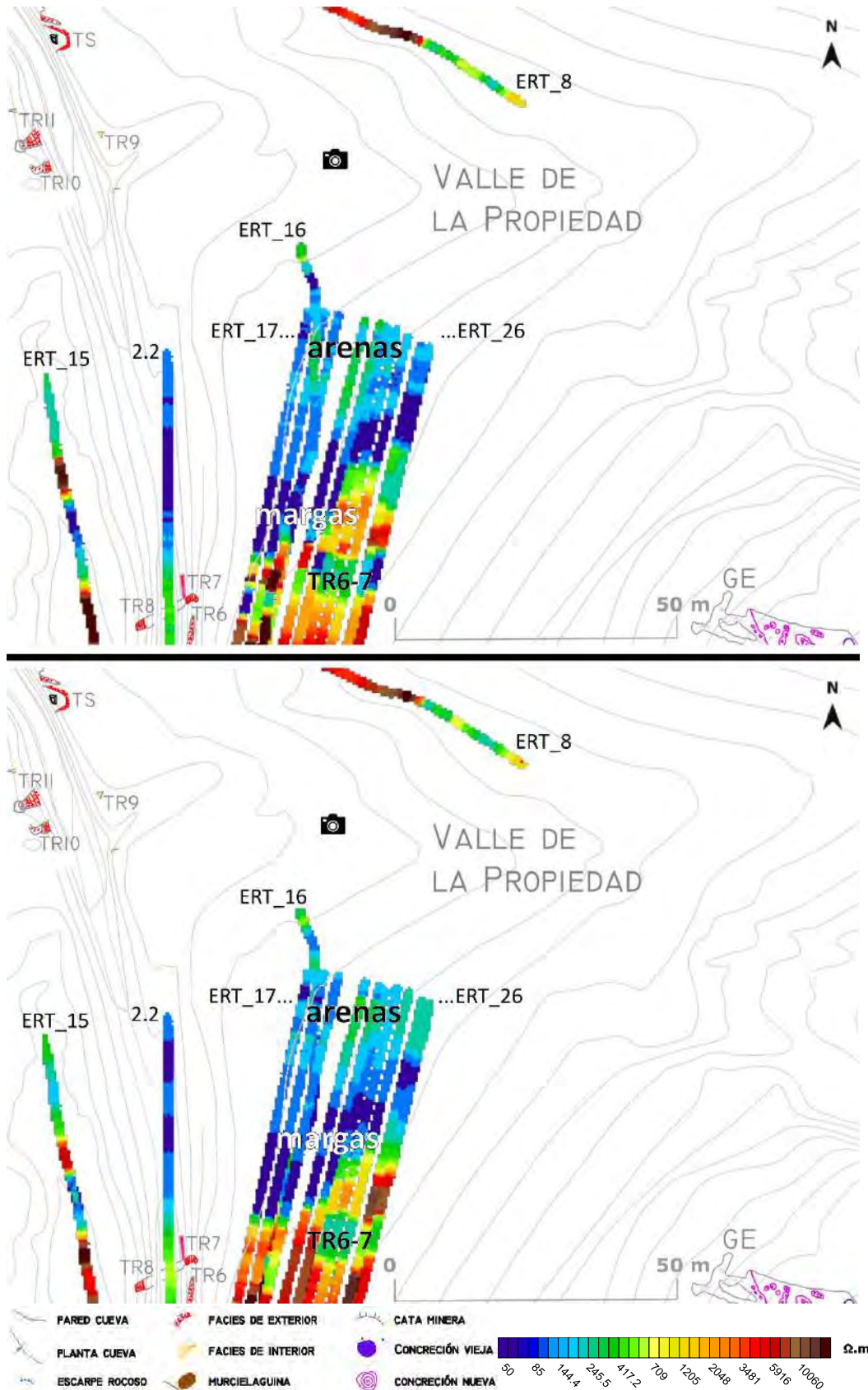


Figura 4.54. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_8 y ERT\_15-ERT\_26 en torno a los 998 m s.n.m. y su relación con el Valle de la Propiedad. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. TS indica Sima Sur y GE Galería de las Estatuas. El icono de la cámara indica la localización de la figura 4.53 B.

Los perfiles ERT\_15, ERT\_16, los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 y el perfil 2.2 publicado en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2), cuya orientación es perpendicular al trazado del Valle de la Propiedad (figura 4.50), definen en detalle el límite sur del valle. Al oeste de la Trinchera del Ferrocarril, el contacto superficial entre el relleno del valle y las calizas cretácicas se sitúa hacia el metro 30 del perfil ERT\_15, a unos 1002 m s.n.m. (figura 4.55). Hacia el este, este contacto está especialmente definido por el escalón topográfico que se aprecia hacia el metro 60 del perfil ERT\_16, a unos 1005 m s.n.m. (figura 4.56). Por su parte, los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 reflejan este contacto entre los metros 40 y 50 a partir de los 1008 m s.n.m., tomando como referencia el perfil ERT\_26, que es el más elevado (figura 4.57). En conjunto, los límites entre el relleno del valle y el frente calizo que registran estos perfiles muestran una apertura del valle hacia el SO (figura 4.54), lo que coincide con la topografía y los estudios geomorfológicos (figuras 4.48 y 4.54).

En general, los perfiles situados al E de la trinchera muestran un escalonamiento del relleno del valle hacia el norte, con un primer escalón de entre 3 m y 5 m de profundidad y un segundo escalón de unos 10 m de profundidad (figuras 4.56 y 4.57). El perfil ERT\_16, que se sitúa unos 10 m al norte de los perfiles ERT\_17-ERT\_26 (figura 4.50), refleja, especialmente en el dispositivo DD, que este segundo escalón podría constituir, en realidad, un relieve negativo local que se situaría entre los metros 30 y 40 (figura 4.56). Asimismo, a la altura de este segundo escalón se recoge, en todos los perfiles (ERT\_16-ERT\_26), un límite entre valores de resistividad de 150-250  $\Omega$ .m (los más septentrionales) y valores inferiores a 80  $\Omega$ .m (los más meridionales) (figuras 4.56 y 4.57). Este límite subvertical debe corresponder al contacto entre los principales afloramientos visibles en el corte de la Trinchera del Ferrocarril (figura 1.X), en el que se han descrito dos grandes unidades: una en la que predominan las arenas y los conglomerados (al norte) y otra compuesta por margas y arcillas (al sur) (Benito-Calvo, 2004; Benito Calvo et al., 2017).

Con la detallada información aportada por los perfiles situados al este de la trinchera podemos completar la interpretación del perfil ERT\_15, que es el único que se encuentra al oeste de la trinchera a estas mismas cotas. Así, el límite sur del valle debería situarse hacia el metro 40 de este perfil, ya que los valores de resistividad de hasta 300  $\Omega$ .m que se localizan en los primeros metros del perfil ERT\_15 se corresponden con los sedimentos arenosos y los valores inferiores a 50  $\Omega$ .m que se sitúan entre los metros 25 y 40, aproximadamente, se corresponden con los sedimentos margosos (figuras 4.54, 4.55). En este sentido, la anomalía resistiva que se sitúa sobre los valores asociados a las margas debe representar un bloque calizo, como los que pueden observarse en el corte este de la trinchera (figura 1.X). Tan sólo la profundidad del relleno margoso, que alcanza unos 14 m de profundidad según el perfil ERT\_15, es discordante con los datos aportados por los perfiles ERT\_16-ERT\_26, si bien esta anomalía podría mostrarse sobredimensionada dado que se sitúa en un extremo del perfil y que el modelo presenta un mayor error, sobre todo en el dispositivo DD (figura 4.55).

Finalmente cabe destacar que, en todos los perfiles situados al este de la trinchera, aunque más claramente en los DD, se recoge una pequeña anomalía conductiva cerrada (TR6-7) (cuyos valores de resistividad varían según los perfiles) de unos 5 m de longitud y espesor, que presenta una posible relación con el Valle de la Propiedad, especialmente en los perfiles ERT\_22-ERT\_26 (figuras 4.56 y 4.57). En los perfiles que se encuentran más cercanos a la trinchera, esta anomalía se sitúa entre las secciones de los conductos TR6 y TR7, lo que podría indicar la continuación de estos conductos hacia el este o al menos la existencia de un condicionante estructural común (tipo fractura) que favorezca la karstificación.



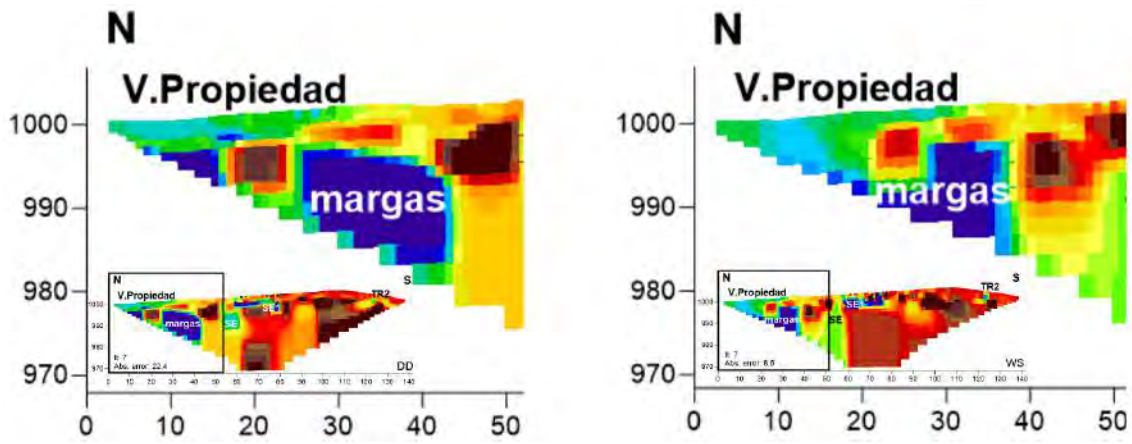


Figura 4.55. Detalle del perfil ERT\_15. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

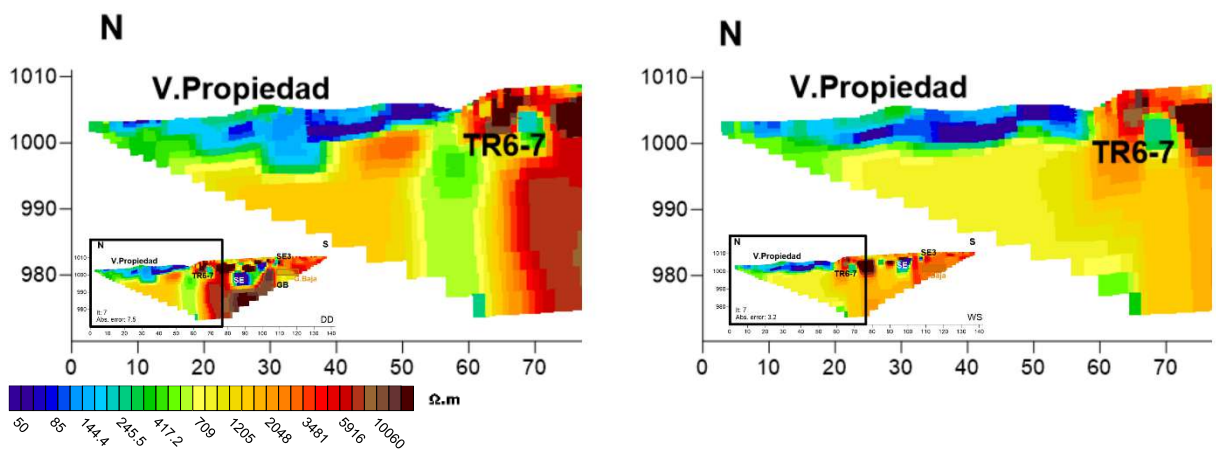


Figura 4.56. Detalle del perfil ERT\_16. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

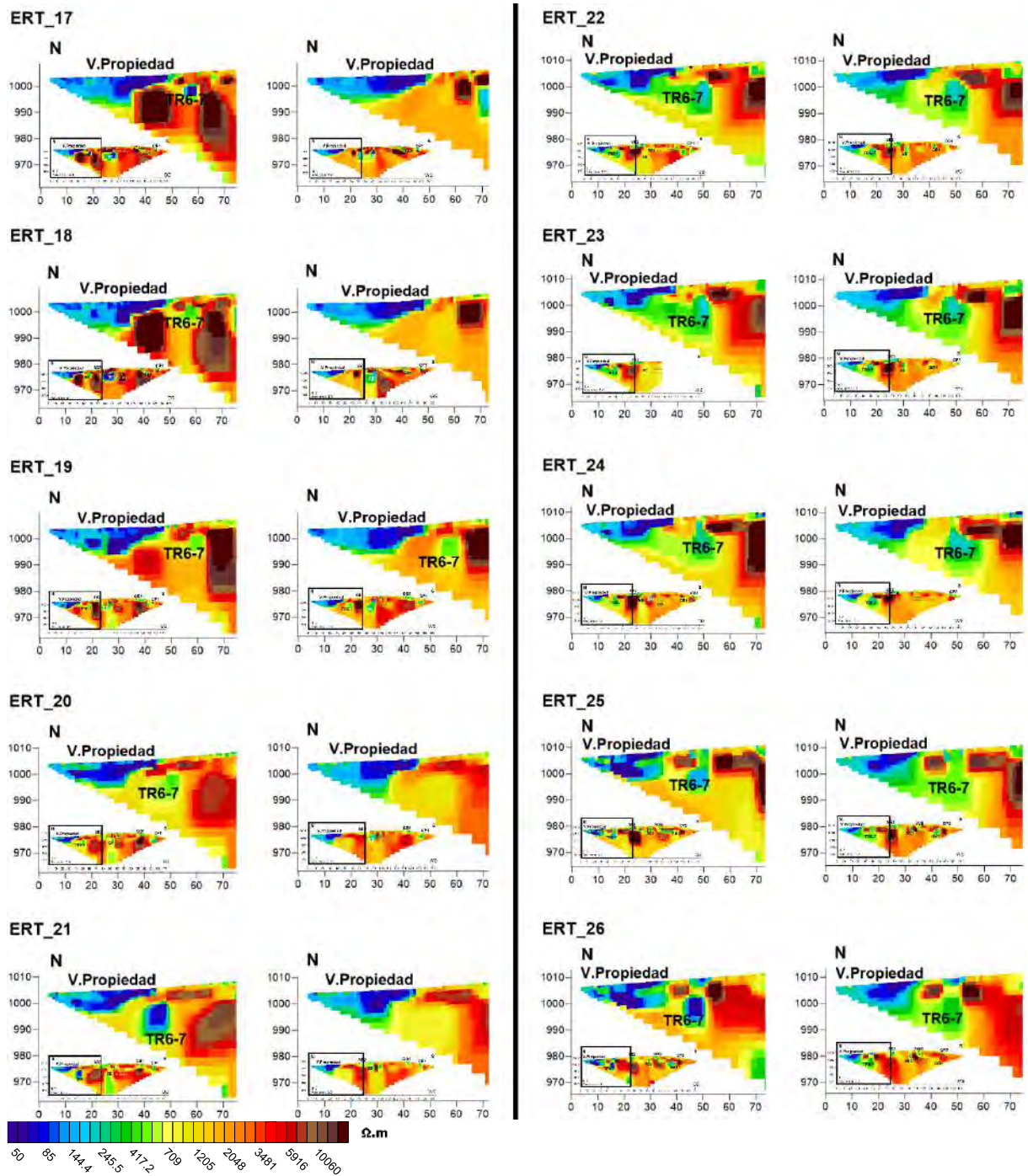


Figura 4.57. Detalle de los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. Los perfiles completos se pueden consultar en el anexo II.2.

#### 4.1.2.1.2.3 Nivel inferior

Los perfiles ERT\_13, ERT\_27, ERT\_28 y el perfil 2.2 publicado en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2) definen el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst (figuras 4.58 y 4.59).

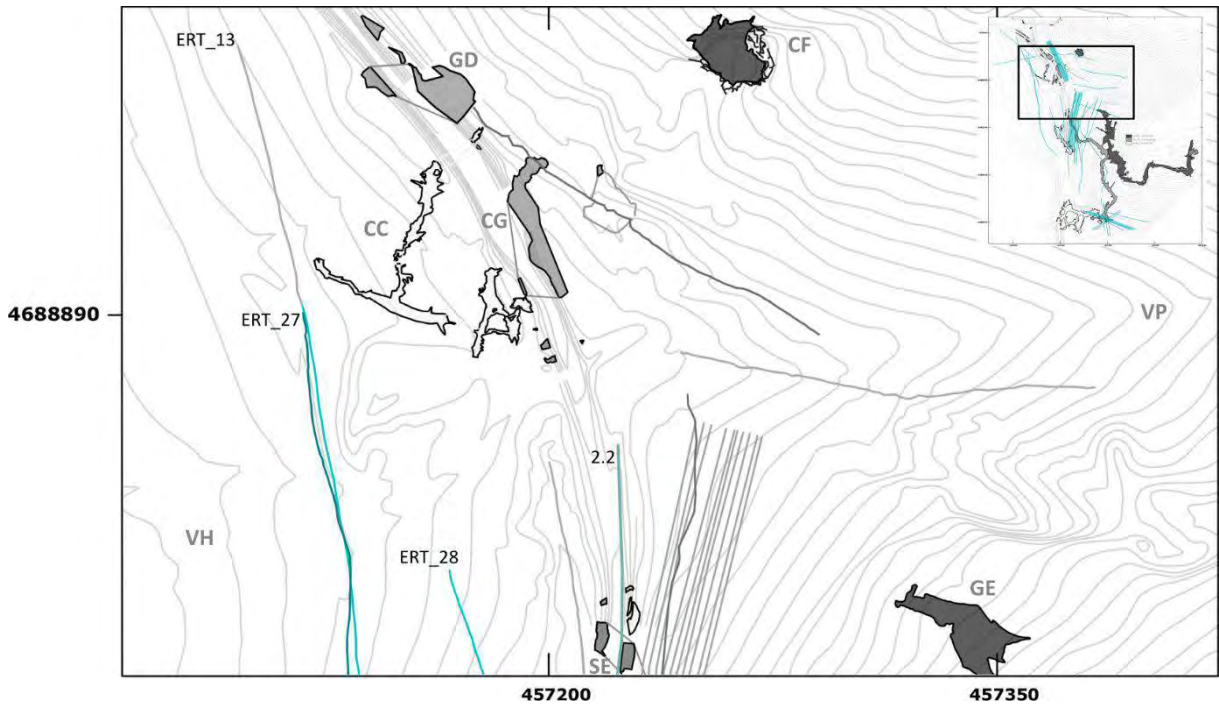


Figura 4.58. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este valle (en gris). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; SE Sima del Elefante GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor, y VH Valle de Valhondo.



Figura 4.59. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT realizados en el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst. VH indica Valle de Valhondo.



El perfil ERT\_13 es el único de los perfiles realizados sobre el Valle de la Propiedad que abarca la longitud total del valle (figura 4.58). En su parte central muestra una estructura conductiva de unos 95 m de longitud, en contacto de la superficie desde los 998 m s.n.m., que puede relacionarse con el relleno del valle de la Propiedad y que se encuentra flanqueada por valores de resistividad que pueden asociarse a la roca caliza (figura 4.60). Este perfil es también el único que recoge la base del valle, que podría alcanzar unos 25 m de profundidad, si establecemos (al igual que en los perfiles realizados en este valle en el nivel intermedio del karst) que la resistividad del relleno del valle alcanza un valor máximo de 250  $\Omega$ .m.

El perfil ERT\_27, paralelo al ERT\_13 a esta altura (figuras 4.58 y 4.59), indica una longitud similar para el relleno del valle, si consideramos que el límite norte del valle se sitúa al inicio del perfil y su límite sur hacia el metro 100 (figura 4.61), ya que ambos puntos coinciden en planta (figura 4.62). Del mismo modo, se intuye, especialmente en el dispositivo WS, que la profundidad del relleno del valle es análoga a la del perfil ERT\_13, aunque este límite se encuentre en la parte inferior del perfil ERT\_27 (figura 4.61). Asimismo, ambos perfiles muestran un escalonamiento en el relleno del valle, con un primer escalón de unos 9 m de profundidad (figuras 4.60 y 4.61).

Al igual que se ha descrito para el nivel intermedio del karst, el relleno del valle muestra dos unidades principales. La que se sitúa más al norte presenta valores de resistividad de 150-250  $\Omega$ .m, excepto por el pequeño cuerpo más conductivo de unos 10 m de longitud y 8 m de profundidad que se refleja de manera coincidente en ambos perfiles (figura 4.62), y la que se sitúa más al sur muestra valores de resistividad inferiores a 80  $\Omega$ .m. Estos dos grupos de valores corresponderían a los rellenos sedimentarios compuestos por arenas y conglomerados y por margas y arcillas, respectivamente (Benito-Calvo, 2004; Benito Calvo et al., 2017).

Por último, cabe destacar que la forma del valle que presentan los perfiles ERT\_13 y ERT\_27 difiere entre los dispositivos. Así, los DD (que presentan errores elevados) muestran una forma de U, mientras que los WS reflejan un límite vertical, más típico de un cañón (figuras 4.60 y 4.61).

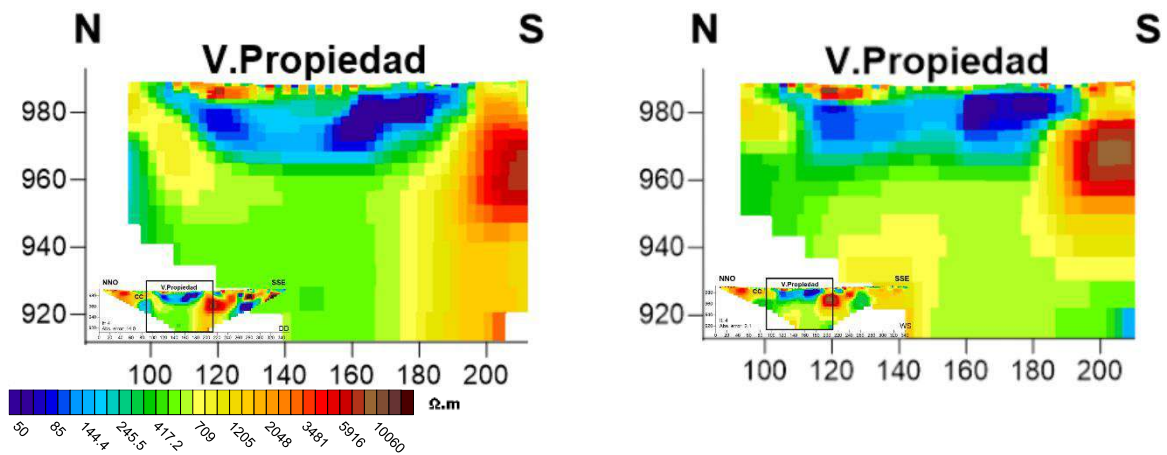


Figura 4.60. Detalle del perfil ERT\_13. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.



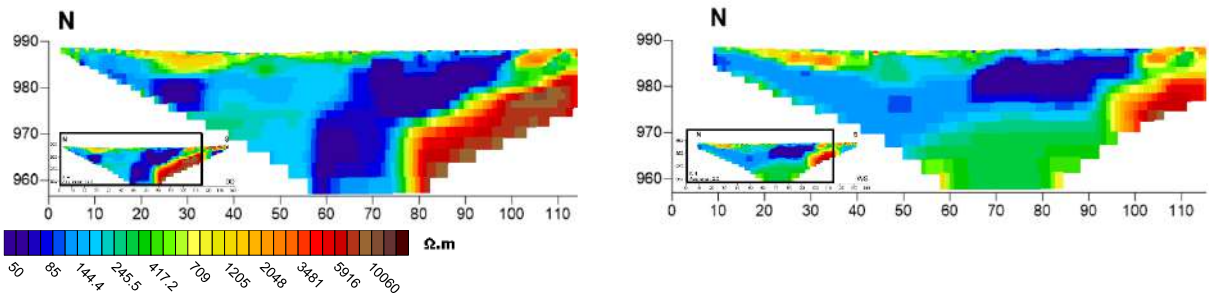


Figura 4.61. Detalle del perfil ERT\_27. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

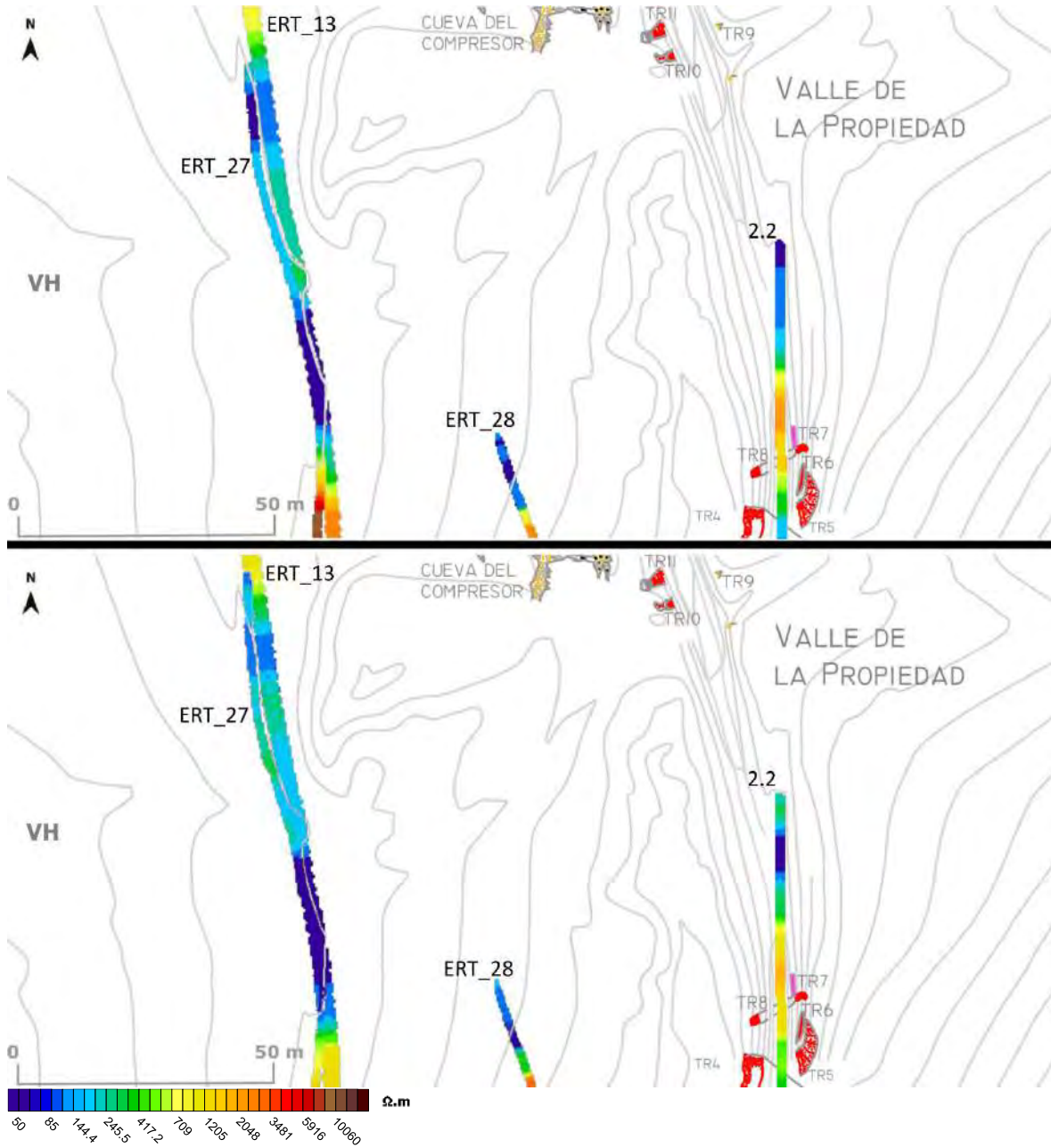


Figura 4.62. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_13, ERT\_27 y ERT\_28 en torno a los 987 m s.n.m. y su relación con el Valle de la Propiedad y las cavidades más cercanas. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. VH indica Valle de Valhondo.

El perfil ERT\_28 define el límite sur del Valle de la Propiedad a medio camino entre la Trinchera del Ferrocarril y los perfiles ERT\_13 y ERT\_27 (figura 4.59). Este perfil muestra un límite vertical entre el relleno del valle y la roca caliza, de al menos 9 m de profundidad (figura 4.63), que se sitúa unos 10 m al sur del límite del valle reflejado en los perfiles ERT\_13 y ERT\_27 y casi 30 m al sur del reflejado en el perfil 2.2 (figura 4.62). Los valores de resistividad del relleno varían entre el dispositivo DD y el WS, pero indican la presencia de la unidad sedimentaria más conductiva ( $<80 \Omega.m$ ), como la descrita hasta ahora en el límite meridional del valle. Además, estos valores muy conductivos asociados al relleno de margas están superpuestos por unos 2 m de sedimentos más resistentes (figura 4.63), que podrían corresponder a un horizonte edáfico o a los depósitos de coluviones identificados en el sistema kárstico de Trinchera (ver apartado 4.1.2.1.3) y descritos a esta altura por Benito-Calvo y Pérez González (2015).

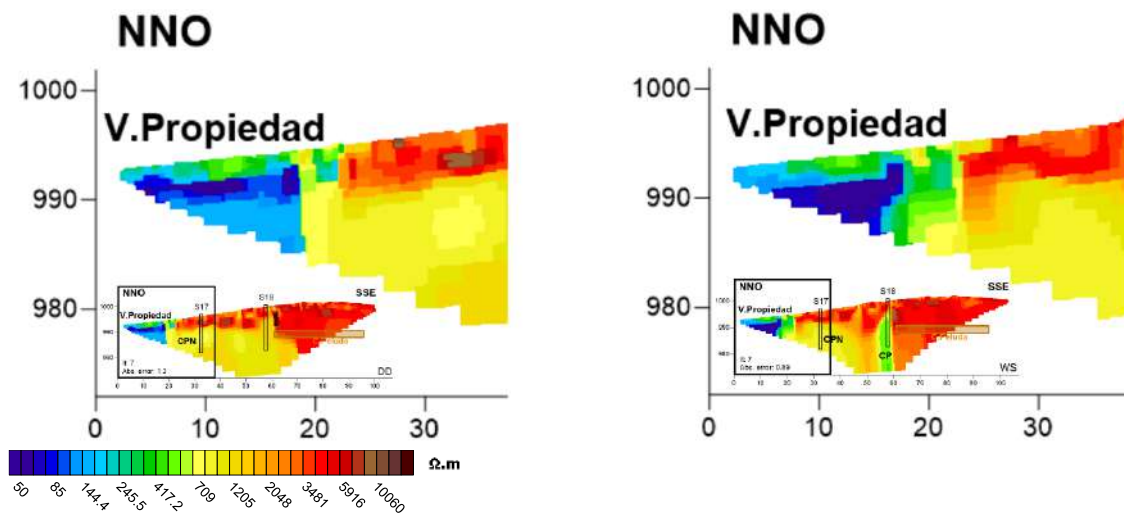


Figura 4.63. Detalle del perfil ERT\_28. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

#### 4.1.2.1.3 Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo

Los perfiles de ERT realizados al sur del Valle de la Propiedad, en el sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo, comprenden los perfiles ERT\_15-ERT\_43 y los perfiles 2.1 y 2.2 (Bermejo et al., 2013. Anexo I.2), que se sitúan en torno a las cavidades de Galería de las Estatuas, Galería Baja-Sima del Elefante, Galería del Silo y Cueva Peluda (figura 4.64).

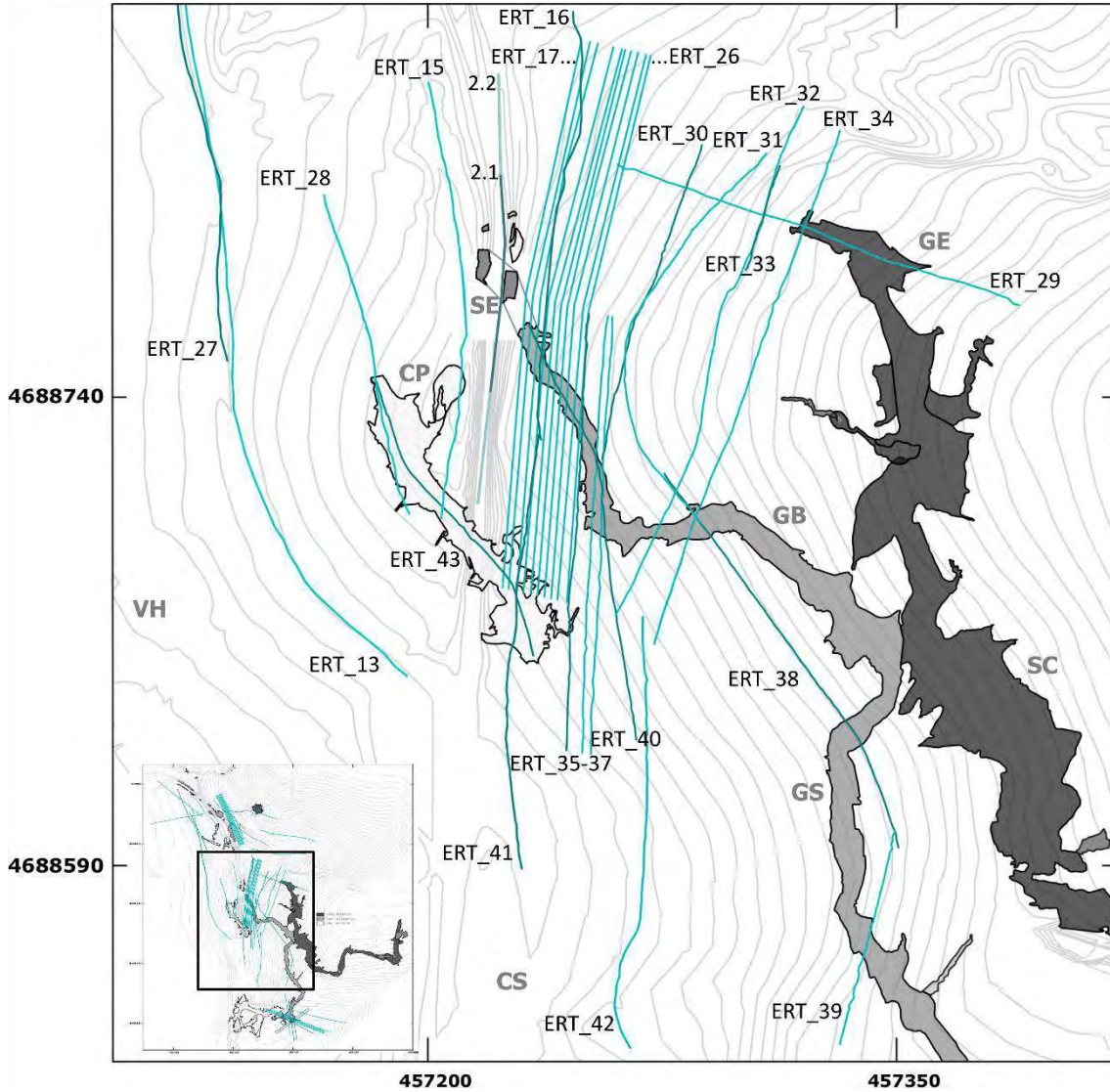


Figura 4.64. Localización de los perfiles de ERT realizados en el sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo. GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.



#### 4.1.2.1.3.1 Nivel superior

Los perfiles de ERT realizados en el nivel superior del sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo (figura 4.65) abarcan varios sectores: los perfiles ERT\_29-ERT\_34 definen la entrada de Galería de las Estatuas; los perfiles ERT\_30-ERT\_38 comprenden un área del nivel superior del karst relacionada con el conducto del nivel intermedio de Galería Baja, y los perfiles ERT\_38 y ERT\_39 definen un área situada sobre el conducto del nivel intermedio de Galería del Silo, pero a cotas del nivel superior del karst.

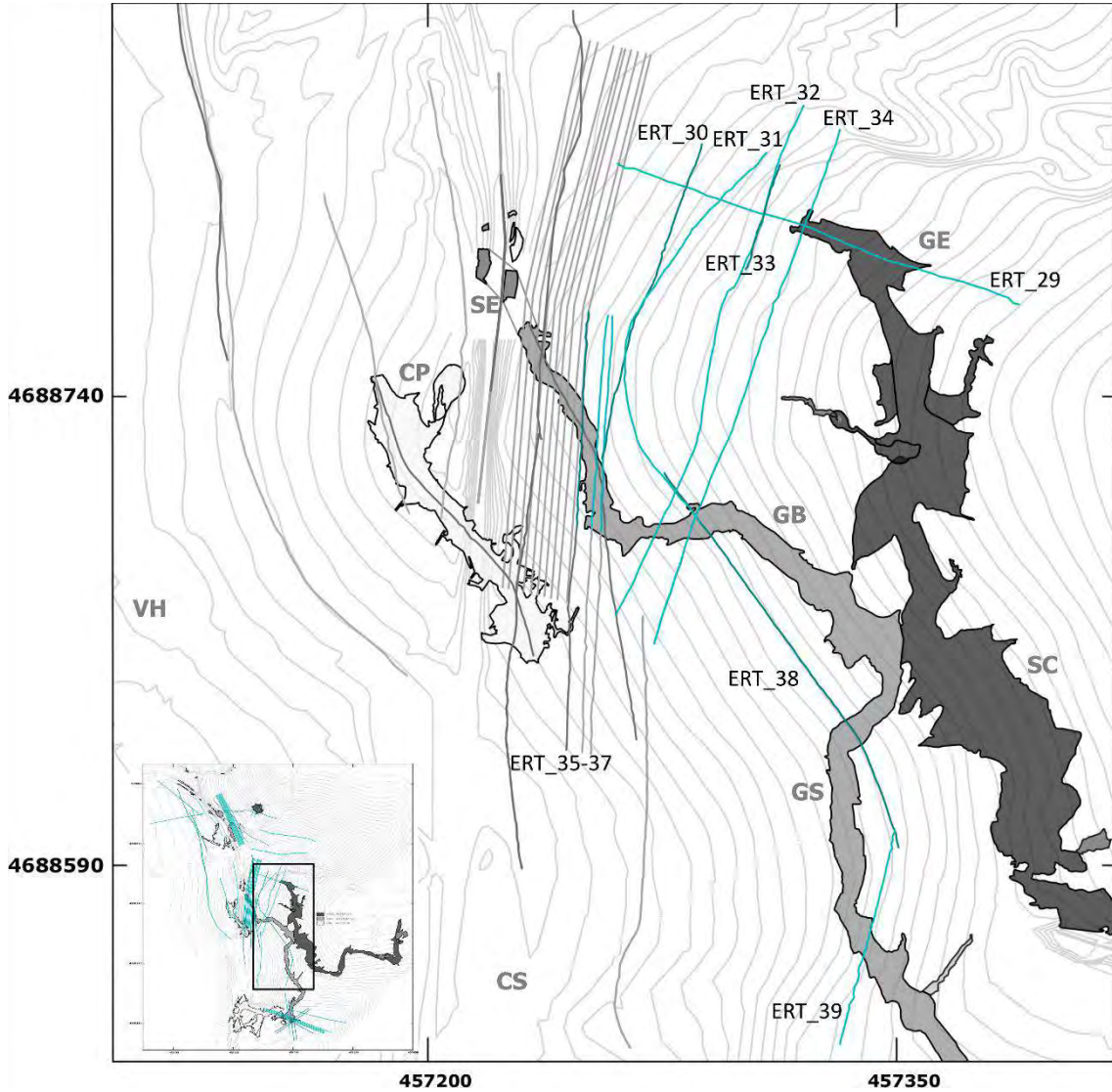


Figura 4.65. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre nivel superior del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.

- Galería de las Estatuas

De los seis perfiles de ERT realizados en torno a Galería de las Estatuas, cinco (ERT\_29-ERT\_33) aportan información acerca del extremo NO de este conducto y cuatro (ERT\_30-ERT\_32 y ERT\_34) muestran la existencia de un relleno que presenta la misma dirección que el conducto lateral (CL) que se desarrolla en dirección NO-SE desde la Galería de las Estatuas. Cuatro sondeos con recuperación de testigo completan el estudio de esta compleja área (figura 4.66).

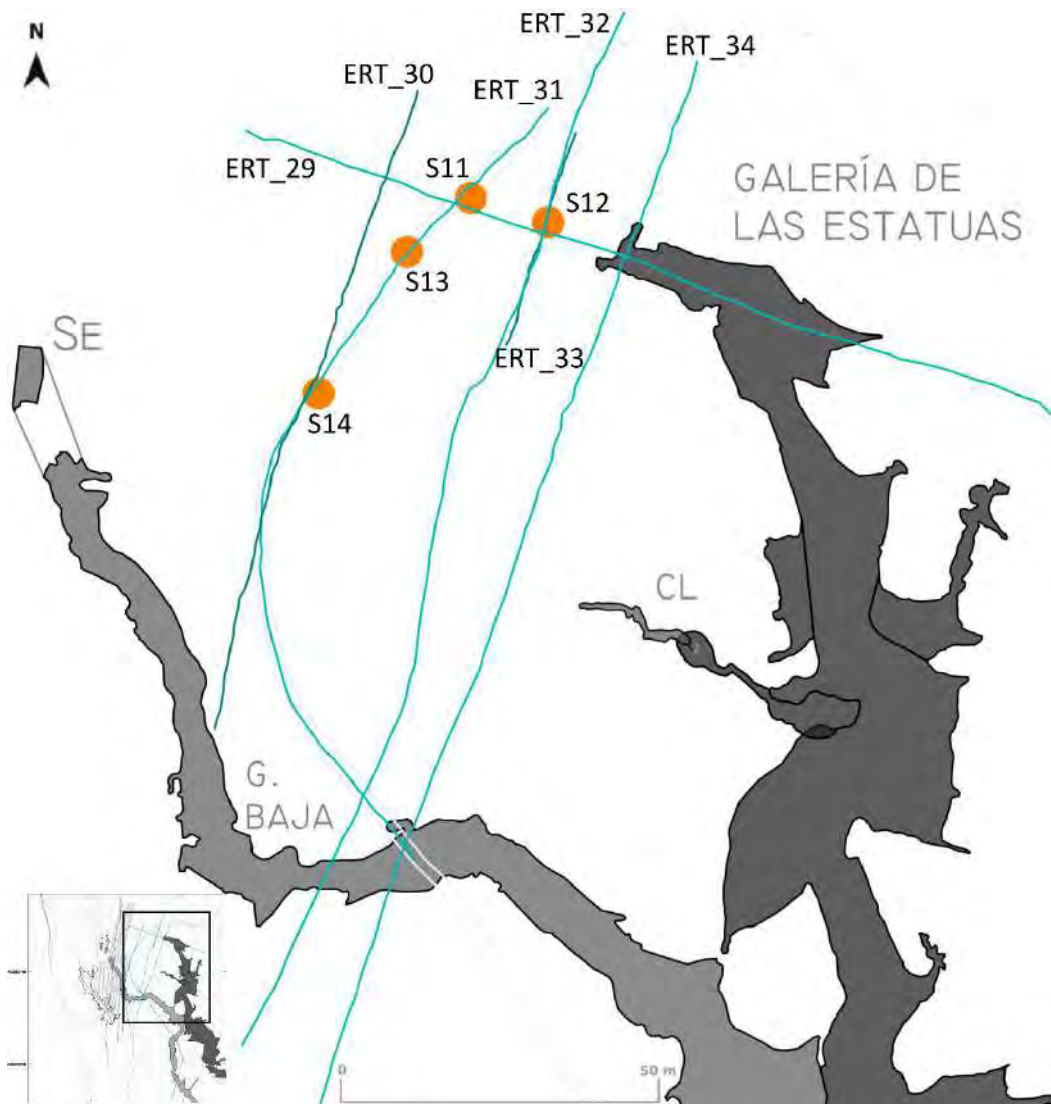


Figura 4.66. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT y los sondeos mecánicos realizados en torno a Galería de las Estatuas. SE indica Sima del Elefante y CL Conducto Lateral.

Los perfiles ERT\_29-ERT\_33 muestran una serie de anomalías conductivas que pueden asociarse a la antigua entrada colmatada de sedimentos de la Galería de las Estatuas, ya que presentan la misma orientación que las paredes del extremo NO de la cueva (figura 4.67). Estas anomalías, que se indican en las plantas y perfiles como GE (acrónimo de Galería de las Estatuas), muestran, en conjunto, una estructura alargada y estrecha, de al menos 28 m de largo por 5 m de ancho, que se ensancha hasta los 8 metros en el perfil ERT\_30 (figura 4.67), seguramente cerca de su confluencia con el Valle de la Propiedad (Ortega, 2009) (ver apartado 4.1.2.1.2.2). Los valores de resistividad de hasta 500  $\Omega \cdot m$  que definen estas anomalías conductivas pueden asociarse a rellenos sedimentarios endokársticos, tal y como ha demostrado la campaña de excavación de 2020 en esta área, que ha dejado al descubierto varios niveles arcillosos en contacto con la superficie (figura 4.68).

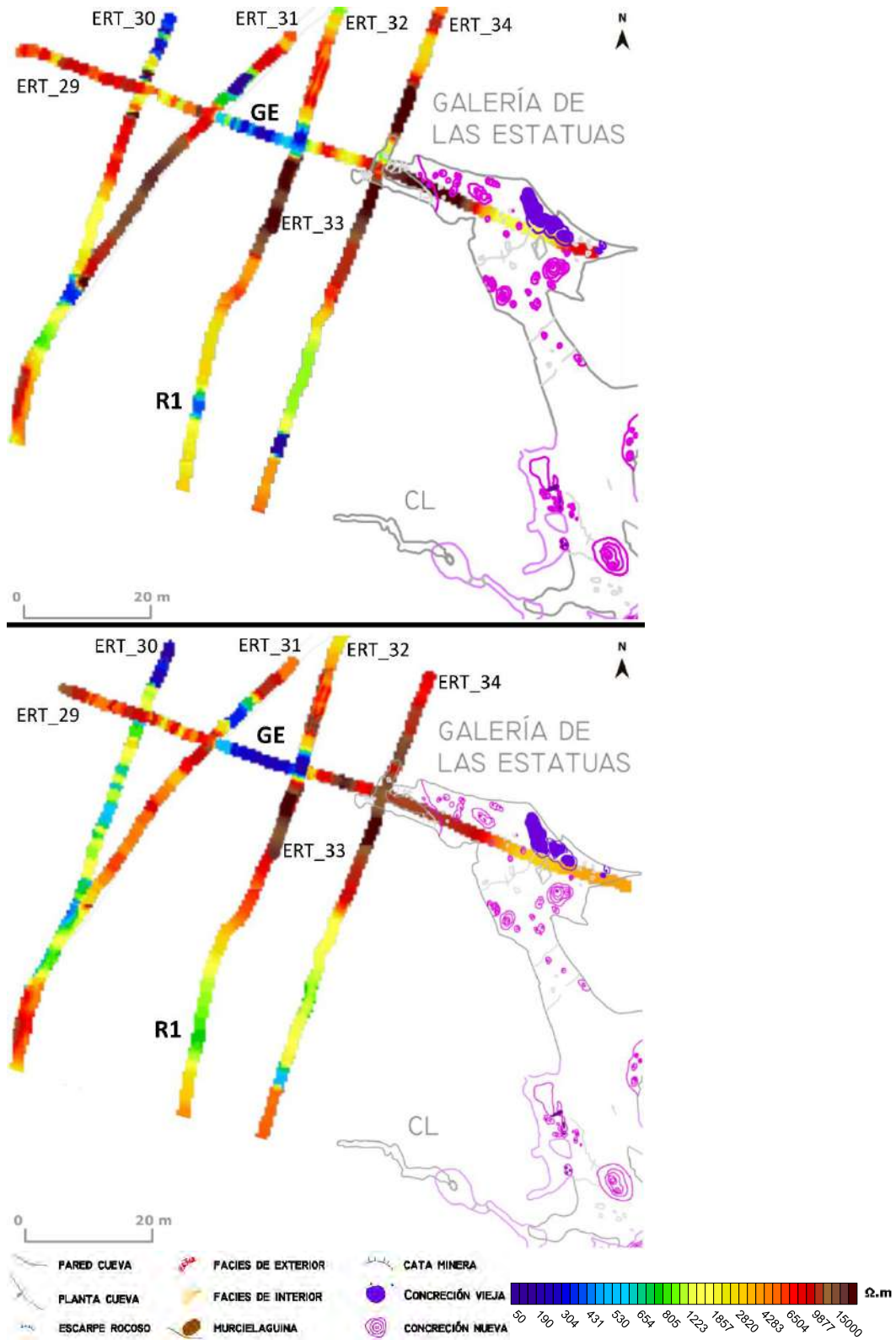


Figura 4.67. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_29-ERT\_34 en torno a los 1015 m s.n.m. y su relación con Galería de las Estatuas. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. CL indica Conducto Lateral, GE el relleno de entrada de Galería de las Estatuas y R1 el conducto del camino de la Roza.





Figura 4.68. Yacimiento de Estatuas Exterior, junto al camino de la Roza, durante la campaña de excavaciones de 2020. Se aprecian sedimentos arcillosos, cantos calizos y un gran espeleotema. (Fotografía: Ana Isabel Ortega).

El perfil ERT\_29, realizado longitudinalmente sobre el conducto de Galería de las Estatuas (figuras 4.65 y 4.66), es el único que refleja claramente la base de este relleno sedimentario, aunque la profundidad de la anomalía conductiva GE no se ajusta a la información aportada por los sondeos mecánicos S11 y S12. Así, el perfil ERT\_29 muestra una profundidad aproximada de 7 m para la anomalía GE (figura 4.69) a la altura del sondeo S11, lo que resulta coherente con los 5 m de arenas y arcillas recuperados en este sondeo (figura 4.70), pero apenas refleja 10 m de profundidad a la altura del sondeo S12 (figura 4.69), un valor inferior a los 15 m de rellenos arcillosos que reveló el sondeo mecánico (figura 4.70).

Las anomalías GE que se reflejan en los perfiles ERT\_30 y ERT\_31 (figuras 4.71 y 4.72) aportan poca información acerca de la profundidad de esta estructura, seguramente porque se recogen en los primeros metros de estos perfiles. Sin embargo, y aunque su base no resulta del todo evidente, la anomalía GE del perfil ERT\_32 es la que mejor representa la potencia de este relleno sedimentario, con una anomalía que alcanza los 15 m de profundidad (figura 4.73), lo que coincide con la información aportada por el sondeo S12 (figura 4.70).

Por su parte, el perfil ERT\_33, de sólo 35.5 m de longitud y centrado en el conducto de entrada, no podría haber recogido la base de este relleno debido a que apenas alcanza 6 m de profundidad, pero la estrecha separación entre electrodos (50 cm) ha permitido distinguir diferentes niveles sedimentarios, especialmente en el perfil DD (figura 4.74). De esta manera, el primer nivel conductivo reflejado en el perfil ERT\_33 corresponde al primer nivel de arcillas descrito en el sondeo S12; los valores más resistivos que se encuentran entre el primer y segundo metro de profundidad coinciden con el primer nivel de bloques de caliza recuperado en el sondeo y los valores más conductivos que le subyacen, corresponden a los niveles limo-arenosos que se encuentran hasta los 5 m de profundidad en el sondeo 12 (figuras 4.70 y 4.74).

En todos los casos, la anomalía GE se muestra en contacto directo con la superficie, desde los 1013 m s.n.m. del perfil más occidental (ERT\_30) (figura 4.71) hasta los 1020 m s.n.m. del perfil más oriental (ERT\_33) (figura 4.74), siguiendo la pendiente de la ladera hacia el oeste (figura 4.65).

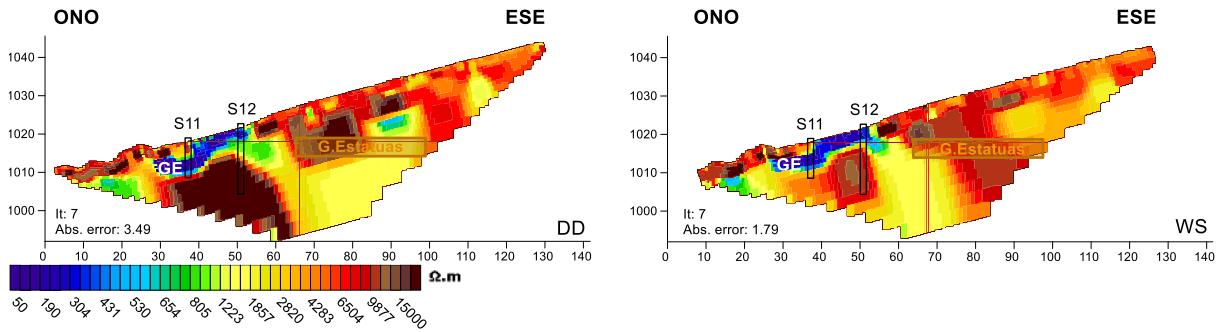


Figura 4.69. Perfil ERT\_29. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GE indica el relleno de entrada a Galería de las Estatuas. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.

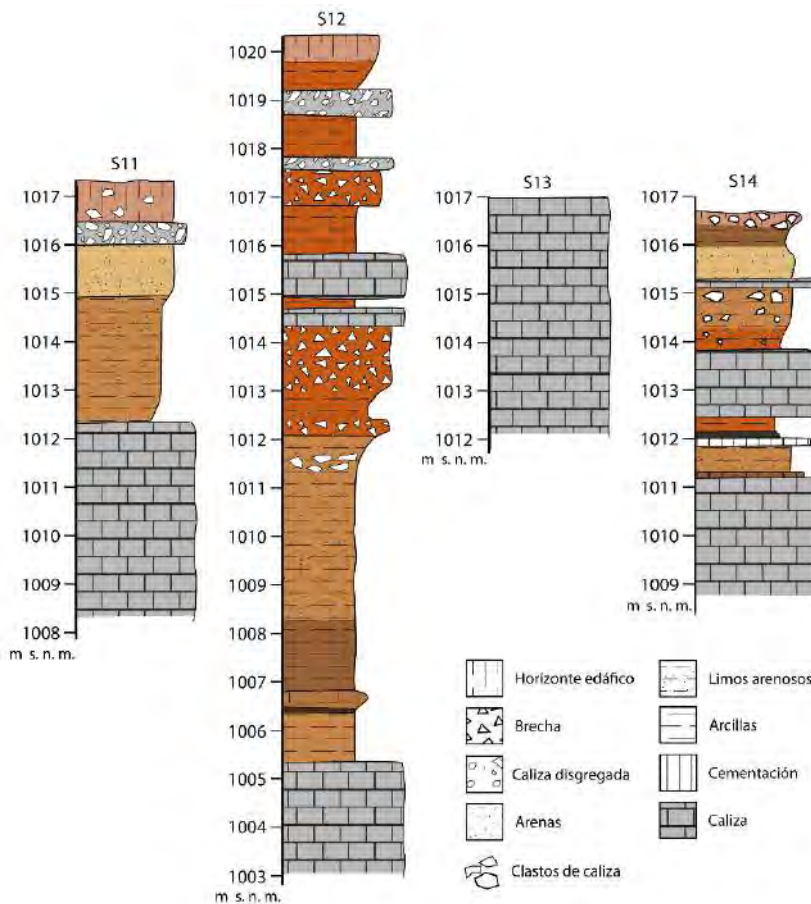


Figura 4.70. Descripción esquemática de la litología de los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S11, S12, S13 y S14.

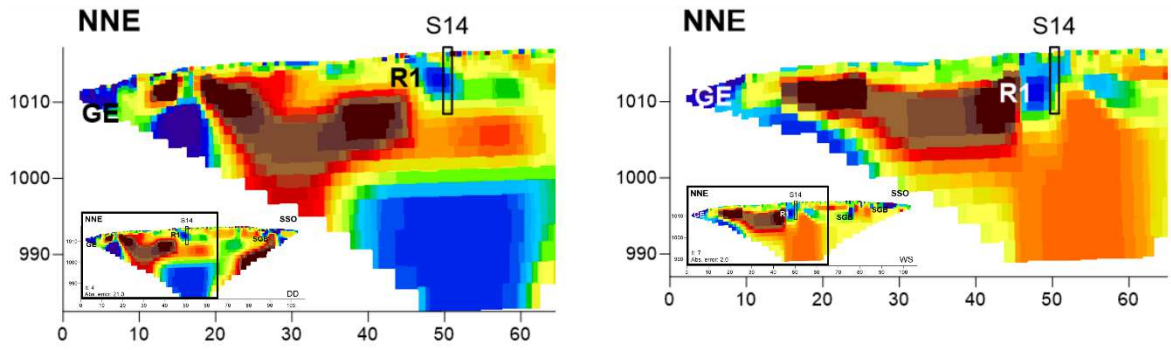


Figura 4.71. Detalle del perfil ERT\_30. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GE indica el relleno de entrada a Galería de las Estatuas y R1 el conducto del camino de la Roza. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

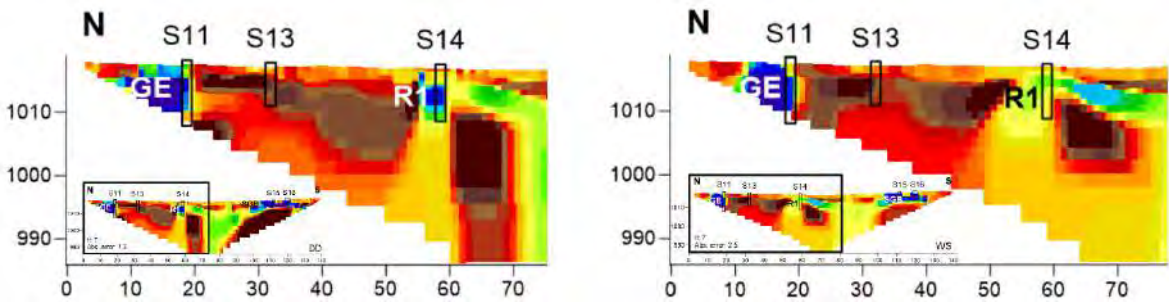


Figura 4.72. Detalle del perfil ERT\_31. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GE indica el relleno de entrada a Galería de las Estatuas y R1 el conducto del camino de la Roza. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

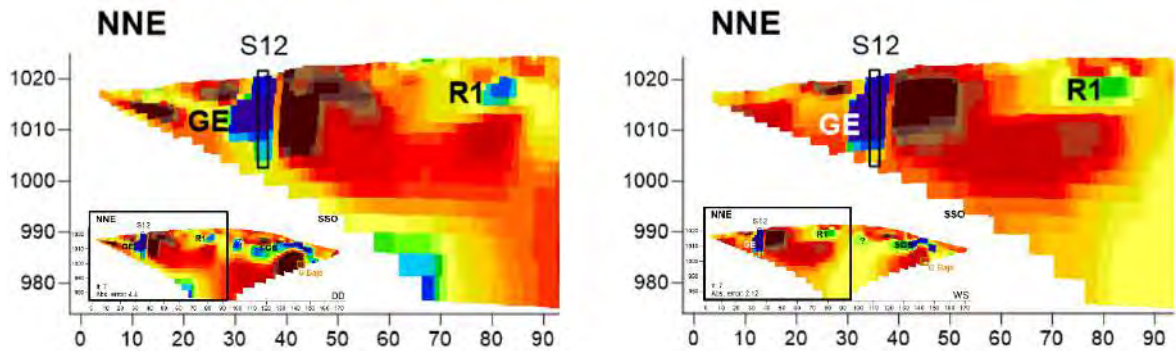


Figura 4.73. Detalle del perfil ERT\_32. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GE indica el relleno de entrada a Galería de las Estatuas y R1 el conducto del camino de la Roza. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

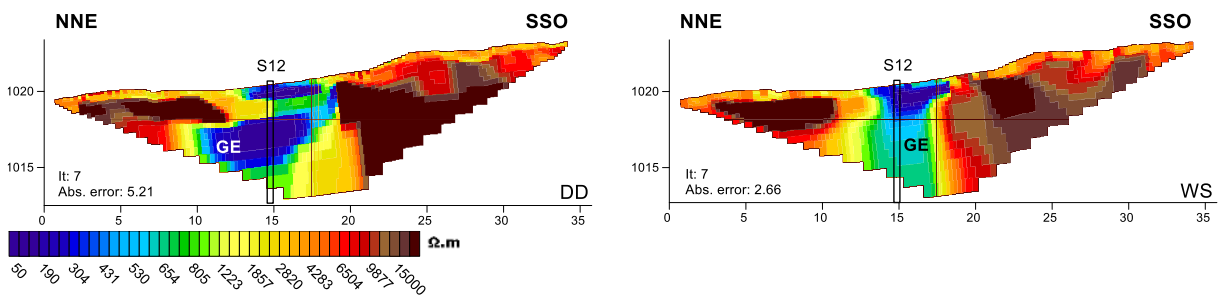


Figura 4.74. Perfil ERT\_33. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GE indica el relleno de entrada a Galería de las Estatuas.



Por otro lado, el inicio del techo de Galería de las Estatuas está bien definido por el perfil ERT\_29, que muestra un cambio de resistividad neto hacia el metro 55 que se sitúa a unos 6 m del último punto topografiado en el interior de la cueva (Ortega, 2009) (figuras 4.67 y 4.69). Este cambio coincide con el escalón en la roca caliza puesto al descubierto por los trabajos de la campaña de excavación de 2020 (figura 4.75).

El perfil ERT\_34 muestra, bajo este techo, una anomalía conductiva que, por cotas, es compatible con el relleno sedimentario que colmata el tramo final de la Galería de las Estatuas (figura 4.76). La base de este relleno no se recoge en perfil ERT\_34, pero por proximidad con el sondeo S12 podría alcanzar hasta 15 m profundidad (figura 4.70).



Figura 4.75. Yacimiento de Estatuas exterior durante la campaña de excavaciones de 2020. Se aprecia, en primer plano, el escalón entre la caliza y el sedimento. (Fotografía: Ana Isabel Ortega).

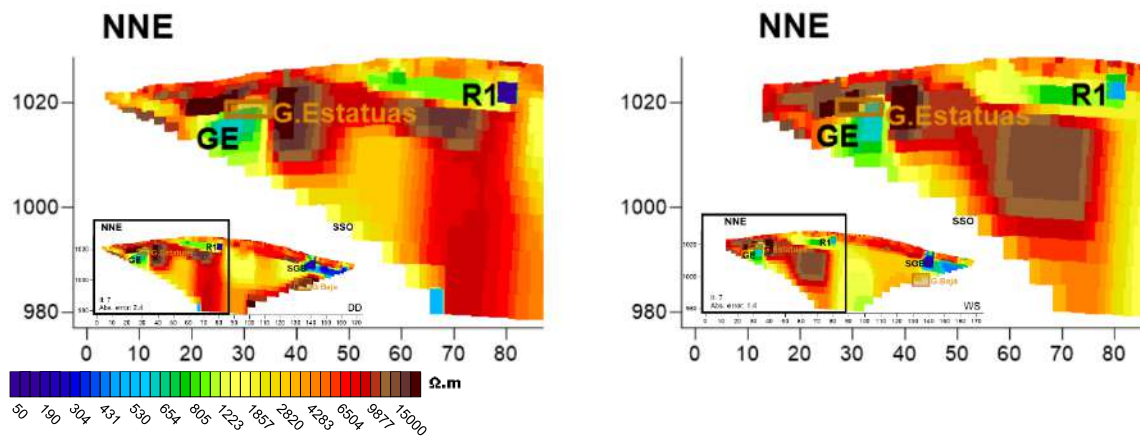


Figura 4.76. Detalle del perfil ERT\_34. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. GE indica el relleno de entrada a Galería de las Estatuas y R1 el conducto del camino de la Roza. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

Los perfiles ERT\_30, ERT\_31, ERT\_32 y ERT\_34 muestran, además, sendas anomalías conductivas de tamaño parecido (R1), de hasta 500  $\Omega$ .m, que pueden constituir un único conducto colmatado de sedimentos que se desarrolla con orientación NO-SE (figura 4.67). Las dimensiones de estas anomalías, cuyos límites se definen mejor en los perfiles DD, son de unos 5 m de alto por unos 5 m ancho, lo que es compatible con la información aportada por el sondeo mecánico S14, que reveló algo más de 5 m de sedimentos areno-arcillosos, intercalados por un 1 m de roca caliza aproximadamente (figura 4.70), para la anomalía visible en los perfiles ERT\_30 y ERT\_31 (figuras 4.71 y 4.72). La cota de la base a la que se encuentran estos cuerpos conductivos desciende paulatinamente hacia el oeste, desde los 1020 m s.n.m. perfil ERT\_34 (figura 4.76) hasta los 1010 m s.n.m. del perfil ERT\_30 (figura 4.71).

Espacialmente, las anomalías R1 se sitúan en línea con el estrecho conducto lateral (CL) de la Galería de las Estatuas (figura 4.67), de dirección NO-SE. No obstante, ambos cuerpos no pueden formar parte del mismo conducto, puesto que el tramo inferior de esta lateral corresponde al nivel intermedio del karst (Ortega, 2009) (figura 4.66), mientras que las anomalías R1 se sitúan a cotas del nivel superior. Así pues, esta alineación indicaría la existencia de una fractura con orientación NO-SE, a favor de la cual se desarrolla la karstificación. Por todo ello, hemos decidido nombrar a esta anomalía R1, ya que el sondeo que ha permitido verificar la presencia de sedimentos (S14) se sitúa en el camino de la Roza (figuras 4.66 y 4.67).

Cabe destacar que muchas de las anomalías R1 aparecen junto a otras estructuras ligeramente más resistivas, de en torno a 700  $\Omega$ .m (figuras 4.71, 4.72, 4.73 y 4.76). Sin embargo, su heterogénea distribución espacial (figura 4.64) no permite establecer una relación geológica o espeleológica para ellas.

Por otro lado, la anomalía conductiva que se encuentra en el límite inferior del perfil ERT\_30, únicamente en el dispositivo DD, debe atribuirse al elevado error que presenta este modelo (figura 4.71).

En cuanto a los valores de resistividad extremadamente altos presentes en estos perfiles, estos aparecen, de manera general, en contacto con estructuras conductivas, por lo que seguramente constituyen artefactos del proceso de inversión (ver sección 3.1.4) y no reflejan ni cavidades vacías ni escombreras de cantera. Así lo pone de manifiesto el sondeo mecánico S13 (figura 4.72) que, a lo largo de sus 6 m de profundidad recuperó únicamente roca caliza, sin karstificación (figura 4.70). Tan solo en el perfil ERT\_29, y para el dispositivo DD, estos valores pueden relacionarse con el tramo aéreo de la Galería de las Estatuas, aunque el modelo no concuerda con la ubicación en profundidad ni con la morfología subhorizontal que presenta este conducto (figura 4.69).

Finalmente, con respecto a la estratificación de la roca caliza, sólo el perfil ERT\_29 permite intuir, a partir del metro 60, una serie de estructuras con valores de resistividad de entre 4000  $\Omega$ .m y 6000  $\Omega$ .m que se desarrollan paralelas a la topografía de la superficie (figura 4.69), con una pendiente aparente de unos 16°. Sin embargo, hay que tomar estos datos con cautela, ya que, como acabamos de mencionar, las anomalías muy resistivas que corresponderían al tramo aéreo de Galería de las Estatuas muestran también una inclinación paralela a la pendiente del perfil que no concuerda con el conducto conocido.

- Galería Baja (nivel superior)

Los perfiles ERT\_30-ERT\_32, ERT\_34, los perfiles paralelos ERT\_35-ERT\_37 y el perfil ERT\_38 (figura 4.77) muestran una serie de anomalías conductivas próximas al conducto del nivel intermedio de Galería Baja, que se relacionan con cotas del nivel superior del karst. Por esta razón, estas anomalías conductivas se indican en las plantas y perfiles como SGB, acrónimo de Superior Galería Baja.

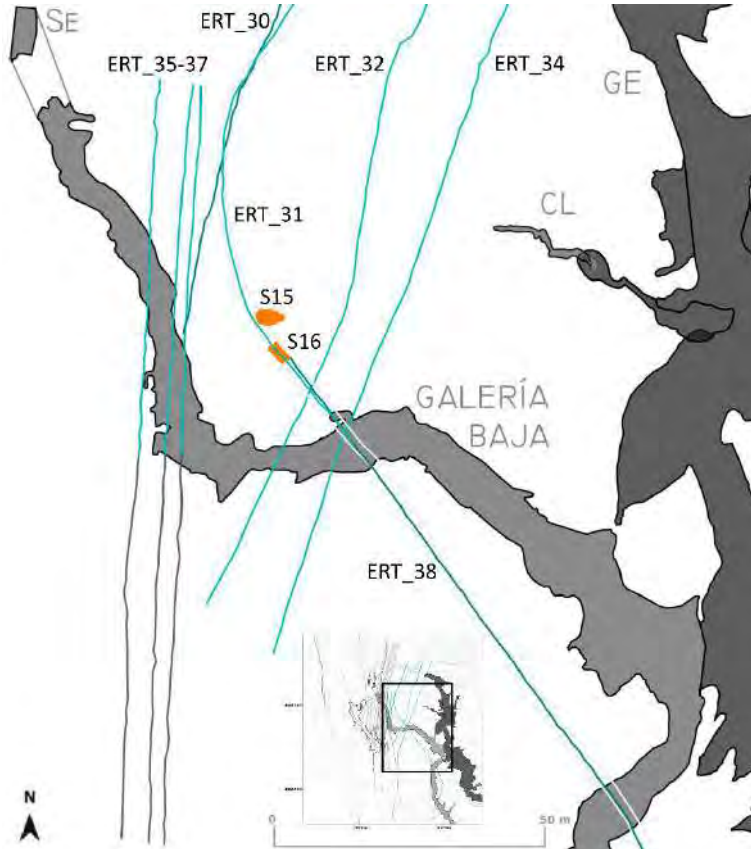


Figura 4.77. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT y los sondeos realizados en el entorno de Galería Baja, a cotas del nivel superior del karst. SE indica Sima del Elefante, GE Galería de las Estatuas y CL Conducto Lateral.

En conjunto, las anomalías conductivas SGB, que presentan unos valores de resistividad de hasta 200  $\Omega$ .m, forman una estructura de dirección NO-SE de unos 62 m de largo, una media de 8 m de ancho (excepto en el perfil ERT\_8, que la cruza de manera longitudinal) (figura 4.78) y unos 5 m de profundidad (figuras 4.79-4.86). Estas anomalías aparecen en contacto con la superficie entre los 1017 m s.n.m. y los 114 m s.n.m., es decir, siguiendo la pendiente de la ladera hacia el oeste (figura 4.65), al igual que en el caso de Galería de las Estatuas (ver apartado anterior).

Además, en todos los perfiles se aprecia que, hacia los 1010 m s.n.m., las anomalías SGB presentan un encajonamiento, tanto hacia el norte como hacia el sur (figuras 4.79-4.86). Excepto en el perfil ERT\_31, este encajonamiento se localiza próximo a las paredes de los diferentes tramos del conducto de Galería Baja, pero sólo en los perfiles ERT\_30, ERT\_35, ERT 36 y ERT 37 (figuras 4.80, 4.83, 4.84 y 4.85) puede relacionarse con los conos de entrada de sedimentos de dirección SE identificados en el interior de la cavidad (indicado con una flecha en la figura 4.78) (Ortega, 2009).



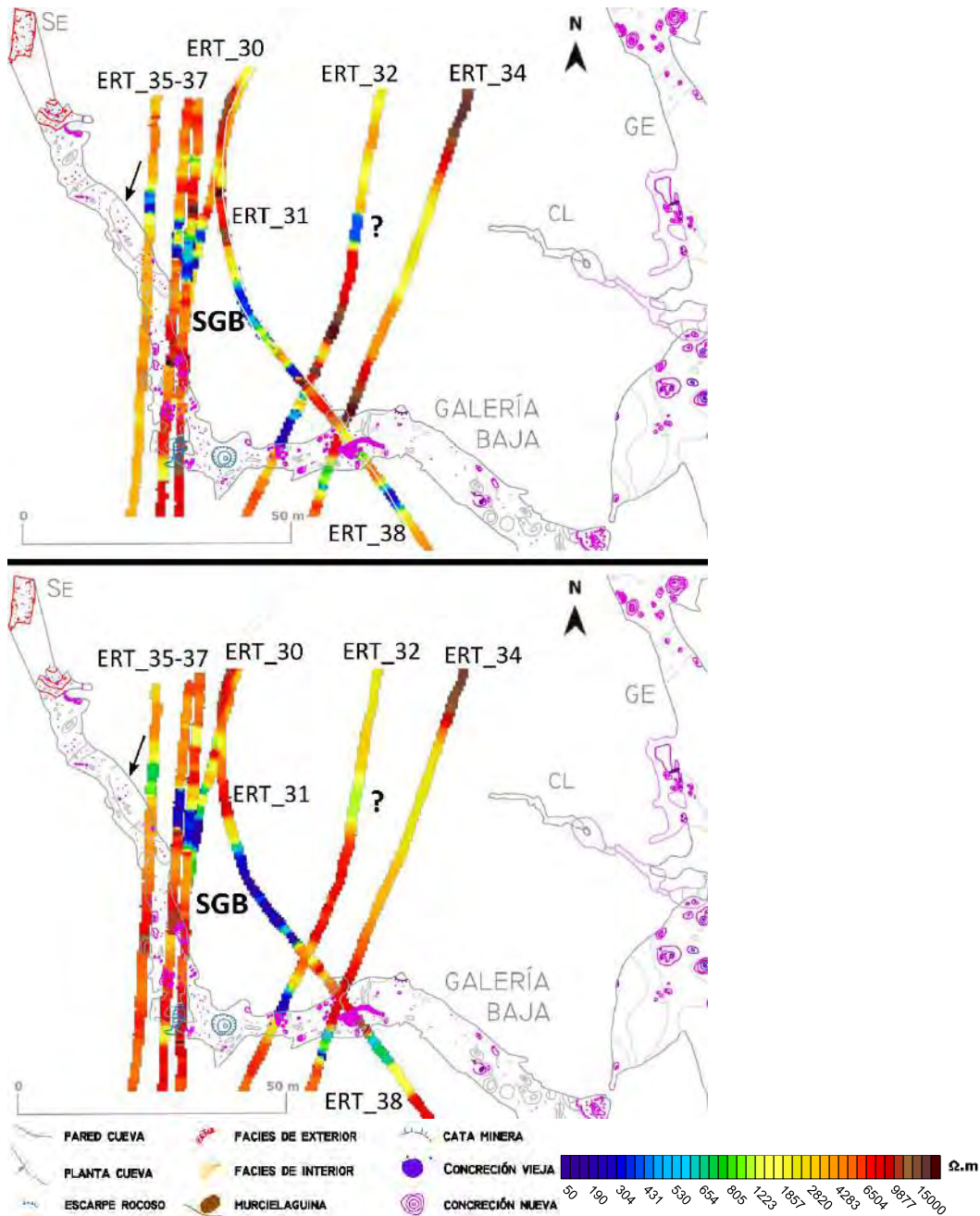


Figura 4.78. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_30-ERT\_38 en torno a los 1015 m s.n.m. y su relación con Galería Baja. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. SE indica Sima del Elefante, GE Galería de las Estatuas, CL Conducto Lateral, SGB el relleno del conducto superior a Galería Baja, ? un relleno aparentemente aislado y la flecha un cono de sedimentos.

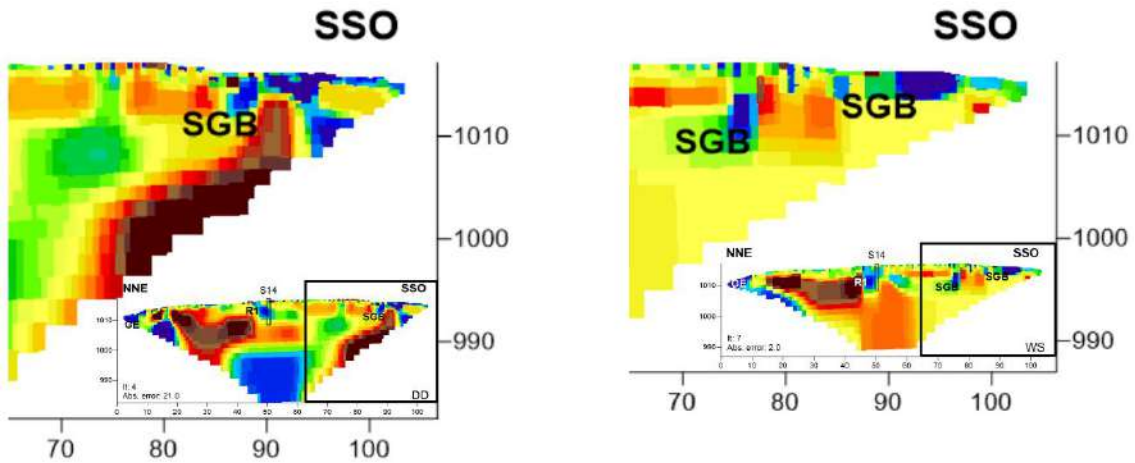


Figura 4.79. Detalle del perfil ERT\_30. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

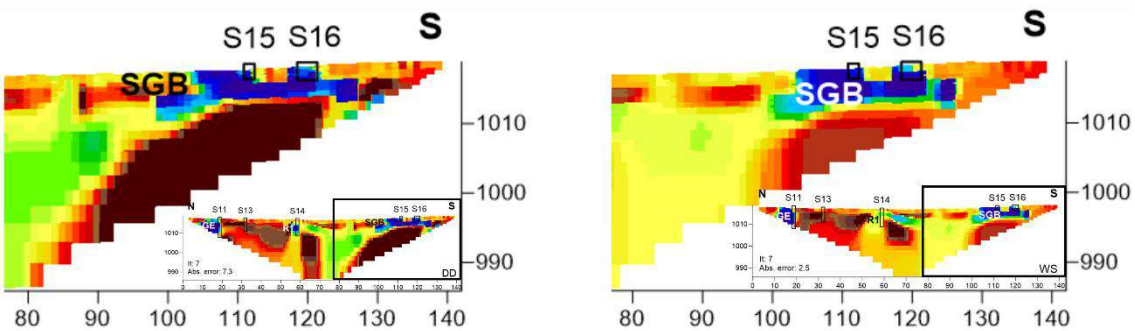


Figura 4.80. Detalle del perfil ERT\_31. El Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

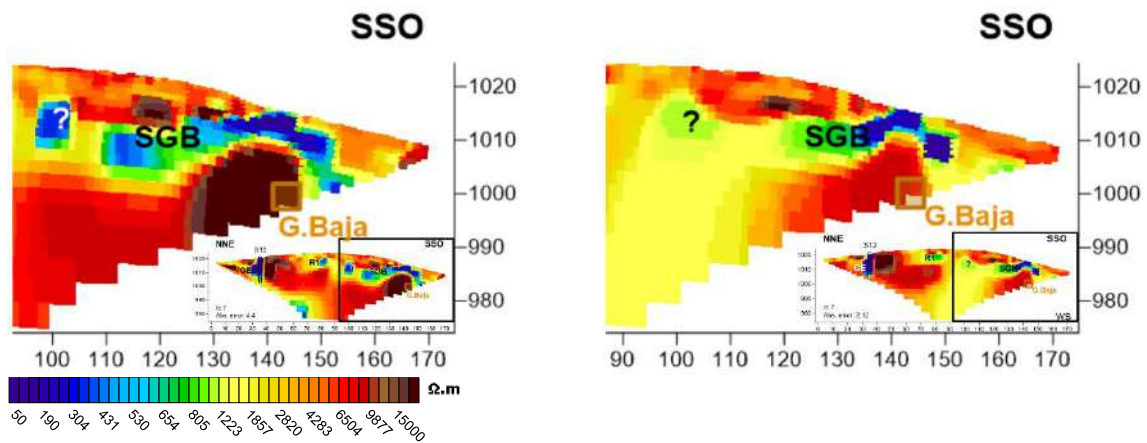


Figura 4.81. Detalle del perfil ERT\_32. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

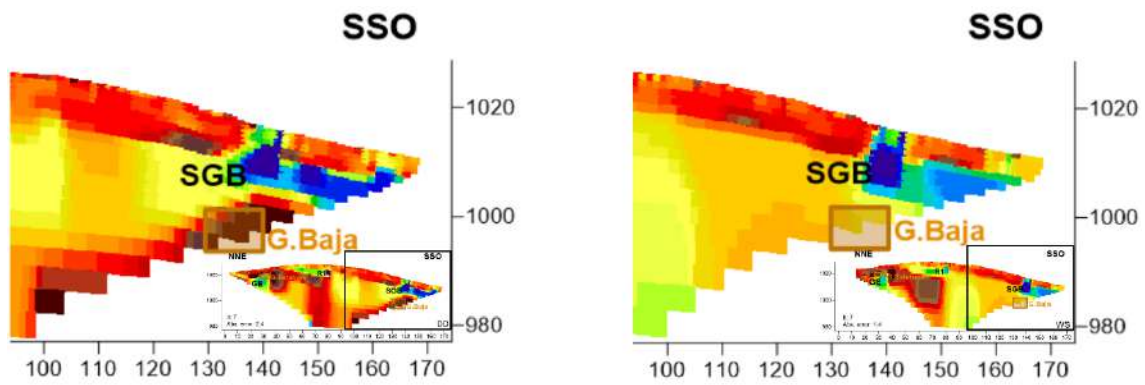


Figura 4.82. Detalle del perfil ERT\_34. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

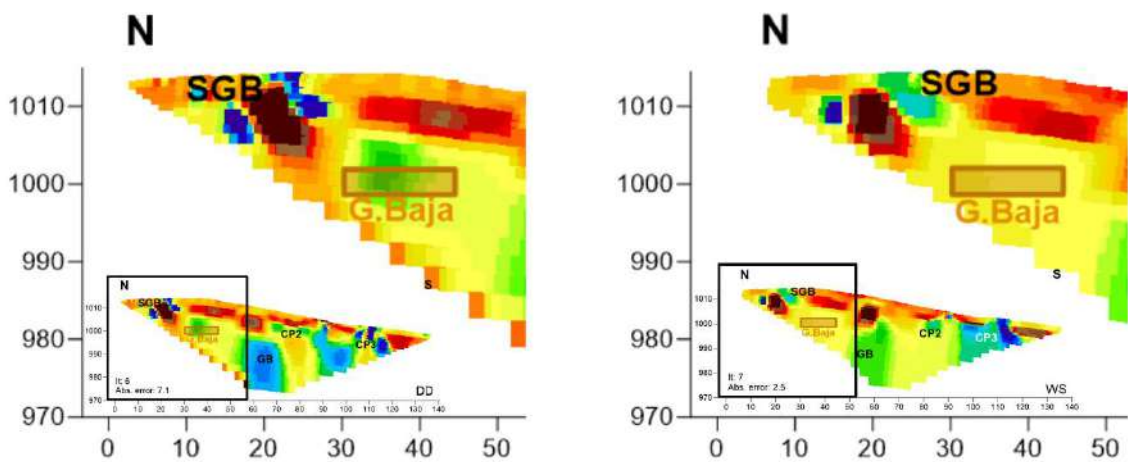


Figura 4.83. Detalle del perfil ERT\_35. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

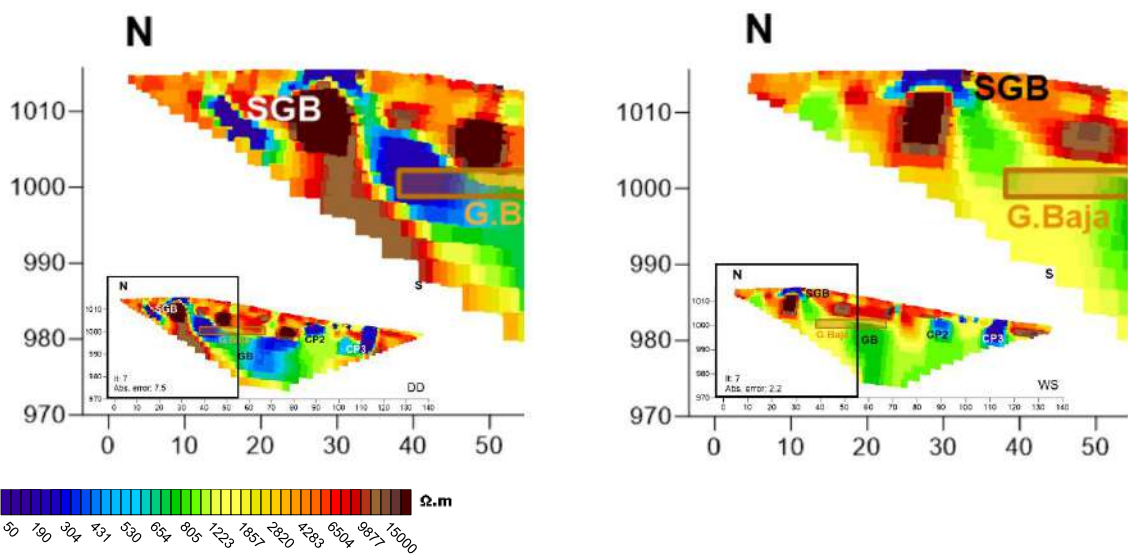


Figura 4.84. Detalle del perfil ERT\_36. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.



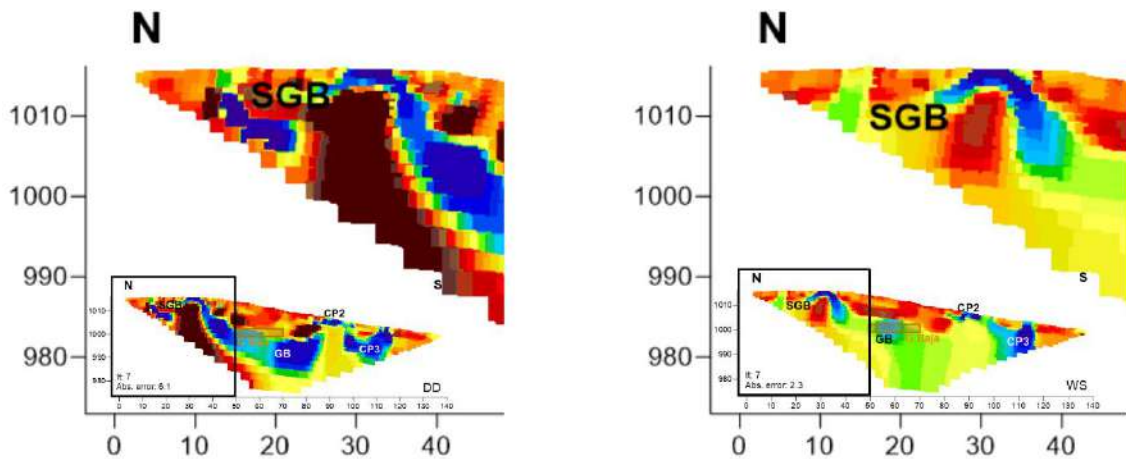


Figura 4.85. Detalle del perfil ERT\_37. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

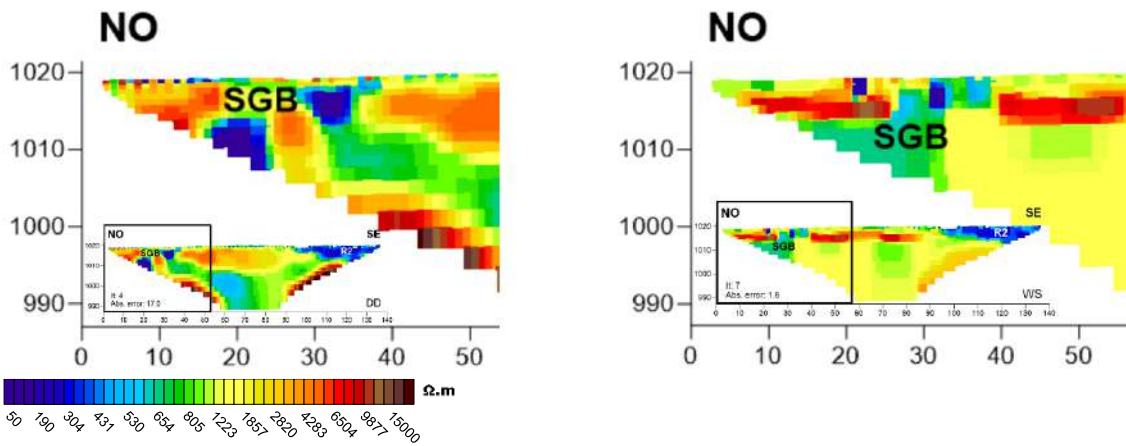


Figura 4.86. Detalle del perfil ERT\_38. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. SGB indica el relleno del conducto superior a Galería Baja. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

Los sondeos S15 y S16 (figura 4.77), realizados sobre la anomalía SGB situada al sur del perfil ERT\_31 (figura 4.80), en el camino de la Roza, revelaron al menos 50 cm de facies de exterior con cantos de caliza y una potente costra estalagmítica, seguidos de hasta 1,5 m de facies de interior (figura 4.87), que confirman que la anomalía conductiva SGB pertenece a un relleno endokárstico. Este sondeo fue realizado con pala mecánica y, por razones logísticas, no superó los 2 m de profundidad, de manera que no se ha podido comprobar la profundidad a la que se encuentra la base caliza de este relleno y, por tanto, del conducto.

Por otro lado, hacia el metro 100 del perfil ERT\_32 (figura 4.81), especialmente en el dispositivo DD, se aprecia una anomalía conductiva (indicada como ?) de unos 7 m de alto y 7 m de ancho, que se encuentra dentro del mismo rango de cotas descrito para las anomalías SGB. Sin embargo, no ha sido posible relacionar esta estructura con ninguna de las anomalías conductivas localizadas en el resto de perfiles (figura 4.78), por lo que esta anomalía (?) podría representar una fractura a favor de la que se desarrolla la karstificación, como la descrita para el relleno R1, ya que presenta unas dimensiones similares.

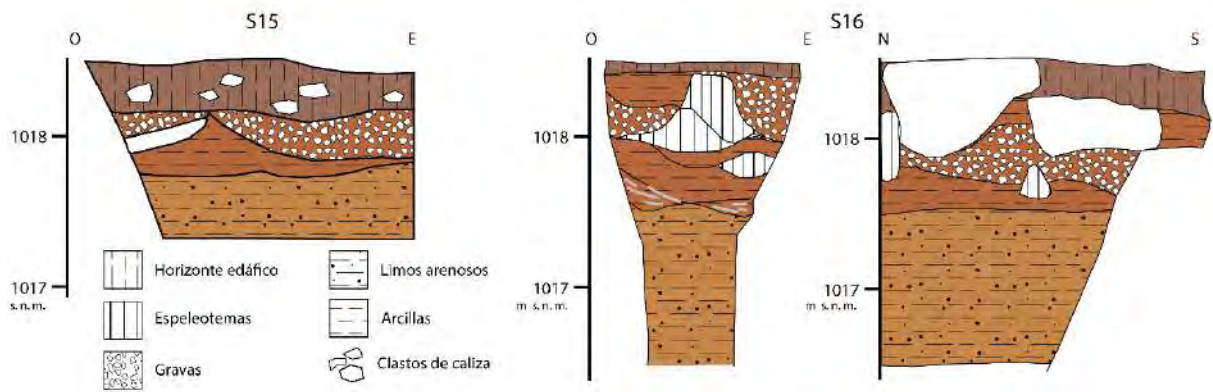


Figura 4.87. Descripción esquemática de la litología de los sondeos S15 y S16.

En lo que respecta a los valores de resistividad extremadamente altos que se recogen en estos perfiles en cotas que van desde los 1000 m s.n.m. hasta superar los 1010 m s.n.m., estos pueden relacionarse con la parte aérea conocida de Galería Baja tan sólo en los dispositivos DD de los perfiles ERT\_32 (aunque en este caso la anomalía presenta unas dimensiones muy superiores al tramo hueco conocido) y ERT\_34 (figuras 4.81 y 4.82). Las anomalías resistivas que se sitúan en el extremo norte de los perfiles paralelos ERT\_35-ERT\_37 figuras 4.83, 4.84 y 4.85) no pueden asociarse, sin embargo, a esta cavidad, que se sitúa unos 10 m al sur (figura 4.77) y a cotas del nivel intermedio del karst. Tampoco es posible relacionar los valores extremadamente resistivos de los perfiles ERT\_30 y ERT\_31 (figuras 4.79 y 4.80) con ningún hueco conocido. Así, la mayoría de estas anomalías resistivas parecen corresponder a artefactos de la inversión debidos a que se encuentran junto a valores muy conductivos o en el borde de los perfiles (ver sección 3.1.4).

Por último, hay que mencionar que, a partir de las estructuras que presentan valores de resistividad de entre 3000  $\Omega$ .m y 6000  $\Omega$ .m, es posible intuir la estratificación de la roca caliza en algunos perfiles de este sector. Así, los perfiles ERT\_30 y ERT\_31 (figuras 4.79 y 4.80) mostrarían una estratificación subhorizontal, mientras que los perfiles ERT\_32 y ERT\_34 presentarían una inclinación aparente de unos 10° hacia el SSO (figuras 4.81 y 4.82). En cualquier caso, hay que interpretar estos datos con cautela, ya que coinciden con la topografía superficial que presentan, en cada caso, los perfiles de ERT.

- Depósitos de conglomerados

El último sector estudiado en este apartado lo conforman los perfiles ERT\_38 y ERT\_39, que se desarrollan a lo largo del camino de la Roza, sobre el conducto del nivel intermedio de Galería del Silo (figura 4.88). Puesto que la anomalía conductiva identificada en estos perfiles pertenece a cotas del nivel superior del karst y no tiene relación con la Galería del Silo, hemos decidido nombrarla R2.



Figura 4.88. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT realizados a lo largo del camino de la Roza, a cotas del nivel superior del karst. El icono de la cámara indica la localización de la figura 4.92.

En conjunto, los perfiles ERT\_38 y ERT\_39 muestran una anomalía conductiva (R2) de unos 50 m de longitud (figura 4.89) que aparece en contacto con la superficie desde los 1020 m s.n.m. (figuras 4.90 y 4.91). La anomalía R2 del perfil ERT\_38, que comienza a partir del metro 94, aproximadamente, y presenta unos valores de resistividad de entre 200  $\Omega$ .m y 300  $\Omega$ .m, muestra un encajonamiento progresivo hacia el SE, que alcanza al menos 8 m de profundidad (figura 4.90). Esta anomalía continúa en los primeros 10 m del perfil ERT\_39, con unos valores de resistividad ligeramente más conductivos, de unos 150  $\Omega$ .m, y presenta asimismo una morfología escalonada (especialmente en el dispositivo WS) hacia el NNE, que apenas alcanza los 5 m de profundidad debido a que se encuentra en el extremo del perfil (figura 4.91). Así pues, el punto más profundo de la anomalía R2 se encontraría entre los perfiles ERT\_38 y ERT\_39 y alcanzaría al menos 8 m de profundidad.

Al contrario que en otros casos, esta anomalía no parece corresponder a un relleno endokárstico, sino que, por sus dimensiones, parece más bien parte de un relleno geológico. Así, es posible que la



anomalía R2 corresponda al depósito de conglomerados de clastos calizos visible en el entorno del camino de la Roza (figura 4.92), que se asemeja a los conglomerados miocenos descritos en el contiguo valle de Cueva Mayor y en el Alto del Caballo (Ortega, 2009; Benito-Calvo y Pérez González, 2015). Estos conglomerados están poco cementados (figura 4.92), lo que explicaría los valores de resistividad tan conductivos que reflejan los perfiles de ERT.

Además, hacia el metro 62 del perfil ERT\_39 (figura 4.91) se refleja otra pequeña anomalía conductiva (R3) de la que, por hallarse en el límite del perfil y lejos de otras morfologías kársticas conocidas, no se puede desprender más información.

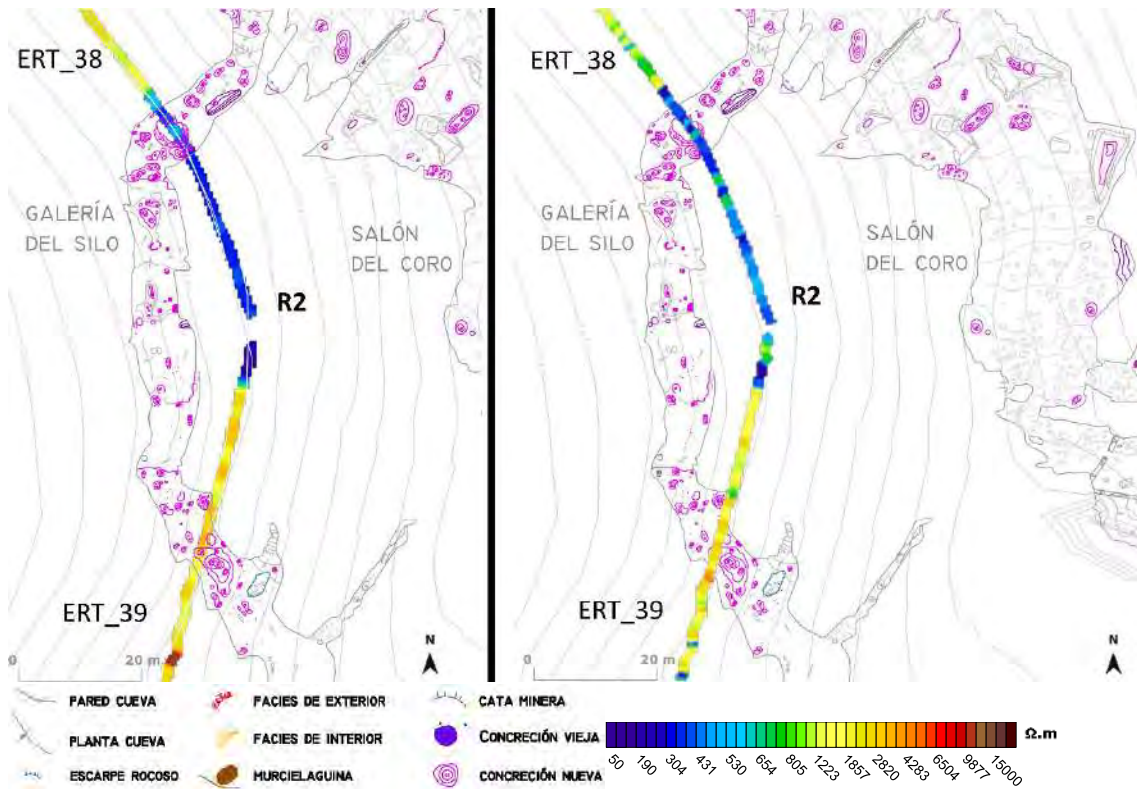


Figura 4.89. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_38 y ERT\_39 en torno a los 1017 m s.n.m. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. R2 indica el depósito de conglomerados.

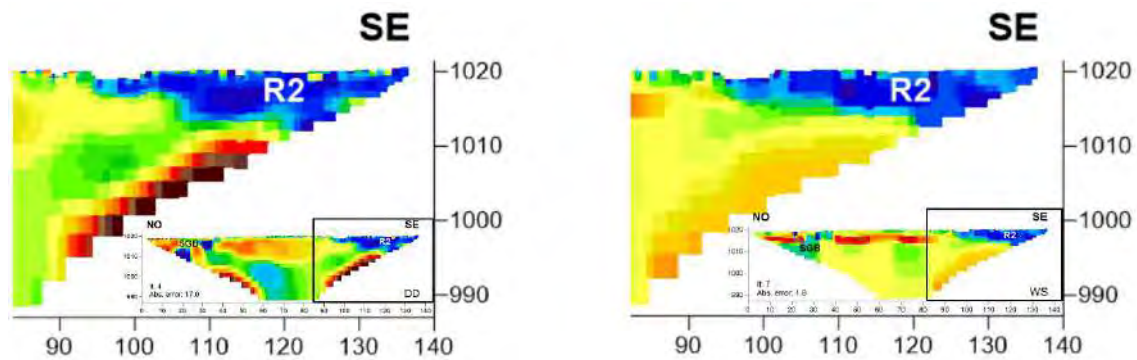


Figura 4.90. Detalle del perfil ERT\_38. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. R2 indica el depósito de conglomerados. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

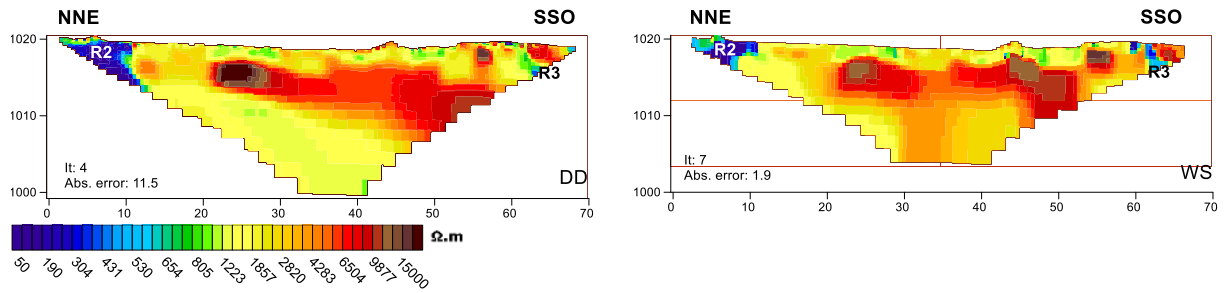


Figura 4.91. Perfil ERT\_39. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. R2 el depósito de conglomerados. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.



Figura 4.92. Conglomerados de clastos calizos parcialmente cementados visibles en la ladera, a la altura de la anomalía R2. La localización de esta imagen se indica en la figura 4.88. (Fotografía: Miguel Ángel Martín).

Por su parte, no es posible relacionar los valores de resistividad muy elevados que se encuentran hacia los metros 25 y 45 del perfil ERT\_39, a partir de los 1016 m s.n.m. (figura 4.91), con el conducto aéreo de la Galería del Silo, ya que sus bóvedas se encuentran a 1000 m s.n.m. (Ortega, 2009), es decir, en el límite inferior del perfil (Ortega, 2009). Así, estos valores muy resistivos podrían indicar un límite estratigráfico de la roca caliza. En este sentido, el perfil ERT\_39 muestra, en su parte central, un nivel superficial de base irregular de entre 900  $\Omega \cdot m$  y 1500  $\Omega \cdot m$  y hasta 3 m de profundidad (figura 4.91), que podría indicar la presencia de un estrato superficial de caliza meteorizada tipo lapiaz, propio de la Sierra de Atapuerca.

#### 4.1.2.1.3.2 Nivel intermedio

Los perfiles de ERT que abarcan el nivel intermedio del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo se sitúan en torno a Galería Baja, Cueva Peluda y la Campa del Silo (figura 4.93). En conjunto, estos perfiles definen varios sectores que incluyen el yacimiento de Sima del Elefante, Galería Baja, la parte más oriental de Cueva Peluda y el contacto entre calizas y margas situado en la Campa del Silo.

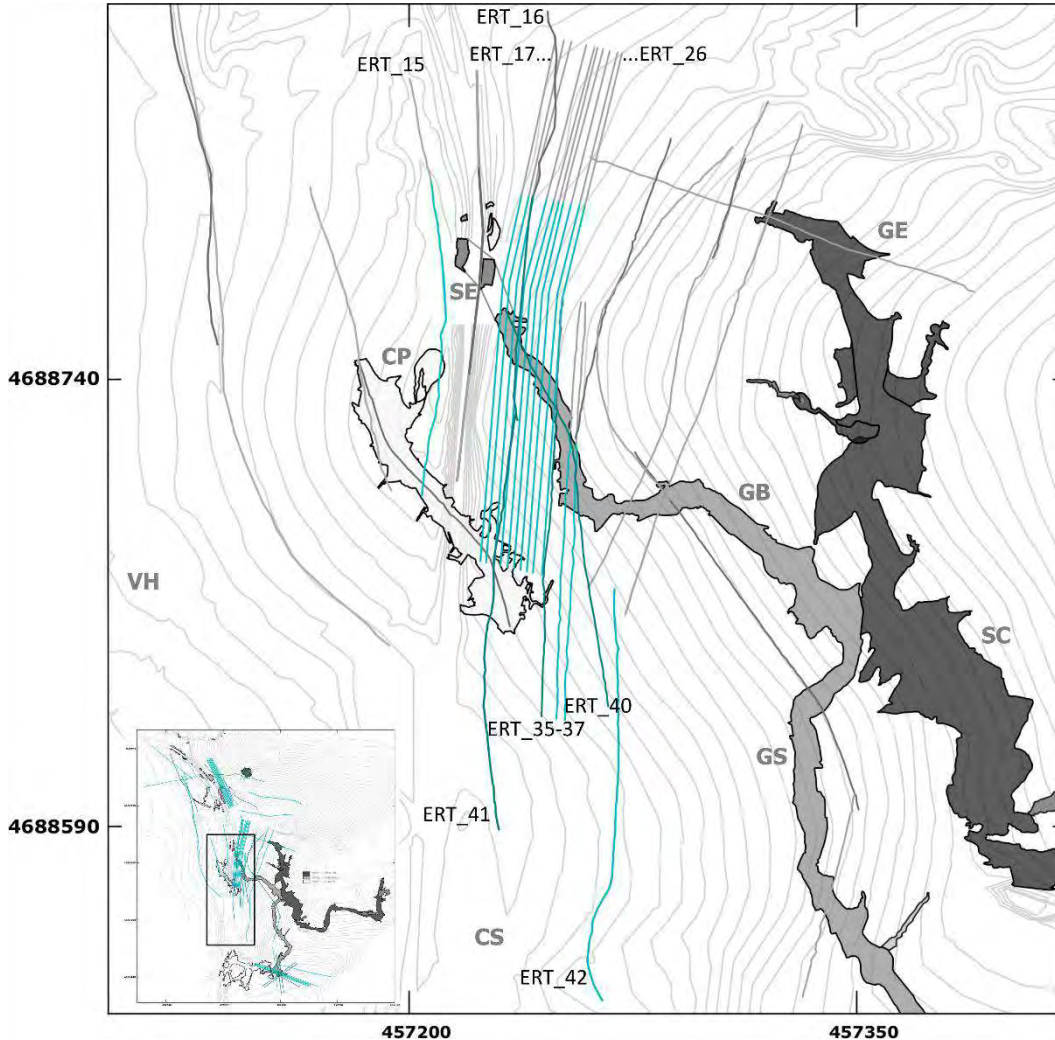


Figura 4.93. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre nivel intermedio del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.

- Sima de Elefante

La continuación hacia el oeste del yacimiento de Sima del Elefante está definida por el perfil ERT\_15, que muestra dos anomalías conductivas contiguas (SE, acrónimo de Sima del Elefante, y SE1) (figura 4.94). La anomalía SE, que presenta unos valores de resistividad de unos 250  $\Omega$ .m en el dispositivo DD y unos 450  $\Omega$ .m en el WS, coincide con la longitud (unos 10 m) y la localización de la sección TR4 (que constituye el frente occidental de la Sima del Elefante), por lo que podría representar la continuidad de los rellenos visibles en esta sección (figura 4.95). La profundidad de esta anomalía SE resulta difícil de definir, ya que el dispositivo DD presenta un error elevado que desaconseja interpretar su parte inferior y el dispositivo WS muestra un relleno verticalizado cuya profundidad resulta geológicamente inverosímil.



Por su parte, la anomalía SE1, de unos 20 m de longitud y 6 de profundidad, muestra unos valores mucho más conductivos, de unos 50  $\Omega.m$  (figura 4.94), que, en la Sierra de Atapuerca, hemos atribuido a sedimentos margosos. Así, esta anomalía, cuya base se sitúa a unos 996 m s.n.m., podría corresponder a un depósito de margas aislado o a parte de un conducto que haya sido rellenado con margas, como sucede en el nivel TE15 de Sima del Elefante (figura 1.X), que se sitúa a cotas parecidas (Rosas et al., 2001; Arnold et al., 2014).

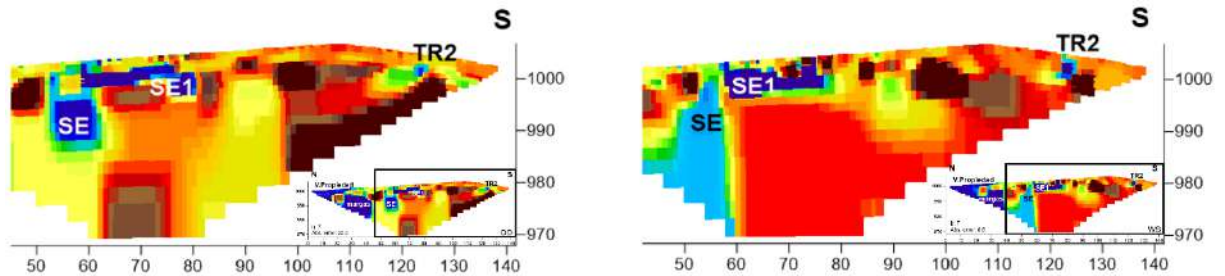


Figura 4.94. Detalle del perfil ERT\_15. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

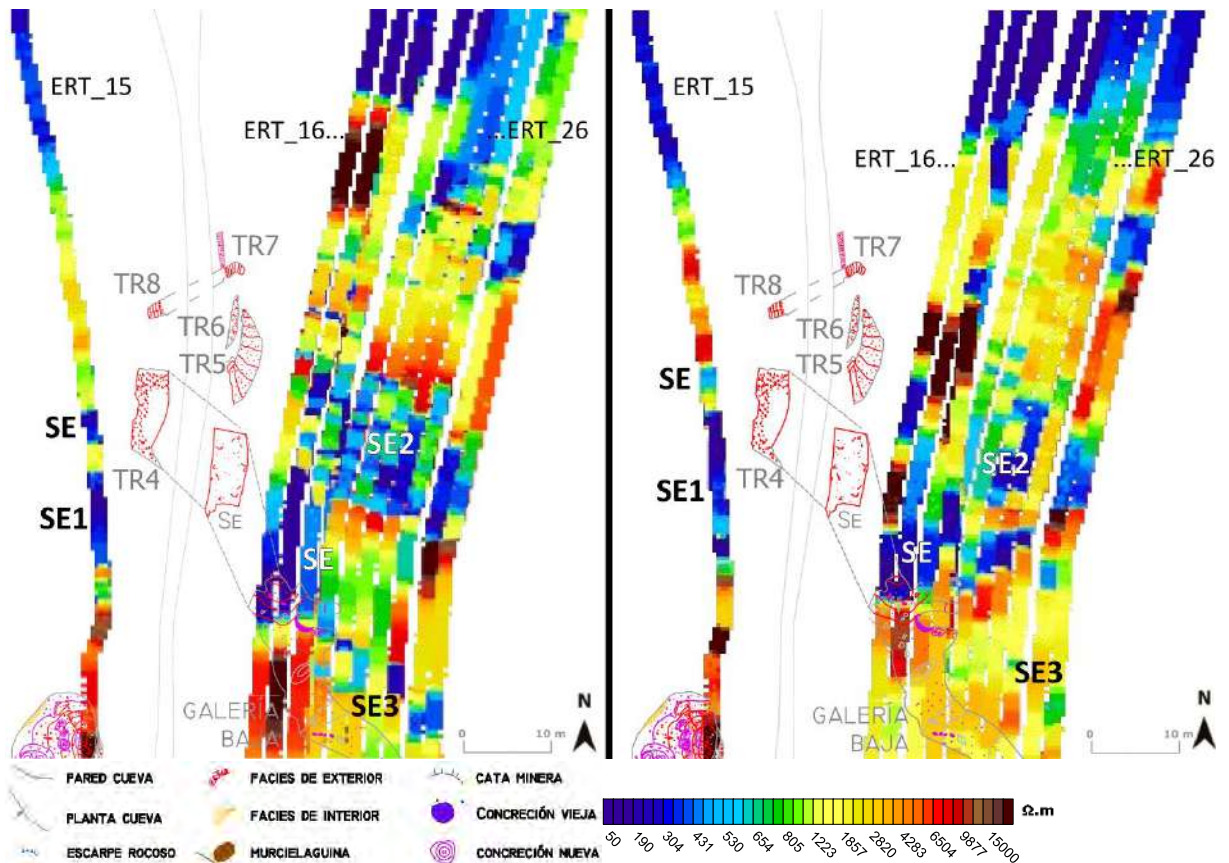


Figura 4.95. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_15, ERT\_16 y los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 en torno a los 1000 m s.n.m. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS.

Resulta complicado definir el desarrollo del yacimiento de Sima del Elefante hacia el este y su conexión con Galería Baja en el perfil ERT\_16 y en los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26. Estos perfiles muestran, hacia el metro 90 (o hacia el metro 100 en el perfil ERT-16), una anomalía (SE) que puede asociarse al conducto colmatado de sedimentos de Sima del Elefante y que disminuye de anchura hacia el este, desde los 15 m del perfil ERT\_17 hasta los 5 m de longitud del perfil ERT\_26 (figuras 4.96 y 4.97). Si bien estas anomalías varían de un perfil a otro, parece que la base de este relleno podría situarse dentro de los límites de los perfiles, a unos 990 m s.n.m.

Teniendo en cuenta la relación espacial entre las anomalías SE de los perfiles ERT\_16-ERT\_21, en los que esta estructura es más evidente, la conexión entre la Sima de Elefante y Galería Baja formaría un quiebro de unos 90° (figura 4.95), como sucede, por ejemplo, en Galería de las Estatuas (figura 4.93). En este sentido, las anomalías SE visibles en los perfiles ERT\_22-ERT\_24 (figura 4.97), de dimensiones significativamente menores a las anteriores, y que se encuentran fuera los límites de las paredes de Galería Baja (figura 4.95), podrían reflejar la proximidad de estos sedimentos, o la existencia de un conducto lateral.

De la misma manera, las anomalías conductivas SE2 que se muestran en contacto con la superficie en los perfiles ERT-18-ERT\_26 parecen estar en conexión con la anomalía SE (figura 4.97). Estas anomalías SE2, que muestran unos 15 m de longitud y 5 m de profundidad (figura 4.97), presentan, en conjunto, una dirección ONO-ESE, similar a la de las paredes del sector Sima del Elefante-TR4 (figura 4.95). Así, esta anomalía podría representar una dolina o torca que diera acceso lateral a la Sima del Elefante.

Finalmente, en los perfiles ERT\_24-ERT\_26 se aprecia otra serie de anomalías conductivas (SE3), de menor tamaño (figura 4.97), que podrían indicar la existencia de un relleno adicional relacionado con la anomalía SGB (ver apartado 4.1.2.1.3.1). Estas anomalías SE3, indicarían la presencia de un conducto de dirección NO-SE que confluiría con la anomalía SE a partir del perfil ERT\_23 (figura 4.95).

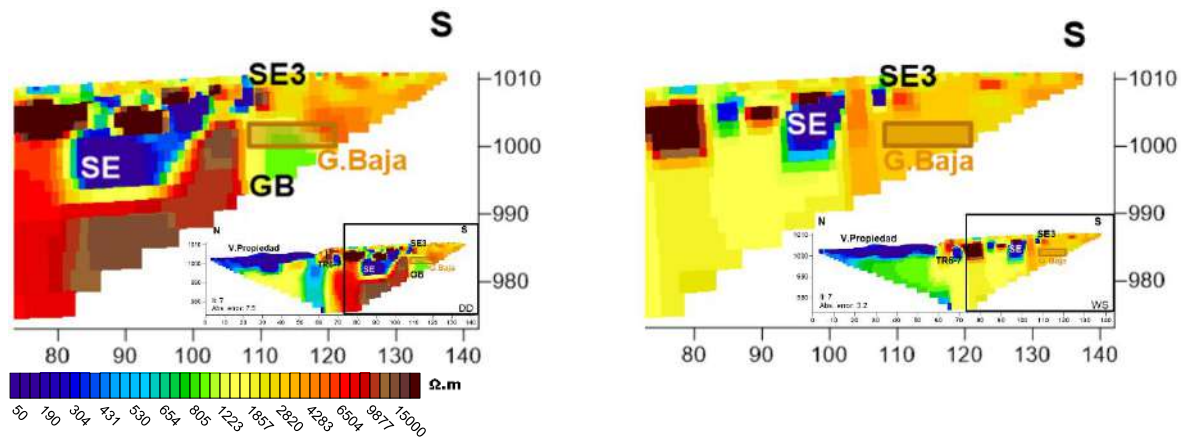


Figura 4.96. Detalle del perfil ERT\_16 Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.



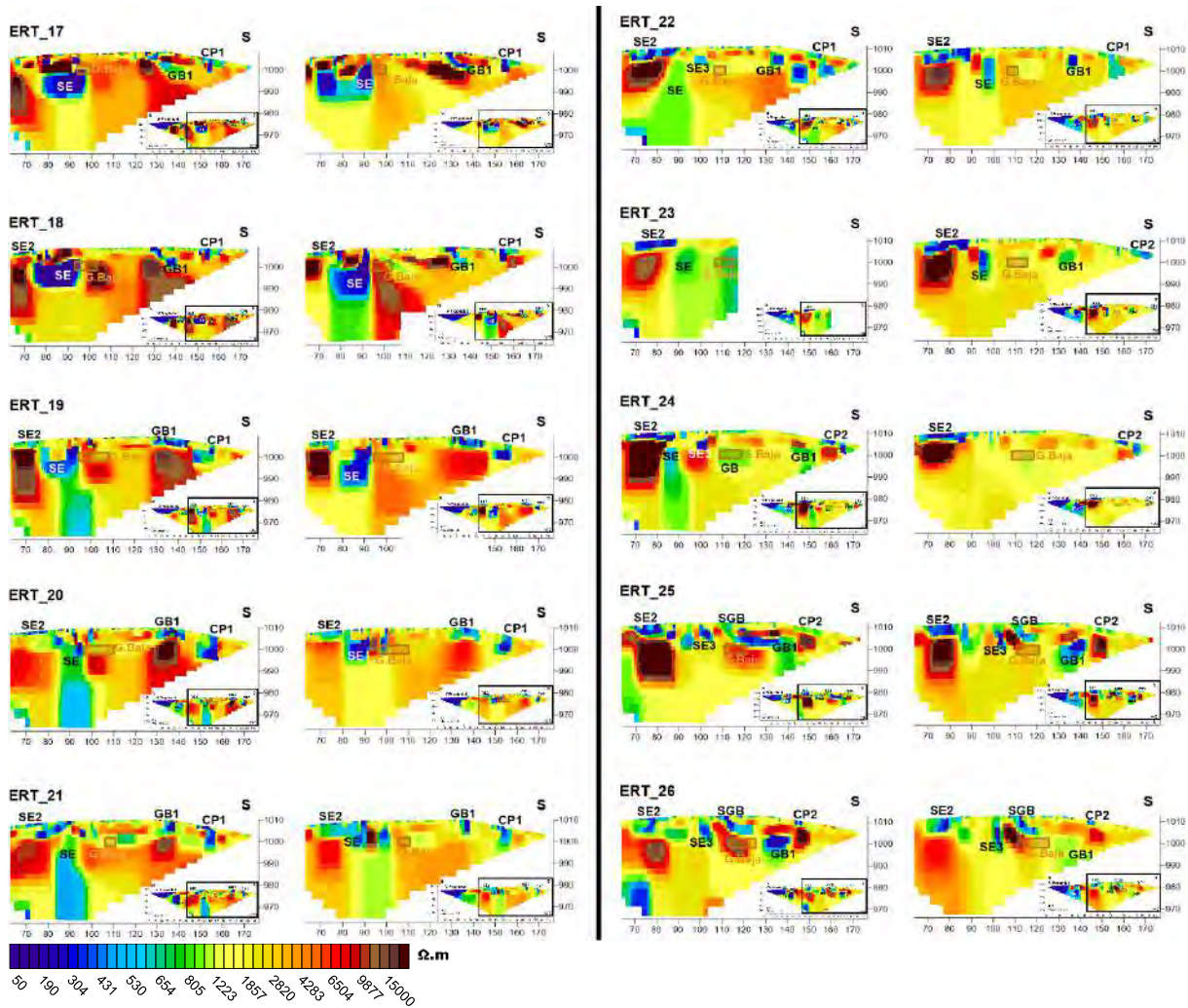


Figura 4.97. Detalle de los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. Los perfiles completos se pueden consultar en el anexo II.

- Galería Baja

La potencia del relleno sedimentario de Galería Baja (GB) resulta, asimismo, complicada de definir. De los perfiles que cruzan el sector más occidental de este conducto (figura 4.93), únicamente los perfiles ERT\_16 y ERT\_24, y sólo en el dispositivo DD, reflejan sendas anomalías conductivas (GB) que coinciden con el tramo aéreo de este conducto (figuras 4.96 y 4.97) y que podrían, por lo tanto, representar su relleno. Ambas anomalías GB, presentan unos valores de resistividad (de unos 800  $\Omega.m$ ) y una potencia (de unos 6 m) parecidas, lo que ratificaría la interpretación de la anomalía GB del perfil ERT\_16, a pesar de que ésta se encuentre en un extremo del perfil (figura 4.96). Así, podríamos considerar que la base del relleno sedimentario de Galería Baja se sitúa en este tramo a unos 995 m s.n.m.

Por su parte, los perfiles paralelos ERT\_35-ERT\_37 y el perfil ERT\_40 aportan información acerca del relleno sedimentario del tramo en el que el conducto de Galería Baja hace un giro de 90° (figura 4.93). Estos perfiles presentan unas anomalías conductivas GB que coinciden mayoritariamente con el tramo aéreo del conducto que cruza el perfil, si bien en el dispositivo DD las anomalías se prolongan más de 10 m hacia el sur de la sección de la cueva (figura 4.98). Además, la mayoría de estas anomalías GB se reflejan a partir de los 1000 m s.n.m. (figuras 4.99-4.102), lo que coincide con la profundidad media a la que se documentan las bóvedas de este conducto (Ortega, 2009).

En general, estas anomalías GB muestran diferencias entre los dispositivos DD y WS. Así, mientras que en el dispositivo DD estas anomalías presentan un mayor desarrollo, mostrando una conexión con el conducto del nivel superior SGB (ver apartado 4.1.2.1.3.1), y reflejan unos valores de resistividad más conductivos; en el dispositivo WS las anomalías GB están mejor definidas, la conexión con SGB no es evidente y la resistividad de estas anomalías, que presenta unos valores de entre 600  $\Omega$ .m y 750  $\Omega$ .m, constituiría el valor más resistivo de rellenos endokársticos descrito en la Sierra de Atapuerca (figuras 4.99-4.102). De igual manera, hay ciertas diferencias entre los dos dispositivos en cuanto a la profundidad a la que se encuentra la base de este relleno, aunque en la mayor parte de los casos alcanza el extremo inferior del perfil. Tan sólo en el perfil ERT\_37 WS se intuye que la base de este relleno podría situarse hacia los 994 m s.n.m. (figura 4.101), lo que resulta coherente con las anomalías GB descritas en los perfiles ERT\_16 y ERT\_24 (figuras 4.96 y 4.97).

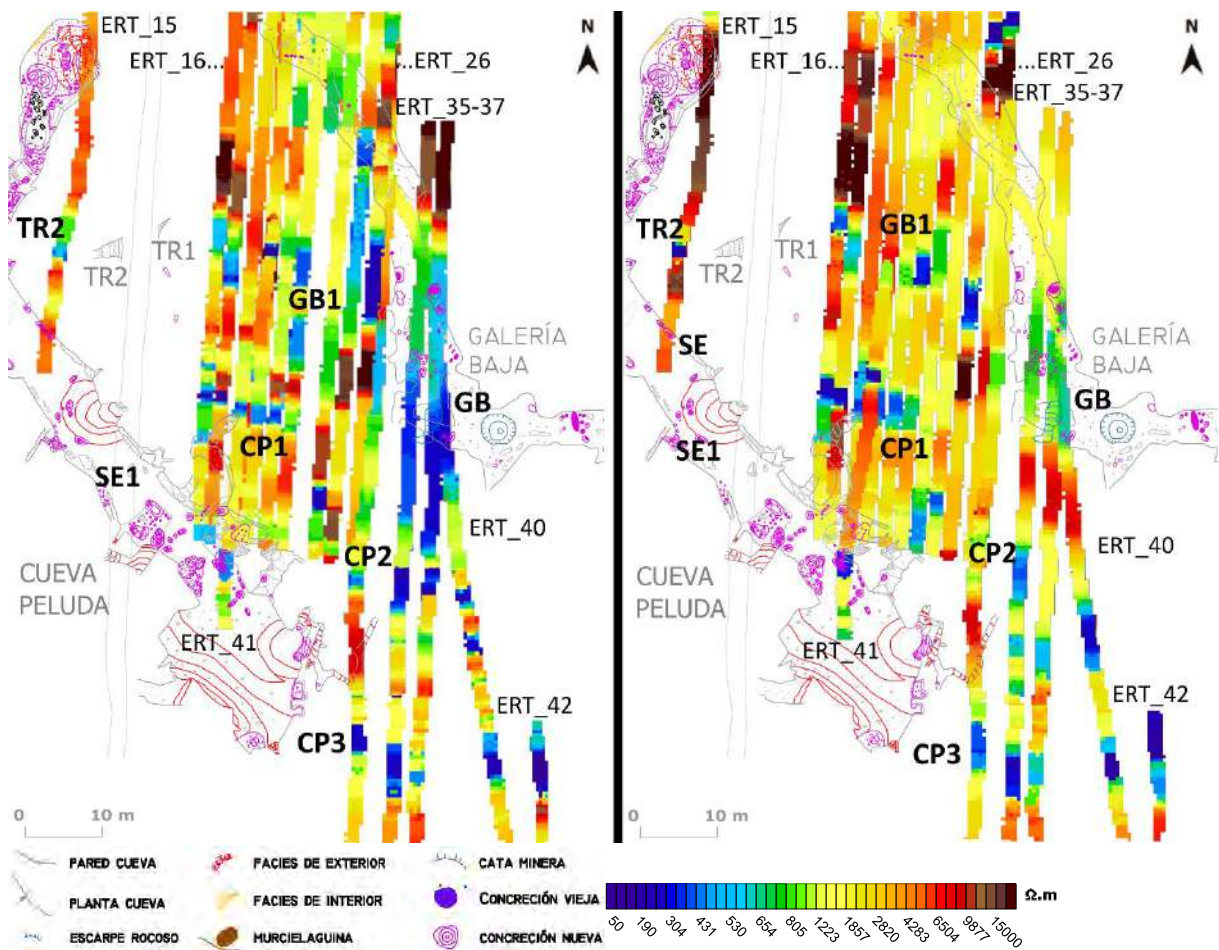


Figura 4.98. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_15, ERT\_16, los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 y ERT\_35-ERT\_37, y los perfiles ERT\_40, ERT\_41 y ERT\_42 en torno a los 1000 m s.n.m. y su relación con Galería Baja y Cueva Peluda. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS.

Además del relleno asociado al conducto principal de Galería Baja, los perfiles realizados en esta área recogen otra serie de anomalías conductivas cuya distribución espacial revela la existencia de otros posibles conductos colmatados de sedimentos.

Así, los perfiles paralelos ERT\_17-ERT\_26 y el perfil ERT\_41 muestran una serie de anomalías conductivas (GB1) de unos 10 m de anchura y 5 m de potencia (figuras 4.97 y 4.103) que, en conjunto, conforman una estructura de unos 20 m de longitud de dirección NO-SE, que se desarrolla paralela al conducto de Galería Baja, y que podría confluir con la sección TR1 a la altura de la trinchera del ferrocarril (figura 4.98). Además, en los perfiles ERT\_19-ERT\_21 las anomalías GB1 se muestran en

contacto con la superficie, lo que indicaría la existencia de una dolina o entrada a este posible conducto (figura 4.97). En cualquier caso, las cotas a las que se sitúa la base de este posible conducto difieren de un perfil a otro, desde los 1005 m s.n.m. del perfil ERT\_20 hasta los 999 m s.n.m. del perfil ERT\_26 (figura 4.97), por lo que estas interpretaciones han ser tomadas con cautela.

Por otra parte, en el perfil ERT\_15 se recoge una pequeña anomalía conductiva cerrada que, por dimensiones y localización, podría corresponder con el relleno de TR2 (figuras 4.94 y 4.98).

- Accesos a Cueva Peluda

Por otro lado, se han identificado tres posibles conductos (CP1, CP2, CP3), o tramos de conductos, colmatados de sedimentos que se sitúan a cotas propias del nivel intermedio del karst y que están espacialmente asociados a diferentes entradas de Cueva Peluda.

Las anomalías CP1, que se observan en los perfiles ERT\_17-ERT\_22, muestran una serie de cuerpos conductivos de unos 5 m de longitud y 8 m de profundidad (figura 4.97) que aparecen en contacto con la superficie conformando una estructura de dirección E-O. Esta anomalía CP1 se sitúa sobre un pasaje lateral de Cueva Peluda (figura 4.98) que finaliza en una chimenea ascendente (Ortega, 2009), y que podría relacionarse con esta posible entrada.

Algo parecido sucede con las anomalías conductivas CP2, que aparecen en contacto con la superficie en los perfiles ERT\_23-ERT\_26 (figura 4.97), a la altura de un pasaje que se sitúa unos 15 m más al sur que CP1 (figura 4.98). Estas anomalías CP2, que presentan, en conjunto, una dirección E-W, continúan hacia el E bajo unos 4 m de valores asociados a la roca caliza, mostrando una morfología cerrada de unos 8 m de longitud y 5 m de profundidad, tal y como se refleja en los perfiles ERT\_35 y ERT\_36 (figuras 4.99 y 4.100). Las anomalías CP2 vuelven a mostrarse en contacto con la superficie en los perfiles ERT\_37 y ERT\_40 (figuras 4.101 y 4.102), a unos 1002 m s.n.m., por lo que podrían constituir la entrada de sedimentos del pequeño pasaje ascendente que se desarrolla en la margen este de la sala de entrada de Cueva Peluda y cuyo último tramo se encuentra colmatado por sedimentos terrígenos (figura 4.98).

Por último, las anomalías CP3, visibles en los perfiles paralelos ERT\_35-ERT-37 y en los perfiles ERT\_40 y ERT\_42, definen, en conjunto, una estructura conductiva de al menos 30 m de longitud (figura 4.98), que se muestra en contacto con la superficie desde los 1006 m s.n.m. del perfil ERT\_40 hasta los 1002 m s.n.m. del perfil ERT\_35, y cuya base parece encontrarse por debajo del límite inferior de estos perfiles (figuras 4.99-4.102 y 4.104). Tan sólo el perfil ERT\_40 sugiere que su base, o una parte de su base, podría situarse a unos 994 m s.n.m. (figura 4.102). Por dimensiones y proximidad, la anomalía CP3 podría suponer la continuación hacia el este de la Galería Principal de Cueva Peluda, así como el origen de los sedimentos terrígenos que se encuentran en el conducto ascendente situado en el extremo SE de esta cavidad (figura 4.98).

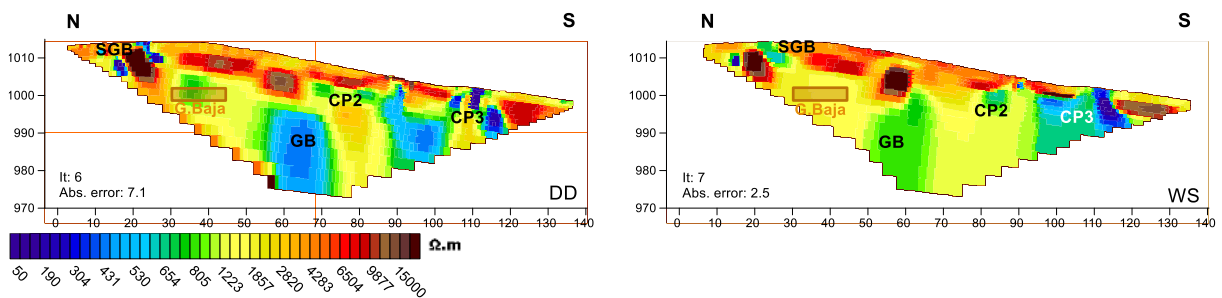


Figura 4.99. Perfil ERT\_35 Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.



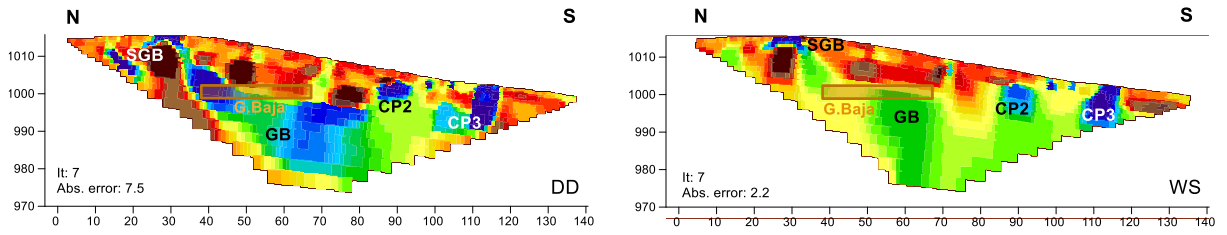


Figura 4.100. Perfil ERT\_36. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.

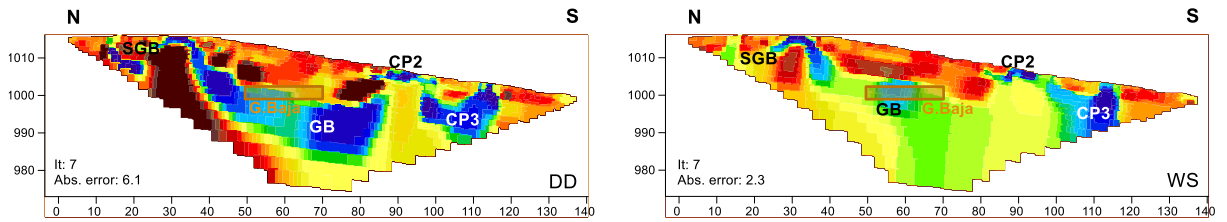


Figura 4.101. Perfil ERT\_37. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.

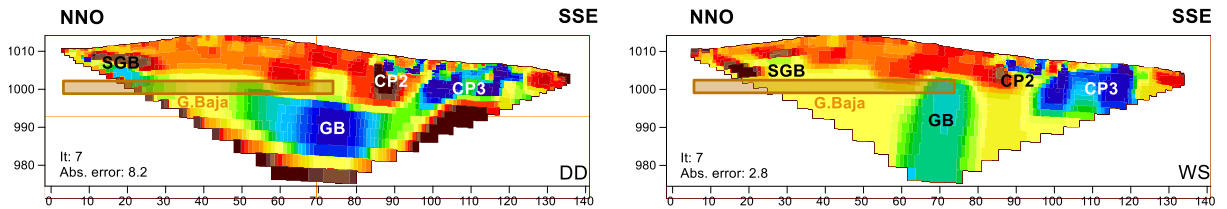


Figura 4.102. Perfil ERT\_40. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.

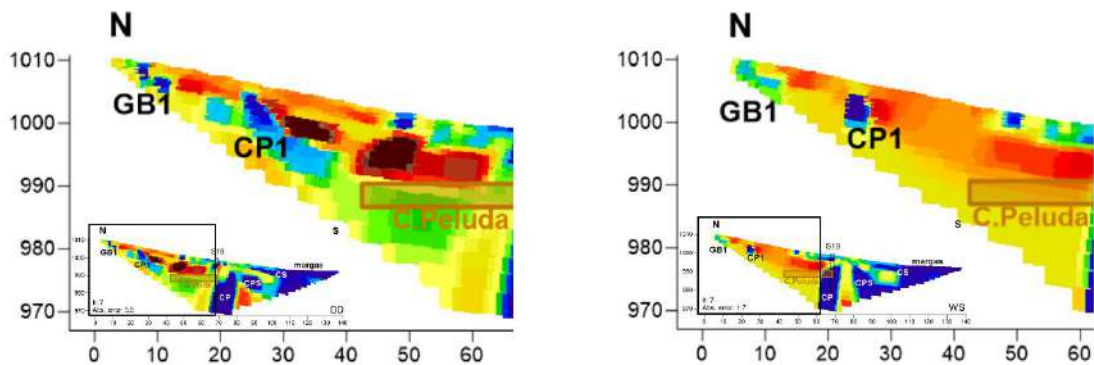


Figura 4.103. Detalle del perfil ERT\_41. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

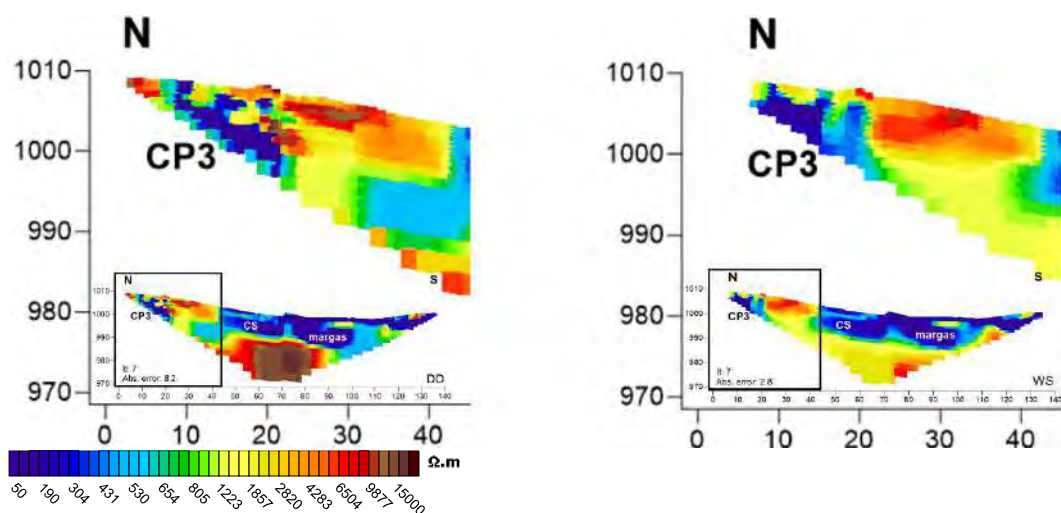


Figura 4.104. Detalle del perfil ERT\_42 Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.

- Campa del Silo

Los perfiles ERT\_41 y ERT\_42, que se sitúan sobre la explanada denominada Campa del Silo (figura 4.93), definen uno de los contactos de borde entre margas miocenas y calizas cretácicas de la Sierra de Atapuerca. Con el fin de poder diferenciar entre los valores de resistividad asociados a las margas y los relacionados con los rellenos de sedimentos terrígenos, estos perfiles se presentan a continuación con la escala de valores de baja resistividad, como ya ha sucedido en otros apartados. Los perfiles con esta escala se pueden consultar en el anexo II.2.

Tanto el perfil ERT\_41 como el perfil ERT\_42 recogen dos anomalías conductivas contiguas que se muestran en contacto con la superficie. La más septentrional de las dos, CS (acrónimo de Campa del Silo), presenta unos valores de resistividad de unos 150-250  $\Omega.m$  que pueden corresponder a un relleno de sedimentos terrígenos, y la más meridional recoge valores inferiores a 50  $\Omega.m$ , que pueden asociarse a los depósitos de margas (figuras 4.105 y 4.106).

El perfil ERT\_42 define los límites norte y sur de la anomalía CS, que se sitúa entre los metros 45 y 70, aproximadamente, así como su base, que se refleja a unos 990 m s.n.m. (figura 4.106). Tomando como referencia esta profundidad, la anomalía CS correspondiente en el perfil ERT\_41 se situaría entre los metros 85 y 105 y alcanzaría unos 4 m de profundidad (figura 4.105). Especialmente, el límite de estas dos anomalías coincide en el norte, mientras que se sitúa unos 10 m más al sur en el perfil ERT\_42, lo que sugiere que esta estructura podría presentar una dirección NO-SE (figura 4.107).

Los valores de resistividad muy conductivos adyacentes a las anomalías CS pueden corresponder a las margas miocenas, cuyo contacto con las calizas cretácicas ha sido descrito en esta zona (Benito-Calvo, 2004; Benito-Calvo y Pérez González, 2015). Además, se ha descrito la presencia de margas retrabajadas relleno las entradas más septentrionales de Cueva Peluda (Ortega, 2009), algo parecido a lo que puede suceder hacia el metro 70 del perfil ERT\_42, en el que los sedimentos margosos parecen introducirse en la estructura definida por la anomalía CS (figura 4.106). Resulta complicado definir el resto de este depósito, que, tanto en el perfil ERT\_41, como a partir del metro 90 del perfil ERT\_42 (figuras 4.105 y 4.106), muestra estructuras de diferentes resistividades distribuidas de forma heterogénea. En este sentido, estas variaciones podrían ser el resultado de alteraciones de origen antrópico, causadas por la vecina cantera del Silo.



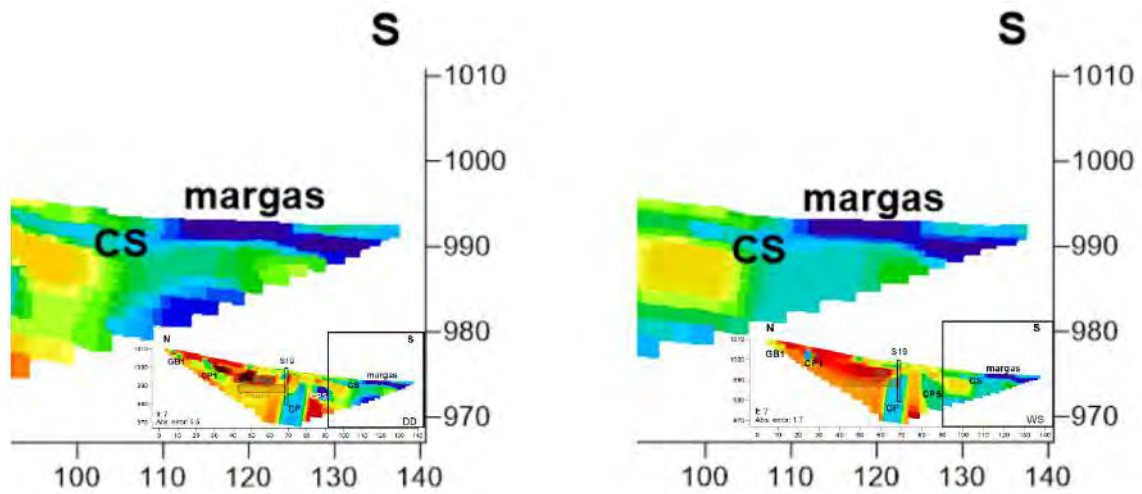


Figura 4.105. Detalle del perfil ERT\_41. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

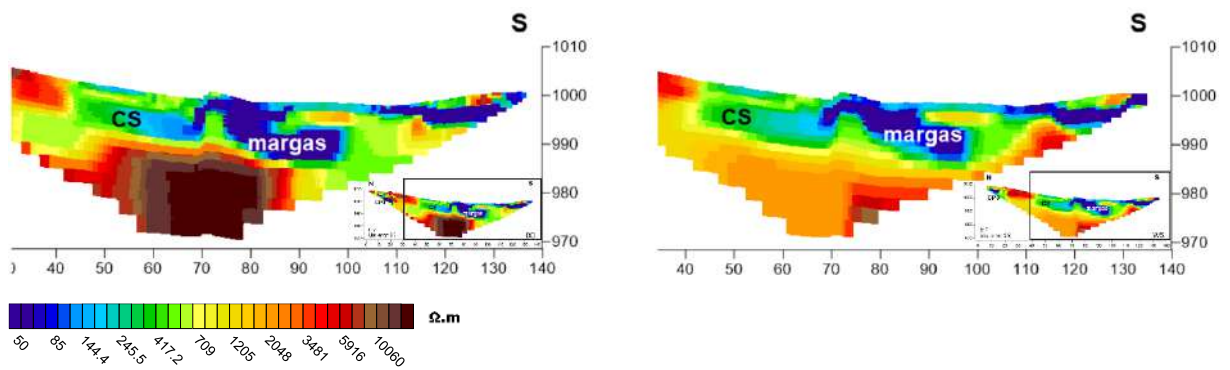


Figura 4.106. Detalle del perfil ERT\_42. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

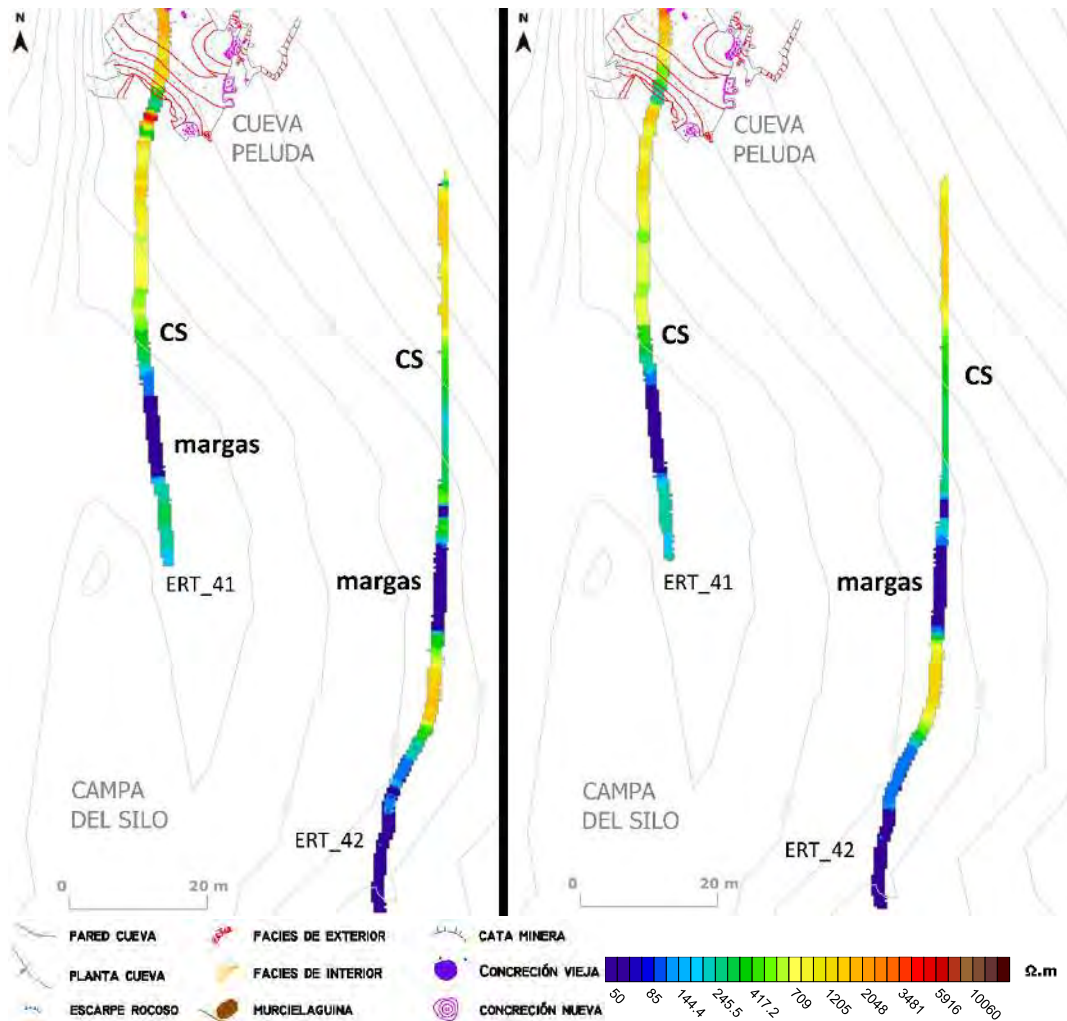


Figura 4.107. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_41 y ERT\_42 en torno a los 995 m s.n.m. y su relación con Cueva Peluda y la Campa del Silo. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS.

- Otras anomalías

En cuanto a los valores altamente resistivos presentes en los perfiles del nivel intermedio del sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo, sólo podemos indicar una relación con los tramos aéreos de las cavidades de Galería Baja y Cueva Peluda en los perfiles ERT\_36 y ERT\_37, y ERT\_41 (figuras 4.100, 4.101 y 4.103), respectivamente. En estos perfiles las anomalías más resistivas coinciden, *grosso modo*, con la longitud de la cavidad, aunque se sitúan en todos los casos por encima del tramo aéreo conocido.

En el resto de perfiles las anomalías resistivas se sitúan al lado o bajo anomalías conductivas, por lo que no resulta geológicamente verosímil que puedan corresponder a tramos huecos de cavidades. Así, hemos de asumir que estas anomalías corresponden a artefactos del proceso de inversión.

Finalmente, con respecto a la estratificación de la roca caliza, los perfiles paralelos ERT\_35-ERT\_37 (figuras 4.100-4.101) y los perfiles de ERT\_41 y ERT\_42 (figuras 4.103 y 4.104), todos con un trazado de dirección N-S (figura 4.93), muestran una serie de estructuras con valores de resistividad de entre 1000  $\Omega.m$  y 6000  $\Omega.m$  que presentan una pendiente aparente de unos  $9^\circ$  hacia el S; mientras que el perfil ERT\_40 (figura 4.102), de dirección NNO-SSE (figura 4.93), presenta una pendiente aparente subhorizontal. Sin embargo, estos posibles cambios litológicos muestran una pendiente prácticamente paralela a la topografía de la superficie del perfil, por lo que esta interpretación ha de ser tomada con cautela.

#### 4.1.2.1.3.3 Nivel inferior

Los perfiles de ERT que comprenden el nivel inferior del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo abarcan el nivel inferior de Sima del Elefante, la Galería Principal de Cueva Peluda y el extremo NO de este sistema kárstico (figuras 4.108 y 4.109). Además, para definir el relleno sedimentario de Cueva Peluda y determinar los límites de esta cavidad se han realizado 3 sondeos mecánicos con recuperación de testigo (S17, S18 y S19) situados en distintos tramos del conducto (figura 4.109).

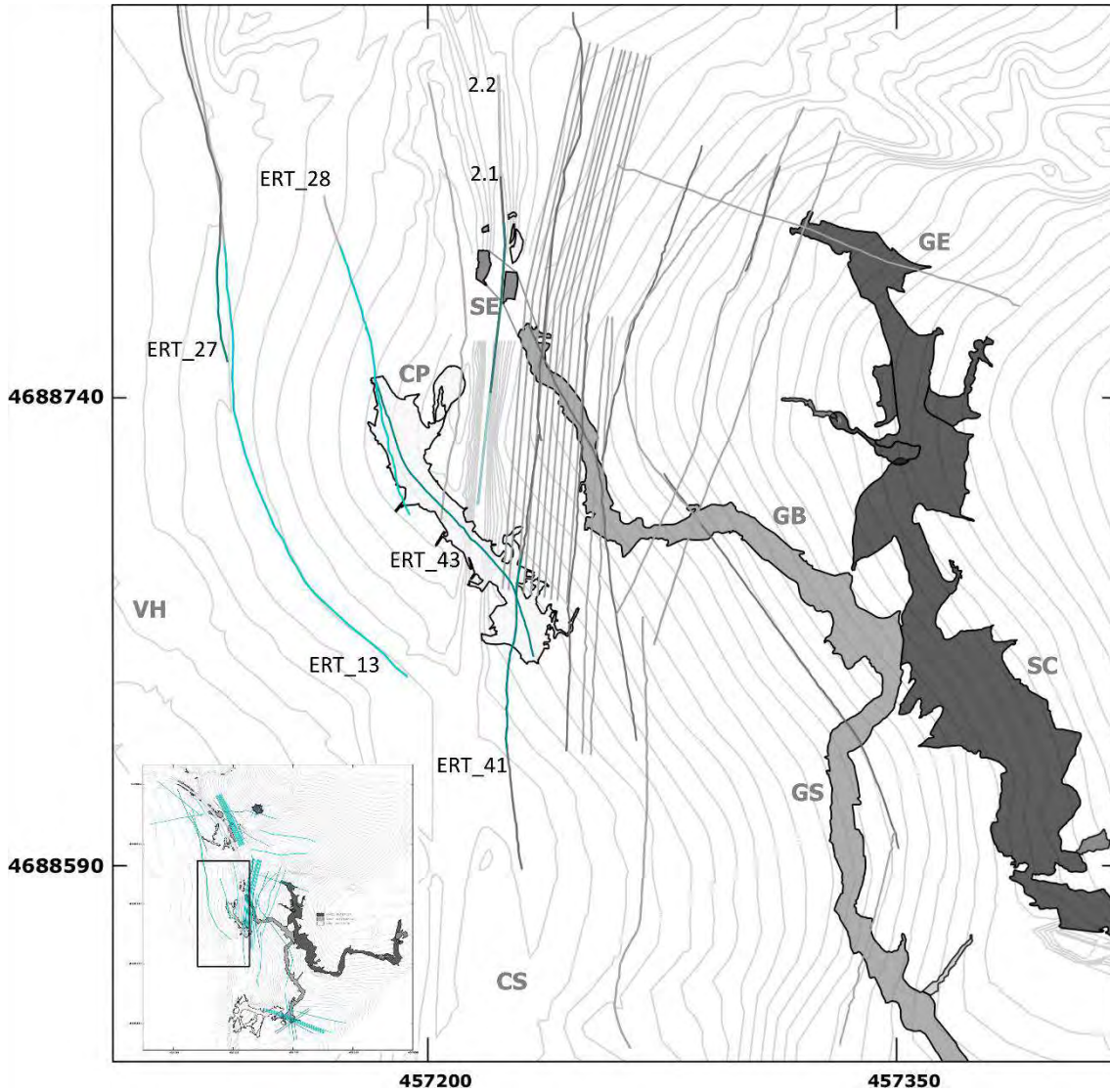


Figura 4.108. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre nivel inferior del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo (en azul) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo. Los perfiles 2.1 y 2.22 corresponden a los publicados en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2).

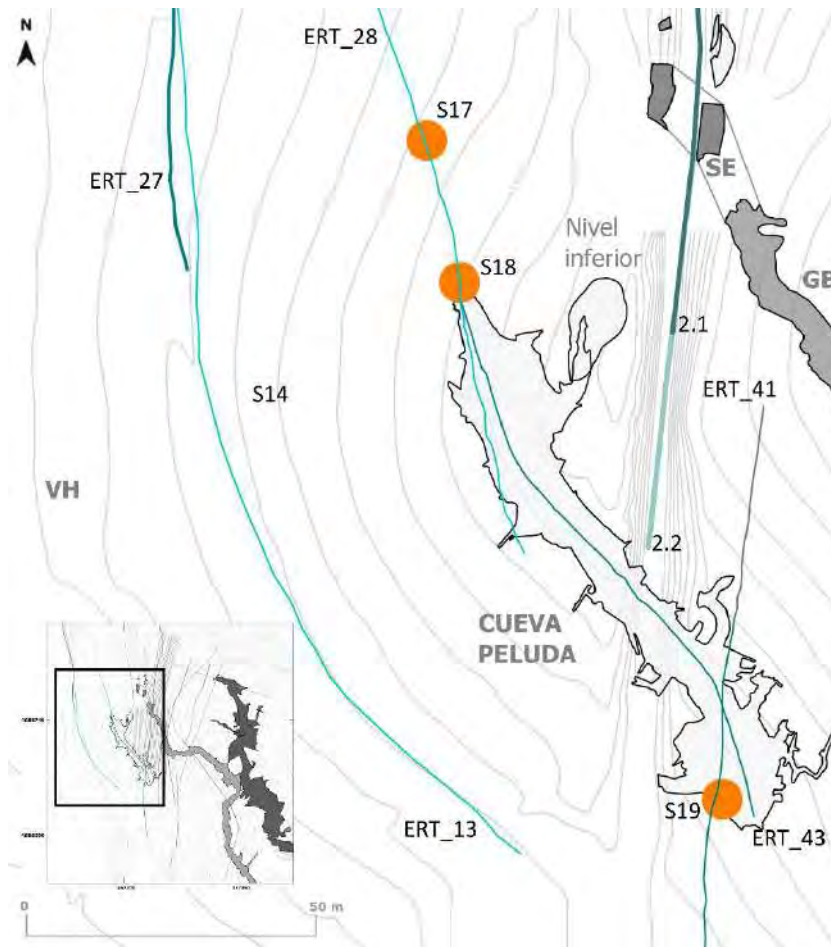


Figura 4.109. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de ERT y los sondeos mecánicos vinculados con la Sima del Elefante, Cueva Peluda y el límite NO del sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo. SE indica Sima del Elefante, GB Galería Baja y VH Valle de Valhondo. Los perfiles 2.1 y 2.22 corresponden a los publicados en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2).

- Cueva Peluda

De los tres perfiles de ERT realizados para el estudio de Cueva Peluda, dos perfiles, ERT\_28 y ERT\_41, definen los extremos NO y SE de este conducto, respectivamente, y uno, el perfil ERT\_43, define la potencia sedimentaria del eje principal de esta cavidad. Adicionalmente, el perfil 2.2, publicado en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2), aporta información acerca del desarrollo del nivel inferior de esta cavidad (figura 4.109).

El perfil ERT\_28, que se sitúa sobre Cueva Peluda siguiendo la orientación de su galería principal (figuras 4.108 y 4.109), muestra dos anomalías conductivas (CPN y CP) que podrían relacionarse con la continuidad del relleno sedimentario de la cueva (figura 4.110).

La anomalía CPN (acrónimo de Cueva Peluda Norte), que se sitúa hacia el metro 30 de este perfil, a partir de los 990 m s.n.m., presenta unos valores de resistividad de unos 700  $\Omega$ .m. A pesar de que estos valores han sido asociados a sedimentos más resistivos, como las arenas, y de que el techo de esta anomalía coincide con la bóveda de la Galería Principal de Cueva Peluda (Ortega, 2009), el sondeo mecánico S17, realizado a esta altura, reveló únicamente la presencia de roca caliza a lo largo de sus 14 m de profundidad (figura 4.111).

La anomalía CP (acrónimo de Cueva Peluda), se sitúa hacia el metro 55 del perfil ERT\_28, entre 2 y 5 m al NNO del final de la Galería Principal de Cueva Peluda, a partir de los 990 m s.n.m. en el



dispositivo DD y de los 994 m s.n.m. en el dispositivo WS (figura 4.110). Por su localización y los valores de resistividad que presenta, especialmente en el dispositivo WS, esta anomalía parece representar la continuación del relleno sedimentario de Cueva Peluda hacia el NNO. Esta interpretación está apoyada por el testigo recuperado en el sondeo mecánico S18, que reveló la existencia de varios niveles de arenas y arcillas entre los 991 m s.n.m. y los 986 m s.n.m. (figura 4.111).

Llama la atención que el perfil ERT\_28 (figura 4.110) muestre valores de resistividad superiores a los 1000  $\Omega.m$  a la altura a la que se sitúa el relleno sedimentario conocido de Cueva Peluda, que colmata el extremo NO de la cavidad a unos 991 m s.n.m. (Ortega, 2009). Esto puede ser debido a varios factores, que incluyen el hecho de que las dimensiones de este relleno sean relativamente pequeñas (apenas 5 m de espesor si tenemos en cuenta los resultados del sondeo S18) para destacar bajo más de 14 m de calizas, sumado al hecho de que este relleno se situó cerca del borde inferior del perfil.

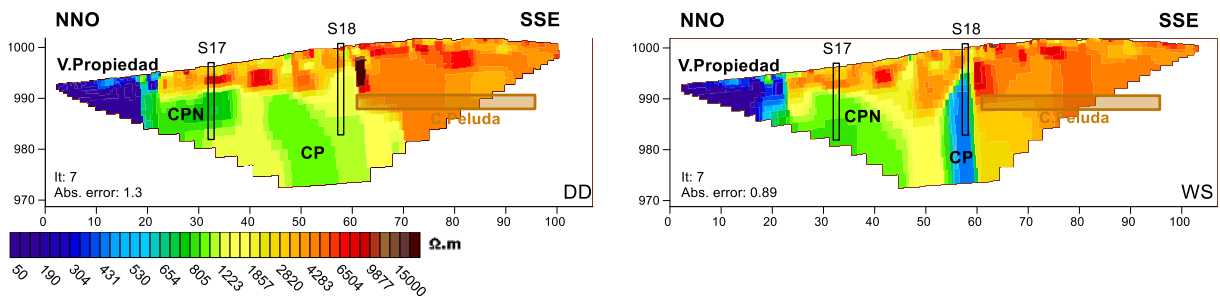


Figura 4.110. Perfil ERT\_28. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.

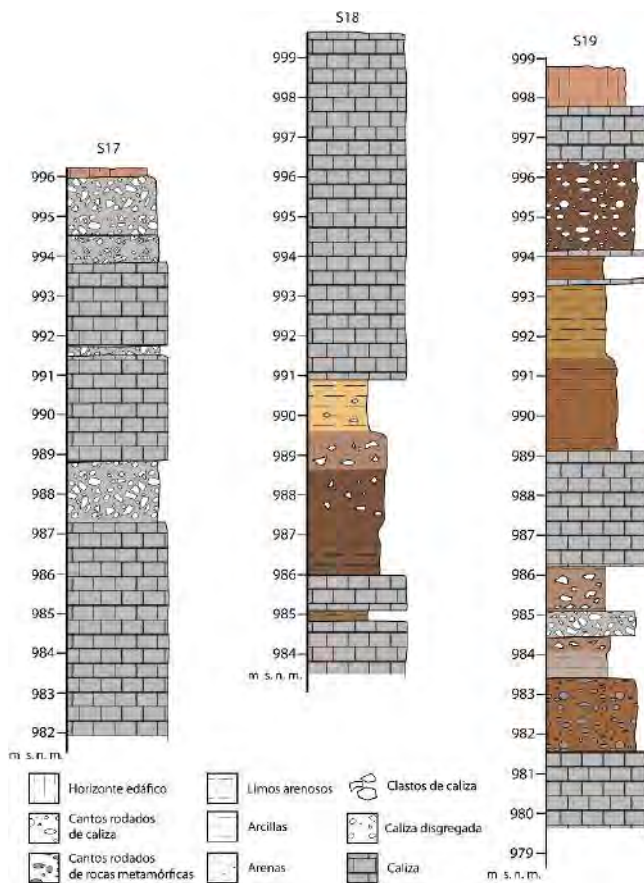


Figura 4.111. Descripción esquemática de la litología de los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S17, S18 y S19.



Con el fin de identificar los diferentes cuerpos sedimentarios que se encuentran en el nivel inferior del karst, los perfiles ERT\_41, ERT\_43, ERT\_13 y ERT\_27 se presentan a continuación con la escala de valores de baja resistividad, que es diferente a la del perfil ERT\_28. Los perfiles con esta escala se pueden consultar en el anexo I.2.

El límite SE de la galería principal de Cueva Peluda está definido por el perfil ERT\_41 que muestra, hacia el metro 70, una anomalía conductiva (CP) que coincide con el cono de sedimentos terrígenos visible en el interior de la cavidad (figuras 4.112 y 4.113). Los valores de resistividad de unos 150  $\Omega$ .m asociados a esta anomalía se reflejan a partir de los 992 m s.n.m. (figura 4.113), aunque el sondeo S19 reveló al menos 1 m de suelo, 1,5 m de roca caliza y 4 m de niveles arcillosos por encima de esta profundidad (figura 4.111). Además, el testigo de este sondeo reveló, entre los 989 m s.n.m. y 986 m s.n.m. y a partir de los 982 m s.n.m., sendos paquetes de caliza que no aparecen individualizados en el perfil ERT\_41 (figuras 4.111 y 4.113).

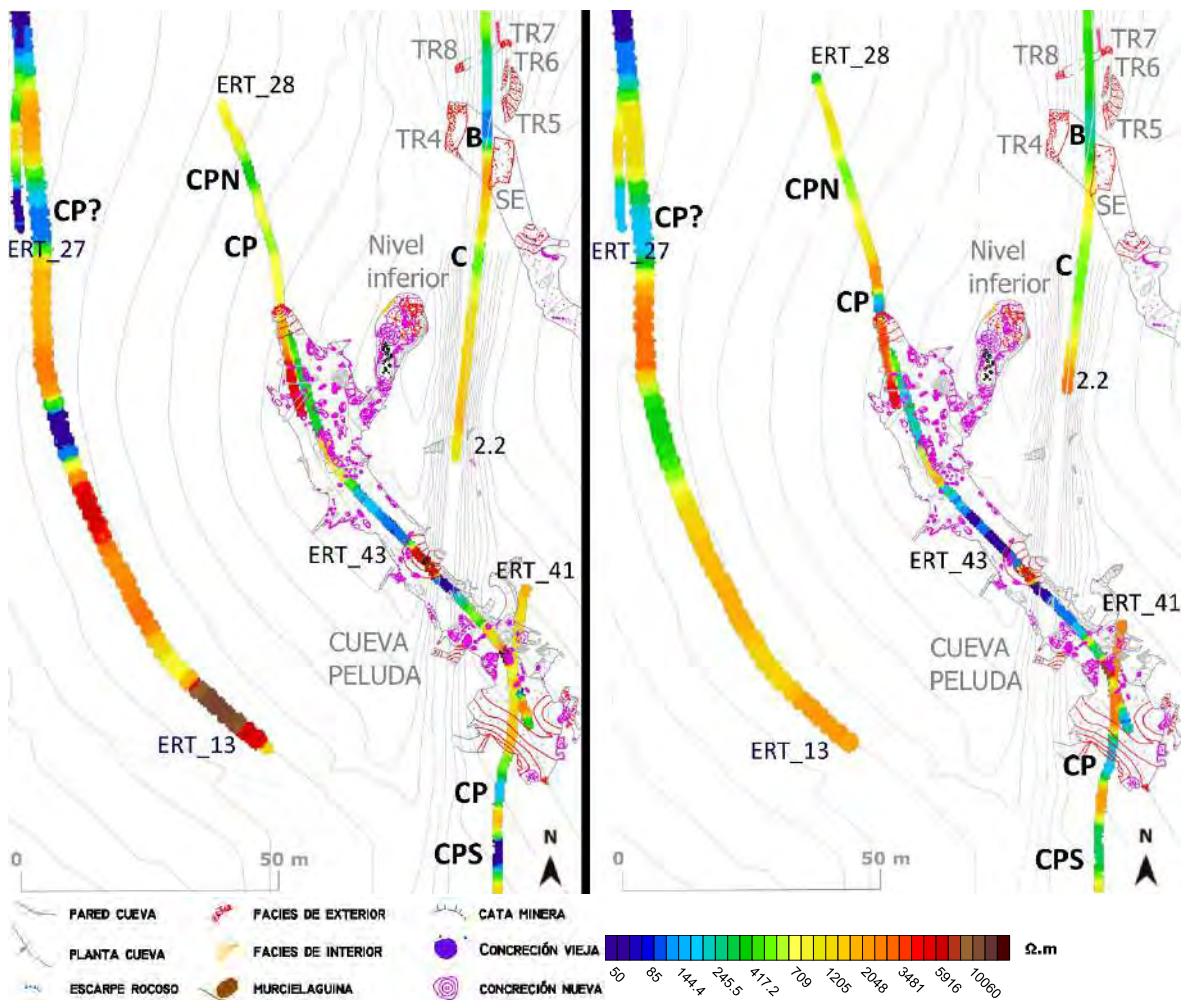


Figura 4.112. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_13, ERT\_27, ERT\_28, ERT\_41, ERT\_43 y 2.2 en torno a los 985 m s.n.m. y su relación con Cueva Peluda y Sima del Elefante. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil ERT\_28 se presenta con una escala distinta a la del nivel inferior del karst, como la que presenta en la figura 4.110. SE indica Sima del Elefante. B y C representan las anomalías identificadas en Bermejo et al., 2013 (anexo I.2).

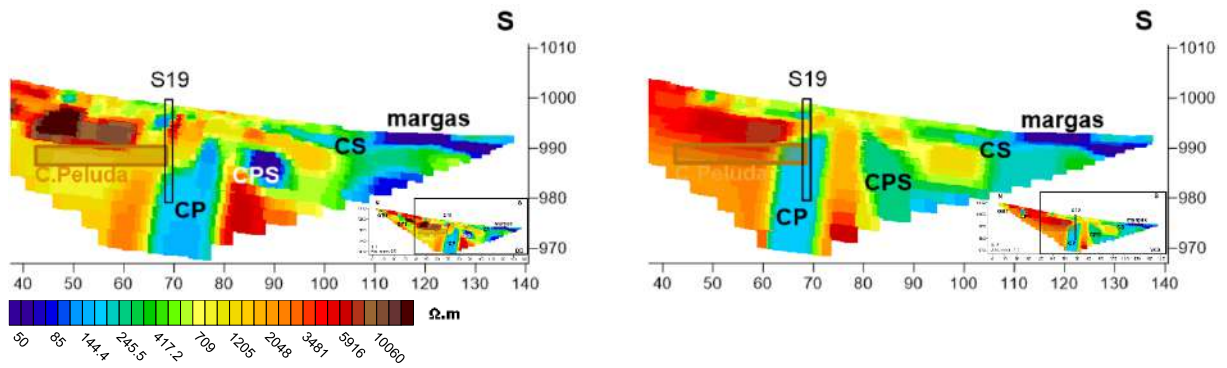


Figura 4.113. Detalle del perfil ERT\_41. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

En el perfil ERT\_41 se recoge también la anomalía conductiva CPS (acrónimo de Cueva Peluda Sur), que se sitúa hacia el metro 85, a partir de los 990 m s.n.m. (figuras 4.112 y 4.113). Esta anomalía presenta unos valores de resistividad distintos a los de la anomalía CP (más conductivos en el dispositivo DD y más resistivos en el dispositivo WS) (figura 4.113), pero, al carecer de otros perfiles de ERT que definan su morfología, no podemos descartar que forme parte del mismo relleno sedimentario que la anomalía CP, ya que ambas anomalías se encuentran muy próximas, separadas por apenas 5 m de materiales resistivos. Además, según el dispositivo DD, la base de la anomalía CPS se situaría a unos 982 m s.n.m., es decir, a la misma profundidad a la que se encuentra el último nivel de caliza documentado en el sondeo S19, que podría suponer la base del relleno sedimentario de Cueva Peluda y, por tanto, del relleno sedimentario relacionado con la anomalía CP (figuras 4.111 y 4.113).

En cuanto a la potencia sedimentaria de la Galería Principal de Cueva Peluda, el perfil ERT\_43, realizado en el interior de esta cavidad, a lo largo de su eje longitudinal, muestra un relleno sedimentario de entre 15  $\Omega.m$  y 200  $\Omega.m$  que se deposita sobre una base subhorizontal situada a una cota media de 982 m s.n.m. (figura 4.114). Los valores de resistividad de este relleno varían ligeramente, siendo menos conductivos en los extremos del conducto o en los tramos que corresponden a entradas colmatadas, es decir, en los primeros 25 m del perfil y a partir del metro 80, aproximadamente; y muy conductivos en el tramo central de la cavidad.

Los valores más resistivos presentes en este relleno pueden corresponder a las formaciones espeleotémicas presentes en numerosos puntos de la cavidad (figuras 4.112 y 4.115) (Ortega, 2009). Por su parte, los valores extremadamente resistivos (>5000  $\Omega.m$ ) que se sitúan hacia el metro 55 de este perfil corresponden al cono de entrada que se sitúa en el tramo central Cueva Peluda (figura 4.112), en el que se pueden apreciar una colada de bloques y cantos calizos sin apenas matriz (figuras 4.112 y 4.115).

Por su parte, la anomalía conductiva C identificada el perfil 2.2 (Bermejo et al., 2013, anexo I.2) podría suponer la continuación del relleno sedimentario del conducto del nivel inferior de Cueva Peluda (figura 4.112), cuyo extremo NE se muestra colmatado por sedimentos (Ortega, 2009).

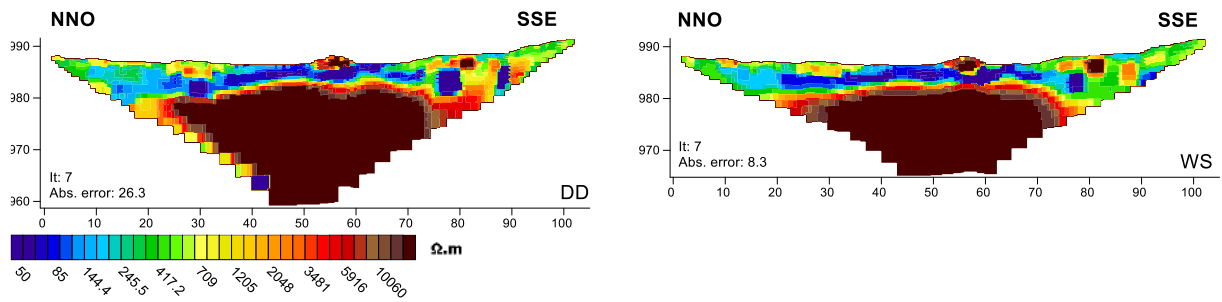


Figura 4.114. Perfil ERT\_43. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS.



Figura 4.115. Interior de Cueva Peluda durante la realización del perfil ERT\_43. Se aprecia el cono de entrada con grandes bloques de caliza desprovistos de matriz y, en segundo plano, varias estalagmitas.

- Límite noroeste

Por otro lado, los perfiles ERT\_13 y ERT\_27, realizados en el límite NO del sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo (figuras 4.108 y 4.109), muestran otras anomalías conductivas que podrían corresponder a rellenos endokársticos.

La anomalía CP?, que se sitúa hacia los metros 220 y 125 de estos perfiles, respectivamente, y presenta unos valores de resistividad de 100-150  $\Omega$ .m, muestra una estructura cerrada de unos 12 m de longitud y unos 8 m de potencia, cuya base se refleja hacia los 980 m s.n.m. (figuras 4.116 y 4.117). Por sus dimensiones y localización, esta anomalía podría tener relación con Cueva Peluda, lo que implicaría un marcado giro de la cueva hacia el NO (figura 4.112). Sin embargo, esta interpretación ha de tomarse con cautela ya que la anomalía CP? y Cueva Peluda se encuentran separadas por unos 50 m de distancia.

El perfil ERT\_13 recoge, además, hacia el metro 265, otra anomalía conductiva, situada en el límite inferior del modelo, cuya morfología y valores de resistividad varían entre los dispositivos DD y WS



(figura 4.116). A pesar de que la parte superior de esta anomalía podría corresponder a un relleno endokárstico desconocido, no es geológicamente verosímil que éste alcance una profundidad superior a los 970 m s.n.m., por lo que cabe la posibilidad de que esta anomalía conductiva corresponda a otro tipo de estructura geológica o, con mayor probabilidad, a un artefacto del proceso de inversión.

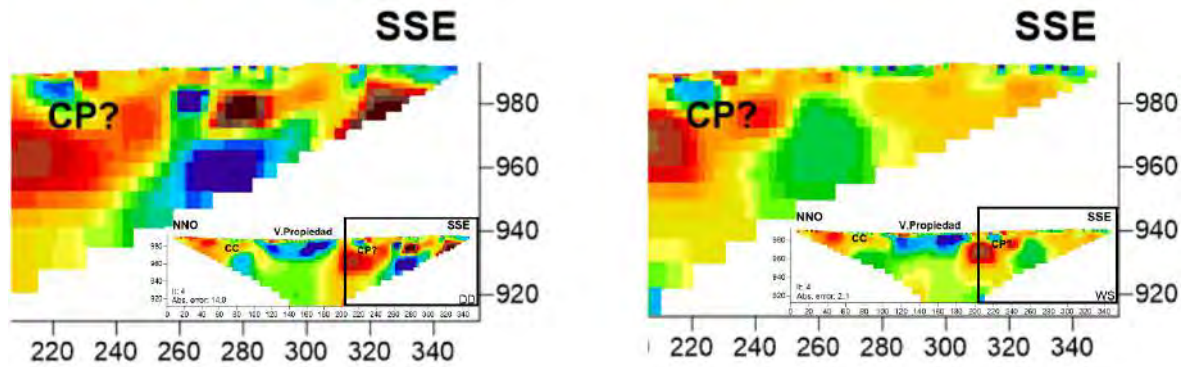


Figura 4.116. Detalle del perfil ERT\_13. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

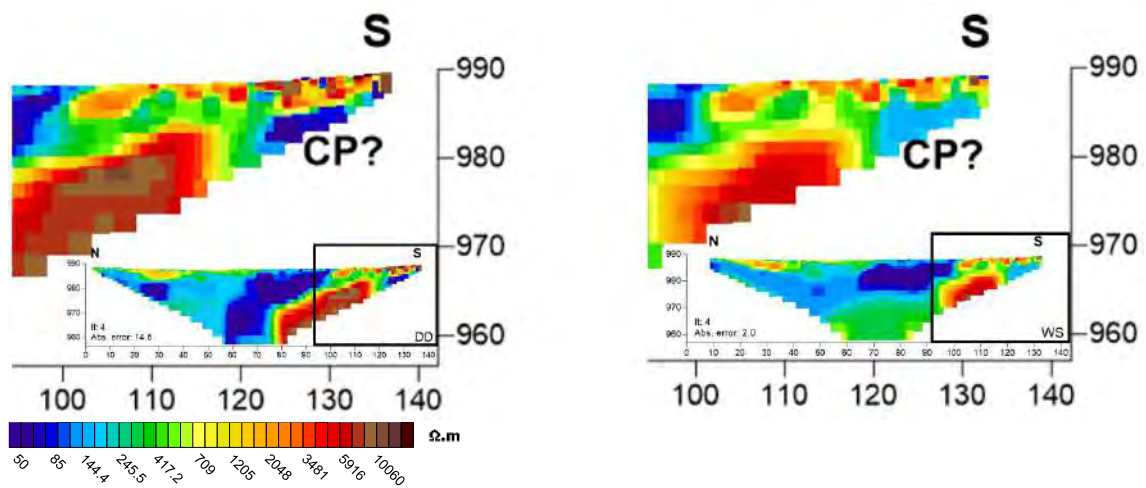


Figura 4.117. Detalle S del perfil ERT\_27. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El perfil completo se puede consultar en el anexo II.2.

#### 4.1.2.1.4 Valle de Cueva Mayor

Los perfiles ERT\_44-ERT\_55 (figura 4.118) muestran una serie de estructuras relacionadas con el curso medio del Valle de Cueva Mayor, la Sala Cíclopes y la Sima de los Huesos, que abarcan al nivel superior, intermedio e inferior del karst.

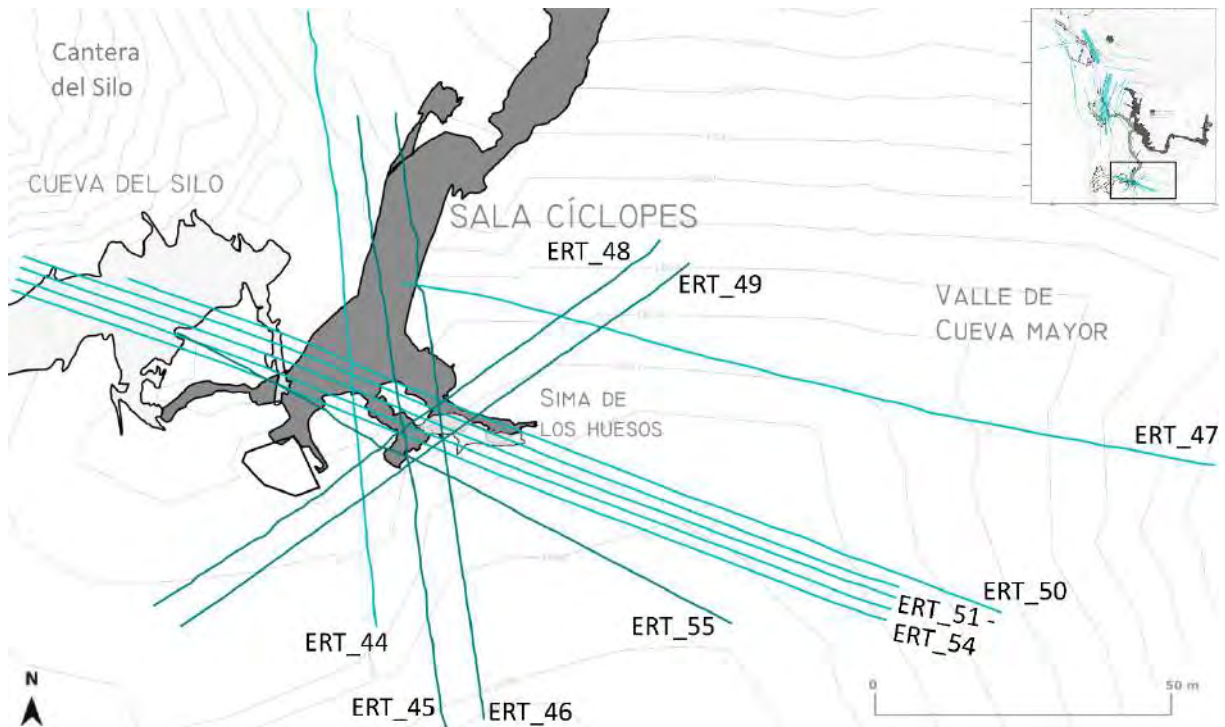


Figura 4.118. Localización de los perfiles de ERT realizados sobre la Sala Cíclopes y el curso medio del Valle de Cueva Mayor.

Al igual que en el Valle de la Propiedad y en la mayoría de perfiles asociados al nivel inferior del karst, los perfiles de este sector se presentan con la escala de valores de baja resistividad, que permite distinguir de manera más adecuada los diferentes elementos conductivos que caracterizan esta área. Los perfiles con esta escala se pueden consultar en el anexoll.2.

- Contacto calizas cretácicas-margas terciarias

Una de las principales estructuras que recogen los perfiles ERT\_44-ERT\_55 es el contacto entre las calizas cretácicas de la Sierra de Atapuerca y las margas terciarias de la Cuenca del Duero, una relación que ha sido descrita en los diversos trabajos geológicos y geofísicos realizados en este sector (Davó et al., 1987; Ortega, 2009; Ortega et al., 2010; Benito-Calvo y Pérez-González, 2015; ...).

Los perfiles de ERT realizados en este trabajo muestran que, hacia el norte, el contacto superficial entre margas y calizas se sitúa en torno al metro 40 del perfil ERT\_44 y al metro 20 de los perfiles ERT\_45 y ERT\_46, a una cota aproximada de 1016 m s.n.m. (figuras 4.119, 4.120, 4.121 y 4.122). En el subsuelo, se aprecia un escalonamiento progresivo de las calizas hacia el sur, cuya profundidad supera los límites inferiores de los perfiles hacia el metro 80 del perfil ERT\_44 y el metro 70 de los perfiles ERT\_45 y ERT\_46 (figuras 4.120, 4.121 y 4.122).

El límite NE de este contacto sedimentario se aprecia hacia el metro 10 del perfil ERT\_47 y a partir del metro 75 de los perfiles ERT\_48 y ERT\_49, a una altitud de unos 1015 m s.n.m. y 1012 m s.n.m.,



respectivamente (figuras 4.119, 4.123, 4.124 y 4.125). En superficie, las margas identificadas en estos perfiles muestran un contacto lateral con valores de resistividad de unos 150  $\Omega$ .m, alejados de los valores asociados a las calizas (>1000  $\Omega$ .m) que han sido descritas en esta área (figura 4.119), lo que podría indicar la presencia de un estrato superficial de caliza meteorizada o la extensión de los depósitos de conglomerados descritos más al este (figuras 4.119 y 4.123). Bajo la superficie, en los perfiles ERT\_48 y ERT\_49, el contacto margas-calizas muestra un escalonamiento progresivo de las calizas hacia SO, en paralelo al valle de Cueva Mayor. Este escalonamiento sobrepasa el límite inferior de estos perfiles en torno al metro 40 (figuras 4.124 y 4.125), coincidiendo con el punto de los perfiles ERT\_44, ERT\_45 y ERT\_46 para el que se ha descrito un resultado parecido (figura 4.119).

El conjunto de perfiles realizados de forma transversal al eje del Valle de Cueva Mayor (figura 4.118), muestra que, hacia el este, el límite superficial de las margas se registra en torno al metro 90 del perfil ERT\_50 y al metro 110 de los perfiles ERT\_51-ERT\_54 (figuras 4.119 y 4.126-4.130). En estos perfiles, las margas se depositan sobre una plataforma de caliza de apariencia subhorizontal que, sin embargo, presenta una ligera pendiente hacia el SO si se contempla de manera tridimensional, puesto que la profundidad a la que se refleja su techo desciende desde los 1010 m s.n.m. del perfil ERT\_50 hasta los 1007 m s.n.m del perfil ERT\_54 (figuras 4.126-4.130). Por su parte, el perfil ERT\_55, situado en el tramo central de esta área, no registra el contacto superficial entre margas y calizas y tan sólo el límite que se muestra en profundidad, a partir del metro 70 (figura 4.131), coincidiría con los límites descritos para el resto de perfiles (figura 4.132). En este perfil, el sustrato calizo muestra una acusada pendiente hacia el SE, especialmente en el dispositivo WS, en el que su techo desciende desde los 1006 m s.n.m. del metro 20 hasta los 990 m s.n.m. del metro 65 (figura 4.131).

En lo que se refiere a los valores de resistividad asociados a las calizas cretácicas, estos se muestran mucho más conductivos en este sector que en el resto de la Sierra de Atapuerca, con valores inferiores a los 1000  $\Omega$ .m en la mayoría de casos. Por un lado, estos valores tan conductivos pueden deberse al hecho de que casi todos los perfiles fueran realizados entre los meses de febrero y marzo, cuando el sustrato está más húmedo. De hecho, los perfiles ERT\_44 y ERT\_47 (figuras 4.120 y 4.123), realizados durante el mes de julio, presentan valores más resistivos para las mismas litologías a las que se asocian. Por otro lado, es posible que estas calizas presenten un grado de meteorización más elevado al encontrarse cerca del contacto con las margas miocenas. En cualquier caso, llama la atención que en los perfiles ERT\_45, ERT\_46, ERT\_48 y ERT\_49 (especialmente en los perfiles DD, que presentan un error más elevado) la localización de la Sala Cíclopes coincida con valores de resistividad de 150-300  $\Omega$ .m (figuras 4.121, 4.122, 4.124 y 4.125), mientras que en los mismos tramos de los perfiles ERT\_50-ERT\_54 se reflejen valores de 750-900  $\Omega$ .m (figura 4.132).

- Terrazas fluviales cuaternarias

Otra importante estructura que reflejan estos perfiles es el trazado del Valle de Cueva Mayor y las terrazas asociadas al mismo, que han sido descritas en diferentes trabajos geomorfológicos (Benito-Calvo, 2004; Benito-Calvo y Pérez-González, 2015; Benito-Calvo et al., 2017).

En primer lugar, los valores resistivos que se muestran hacia el sur en los perfiles ERT\_44 y ERT\_45 (figuras 4.120 y 4.121) coinciden con la extensión de la terraza fluvial identificada a esta altura (figura 4.119), que equivaldría a la terraza T4 del río Arlanzón. En este sentido, los valores más resistivos que las margas que se sitúan al SO en los perfiles ERT\_48 y ERT\_49 coinciden con el límite NE de esta misma terraza (figuras 4.119, 4.123 y 4.124). Sin embargo, en los primeros 25 m de estos perfiles, que se desarrollan también a lo largo de esta terraza T4, sólo se recogen valores de resistividad similares a los de las margas (figura 4.199). Esto podría ser debido a que la terraza sea menos

profunda a partir de este punto, por lo que estos valores tan conductivos corresponderían al sustrato margoso sobre el que se deposita.

Por otro lado, la plataforma horizontal que se encuentra en el extremo sur de los perfiles ERT\_45 y ERT\_46, a unos 1006 m s.n.m. y que muestra valores asociados a las margas en contacto con la superficie (figuras 4.121 y 4.122), podría corresponder a la terraza erosiva identificada en este sector (figura 4.119), que equivaldría a la terraza T5 del río Arlanzón.

Volviendo a la terraza T4, con respecto a su potencia sedimentaria, podemos considerar que si los valores resistivos que se disponen de manera subhorizontal bajo la plataforma de margas de la terraza T5 en los perfiles ERT\_45 y ERT\_46 (figuras 4.121 y 4.122) corresponden a la facies detrítica de Tierra de Campos (TC), tal y como se ha descrito a esta altura (figura 4.119), el techo de esta facies se situaría a unos 1004 m s.n.m. y, entonces, la terraza T4 presentaría unos 4 m de profundidad aproximadamente, al menos en su extremo este. De esta manera, los valores resistivos que se muestran en el extremo SO de los perfiles ERT\_48 y ERT\_49, a unos 1004 m s.n.m. (aunque sólo en los dispositivos DD), corresponderían también a la facies de Tierra de Campos (figuras 4.123 y 4.124).

Por último, los valores de resistividad de hasta 150  $\Omega$ .m que se encuentran, aproximadamente, entre los metros 90 y 120 del perfil ERT\_50 y 110 y 140 de los perfiles ERT\_51-ERT\_54 (figuras 4.126-4.130), coincidiendo con una depresión del terreno, corresponden al lecho del valle de Cueva Mayor (figura 4.119). Estos valores, que alcanzan unos 2 m de espesor, se muestran en contacto con unos valores más resistivos, de unos 250  $\Omega$ .m, que, en superficie, están asociados con la facies detrítica de Tierra de Campos (TC) (figura 4.119) y que, a su vez, se apoyan sobre una plataforma subhorizontal de valores asociados a la caliza, cuyo techo se sitúa a unos 998 m s.n.m. en el dispositivo DD y a unos 1002 m s.n.m. en el dispositivo WS (figuras 4.126-4.130).

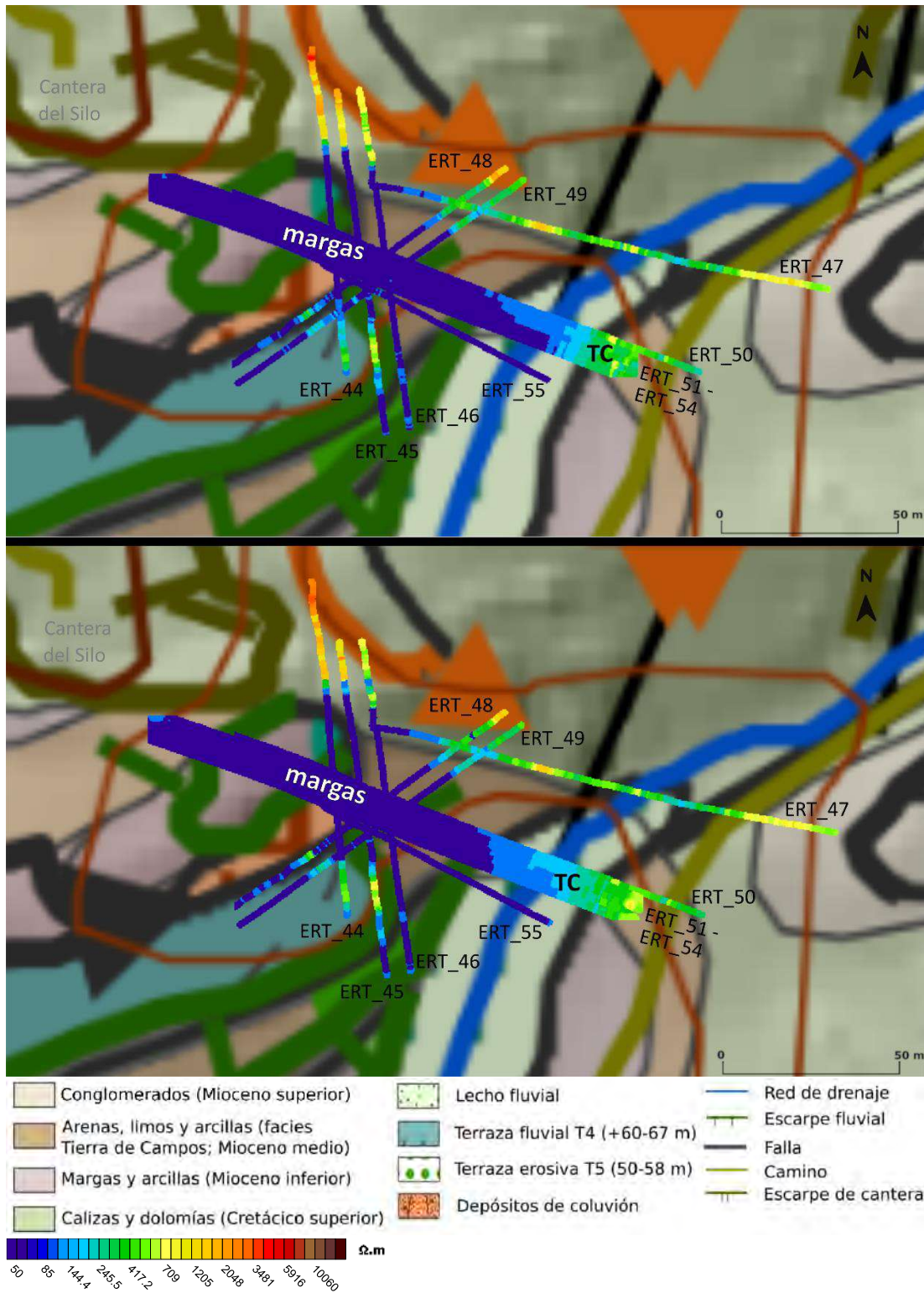


Figura 4.119. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_44-ERT\_55 en torno a los 1012 m s.n.m. superpuesto sobre el mapa geomorfológico (Benito-Calvo y Pérez-González, 2015). Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. TC indica la facies Tierra de Campos.

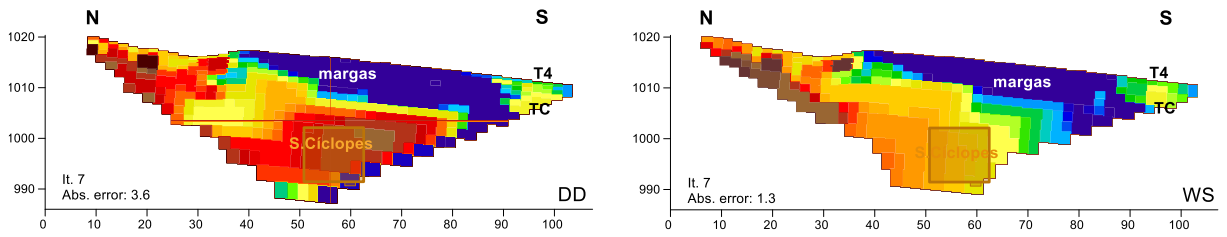


Figura 4.120. Perfil ERT\_44. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos.

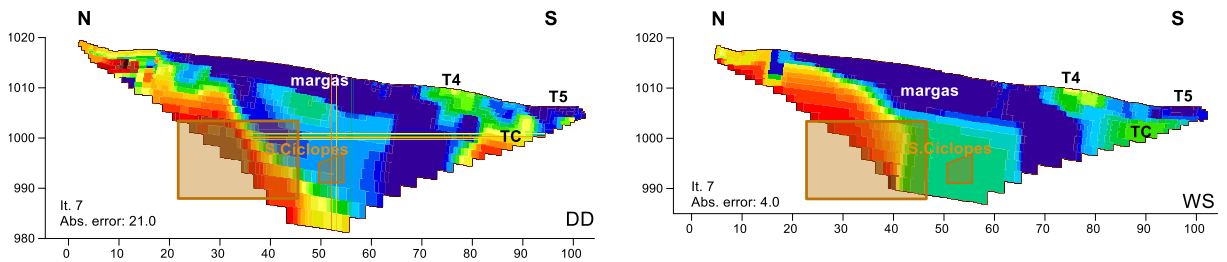


Figura 4.121. Perfil ERT\_45. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos.

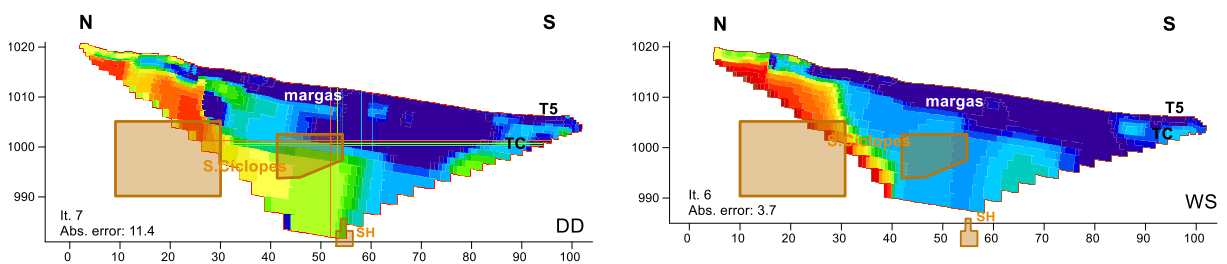


Figura 4.122. Perfil ERT\_46. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos y SH la Sima de los Huesos.

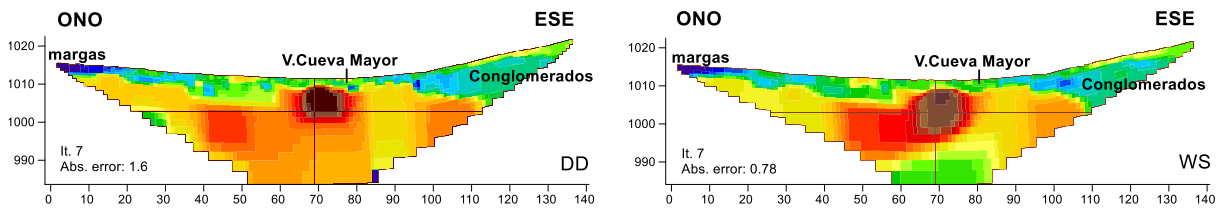


Figura 4.123. Perfil ERT\_47. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil.

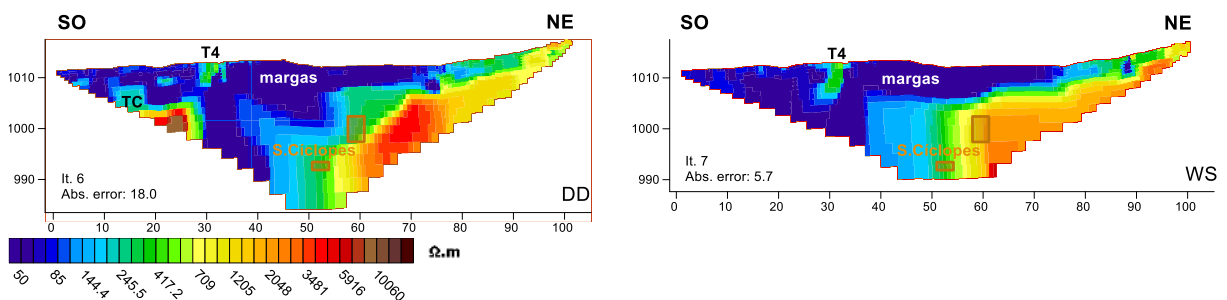


Figura 4.124. Perfil ERT\_48. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos.

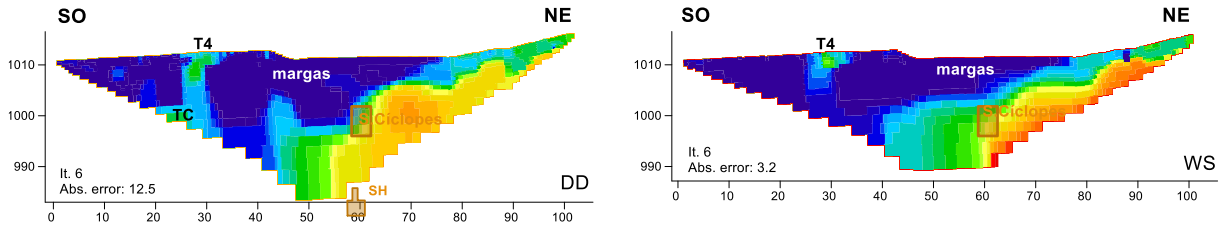


Figura 4.125. Perfil ERT\_49. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos y SH la Sima de los Huesos.

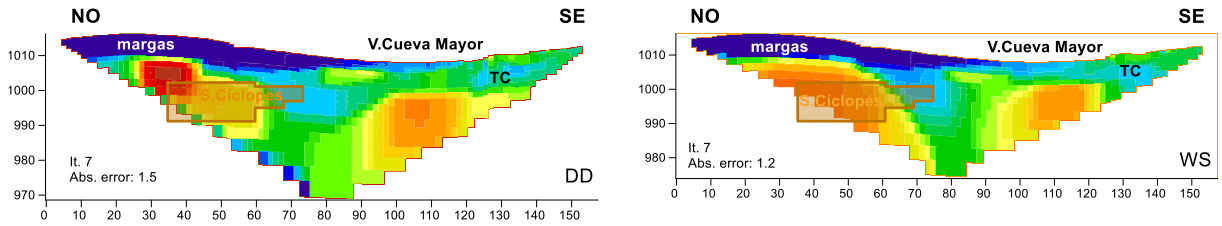


Figura 4.126. Perfil ERT\_50. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos.

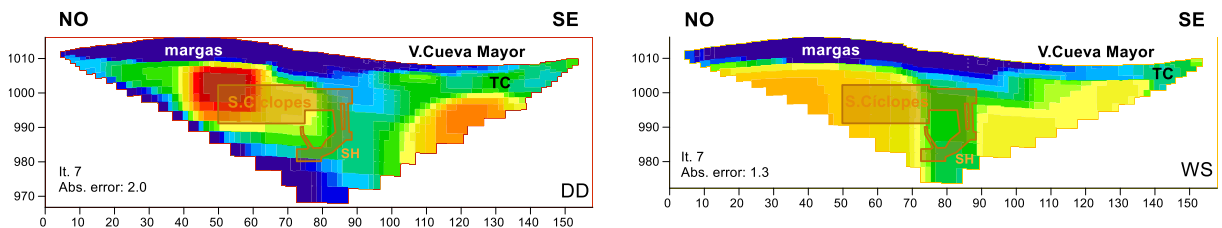


Figura 4.127. Perfil ERT\_51. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos y SH la Sima de los Huesos.

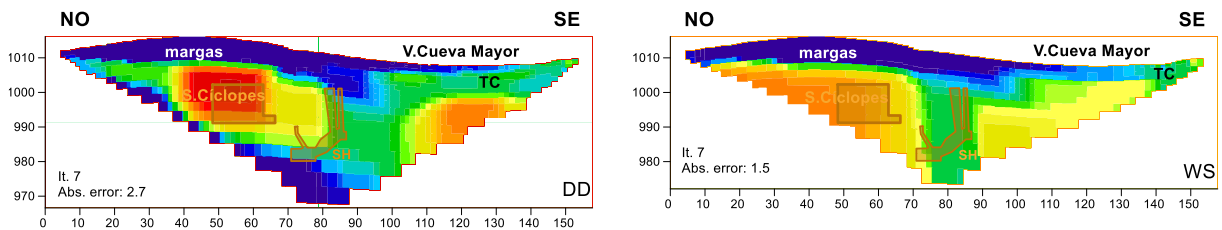


Figura 4.128. Perfil ERT\_52. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos y SH la Sima de los Huesos.

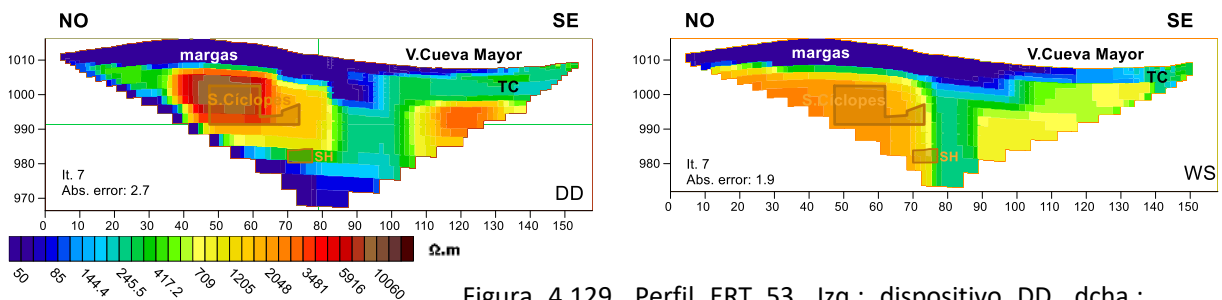


Figura 4.129. Perfil ERT\_53. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos y SH la Sima de los Huesos.



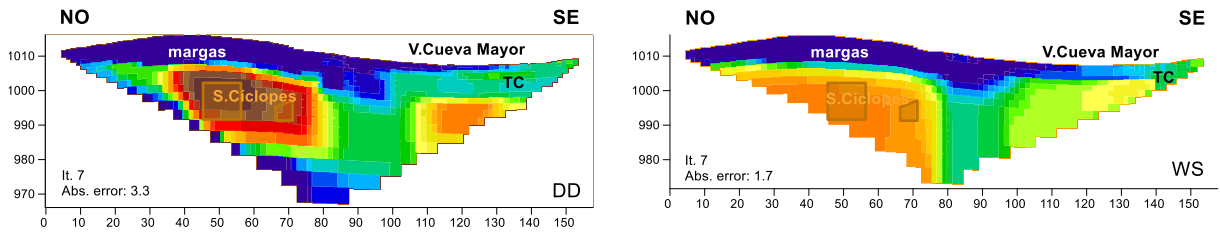


Figura 4.130. Perfil ERT\_54. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos.

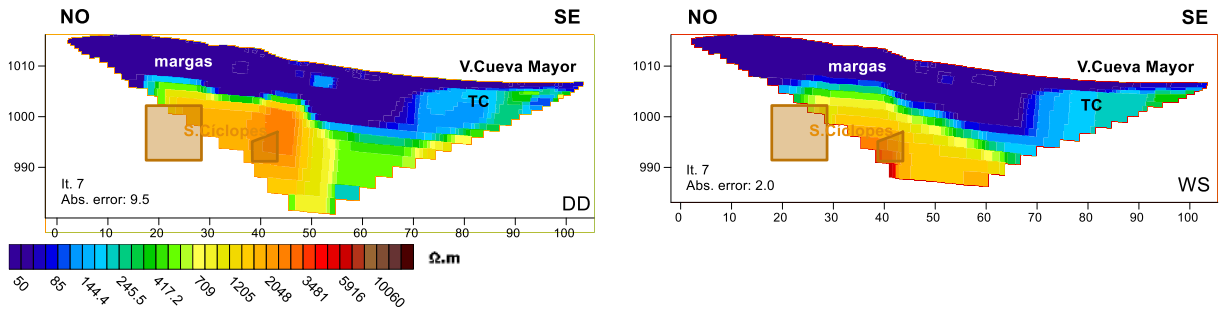


Figura 4.131. Perfil ERT\_55. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. El recuadro marrón indica el tramo aéreo de la cueva que cruza el perfil. TC indica la facies Tierra de Campos.

- Fallas y fracturas

Finalmente, la anomalía conductiva de 200-300  $\Omega.m$ , que divide en dos la plataforma de caliza cretácica descrita en los perfiles ERT\_50-ERT\_54 (figuras 4.126-4.130), constituye otra relevante estructura.

Por su naturaleza vertical, que destaca sobre todo en los perfiles individuales, esta estructura podría interpretarse como una falla o fractura de dirección NE-SO (figura 4.132). El hecho de que su límite E coincida con el cambio litológico entre las margas terciarias y la facies de Tierra de Campos (figura 4.119) apoyaría esta interpretación, ya que este contacto presenta un carácter vertical que alcanza unos 10 m de profundidad (figuras 4.126-4.131). Sin embargo, la anchura (de entre 10 m y 20 m) que presenta esta estructura excede las dimensiones esperadas para una falla, por lo que habría que considerar que o bien los perfiles la cruzan de manera transversal o existe más de una fractura asociada a esta anomalía.

Especialmente, esta estructura se sitúa entre el conducto que se desarrolla hacia el E desde la Sala de los Cíclopes (que da acceso a la Sima de los Huesos) y el límite O del curso actual del Valle de Cueva Mayor (figura 4.132). En profundidad, la anomalía se muestra a partir de los 1000 m s.n.m. (figuras 4.126-4.131), lo que coincide con la altura a la que se localizan las bóvedas freáticas de la Sala de los Cíclopes (Ortega, 2009). No obstante, en los perfiles ERT\_50-ERT\_52, parte del tramo aéreo de esta cavidad se sitúa dentro de esta anomalía conductiva, que, en el dispositivo WS, se ajusta a las dimensiones de la Sima de los Huesos y el pozo que le da acceso (figuras 4.126-4.128).

Puesto que estos valores tan conductivos no corresponden *per se* a las calizas ni a los tramos aéreos de la cavidad, su presencia podría responder a otro tipo de motivos de carácter metodológico, el principal de los cuales podría ser el encajonamiento que presentan las margas entre los metros 80 y 100 de los perfiles ERT\_50-ERT\_54 y los metros 50 y 70 del perfil ERT\_55, que se aprecia especialmente en el dispositivo DD (figuras 4.126-4.131). En cualquier caso, esta estructura recalca la existencia de un plano de debilidad relacionado con el desarrollo de la Sima de los Huesos.

- Otras anomalías

No ha sido posible establecer una relación entre las entradas de sedimentos situadas al oeste de Sala Cíclopes (Ortega, 2009) y los perfiles de ERT ya que, a pesar de que los perfiles ERT\_44 y ERT\_50-ERT-54 las cruzan en diferentes direcciones (figura 4.132), estos rellenos se situarían en el límite norte de los perfiles. Tan sólo los valores más conductivos, de unos 600  $\Omega$ .m, que se reflejan en el dispositivo DD del perfil ERT\_44 hacia el metro 35, entre los 1007 m s.n.m. y los 1002 m s.n.m. (figura 4.120), podrían corresponder a la entrada de sedimentos más septentrional (figura 4.132).

En cuanto a los valores altamente resistivos, estos pueden relacionarse con los tramos aéreos de Sala de los Cíclopes sólo en el dispositivo DD de los perfiles ERT\_44 y ERT\_51-ERT\_54 (figuras 4.120 y 4.127-4.130). Por su parte, el perfil ERT\_47 muestra una anomalía cerrada, hacia el metro 70, que presenta los valores más resistivos de este sector (figuras 4.123 y 4.132). Esta anomalía resistiva, que se sitúa en el tramo central del valle (figura 4.132), podría representar la sección de un conducto hueco desconocido relacionado con el nivel superior del karst o la existencia de alguna estructura, tipo fractura, vinculada con la morfología del valle.

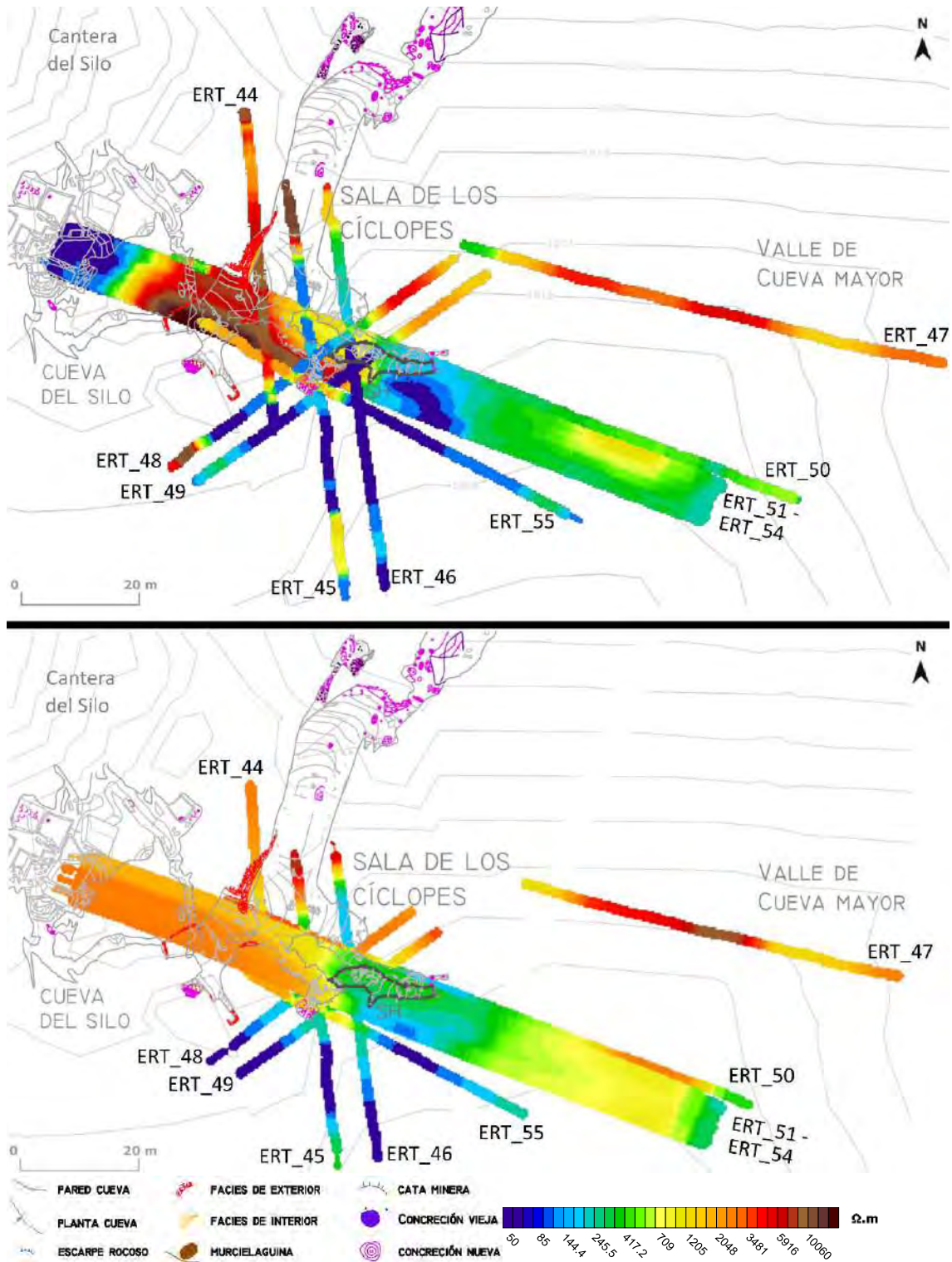


Figura 4.132. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_44-ERT\_55 en torno a los 1000 m s.n.m. y su relación con la Sala Cíclopes y el Valle de Cueva mayor. Imagen superior: dispositivo DD, inferior: dispositivo WS. SH indica Sima de los Huesos.

#### 4.1.2.1.5 La Paredeja

El perfil de ERT realizado en La Paredeja muestra la potencia sedimentaria de este yacimiento, que se sitúa en el límite entre las calizas cretácicas y los conglomerados oligocenos de la Sierra de Atapuerca (figuras 4.133 A y B), a cotas del nivel inferior del karst.

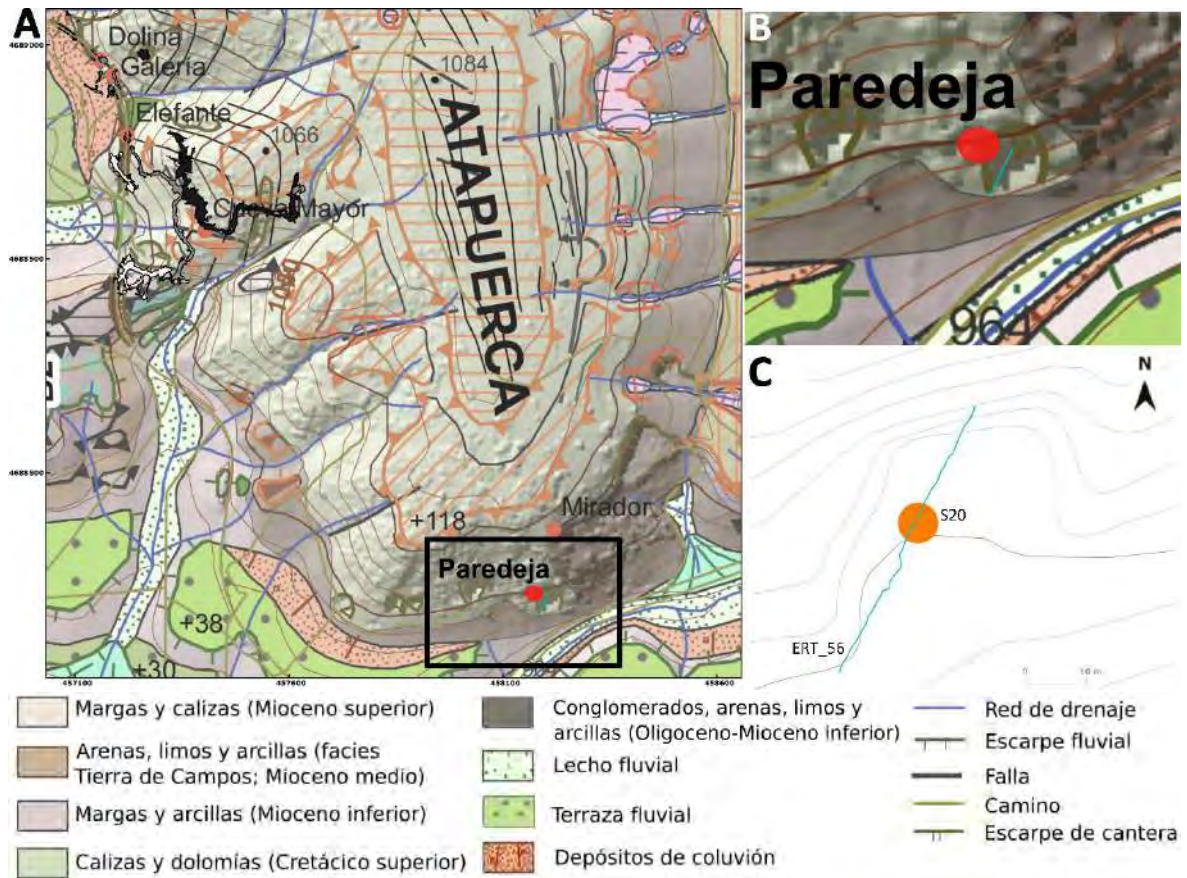


Figura 4.133. A: Mapa geológico de la Sierra de Atapuerca (Benito-Calvo y Pérez-González, 2015) y su sistema kárstico (Ortega, 2009). B: Detalle del recuadro de la figura A con la localización del perfil de ERT. C: Mapa topográfico de detalle con la localización del perfil de ERT y el sondeo mecánico realizado en el yacimiento de La Paredeja. (Base topográfica: R. Pérez Martínez).

Debido a las características geológicas de este sector, este perfil se presenta con la escala de valores de baja resistividad, que permite distinguir de manera adecuada entre diferentes elementos conductivos. Los perfiles con esta escala se pueden consultar en el anexo II.2.

El perfil ERT<sub>56</sub>, realizado en la base de La Paredeja, se dispone de manera paralela a la pared W de la cantera de Cudillo, en la que se sitúa este yacimiento (figuras 4.133 B y C y 4.134).

En este perfil se observan dos grupos principales de valores de resistividad: uno de 200-350  $\Omega$ .m y otro de valores superiores a 700  $\Omega$ .m. Los valores más conductivos parecen corresponder a los sedimentos terrígenos que se aprecian en el corte del yacimiento (figuras 4.134 y 4.135), tal y como se ha descrito en diferentes rellenos endokársticos de la Sierra de Atapuerca.

El sondeo mecánico S20 reveló que estos valores corresponden a una sucesión de sedimentos arcillosos intercalados por niveles de caliza fracturada, de hasta 2 m de espesor (figura 4.136). Estos cambios no se reflejan, sin embargo, en los valores de resistividad, que se muestran homogéneos a lo largo del sondeo (figura 4.135).



Por su parte, los valores de resistividad  $>700 \Omega.m$  podrían corresponder a la roca caja en la que se apoyan los sedimentos de este sector, que parece estar constituida por los conglomerados que se observan en este mismo corte (figuras 4.134 y 4.135).

Finalmente, la anomalía resistiva ( $>2000 \Omega.m$ ) de unos 4 m de longitud y 2 m de profundidad que se aprecia hacia el metro 27 de este perfil, podría corresponder a un bloque de caliza, como los que se observan en el corte del yacimiento (figuras 4.134 y 4.135).

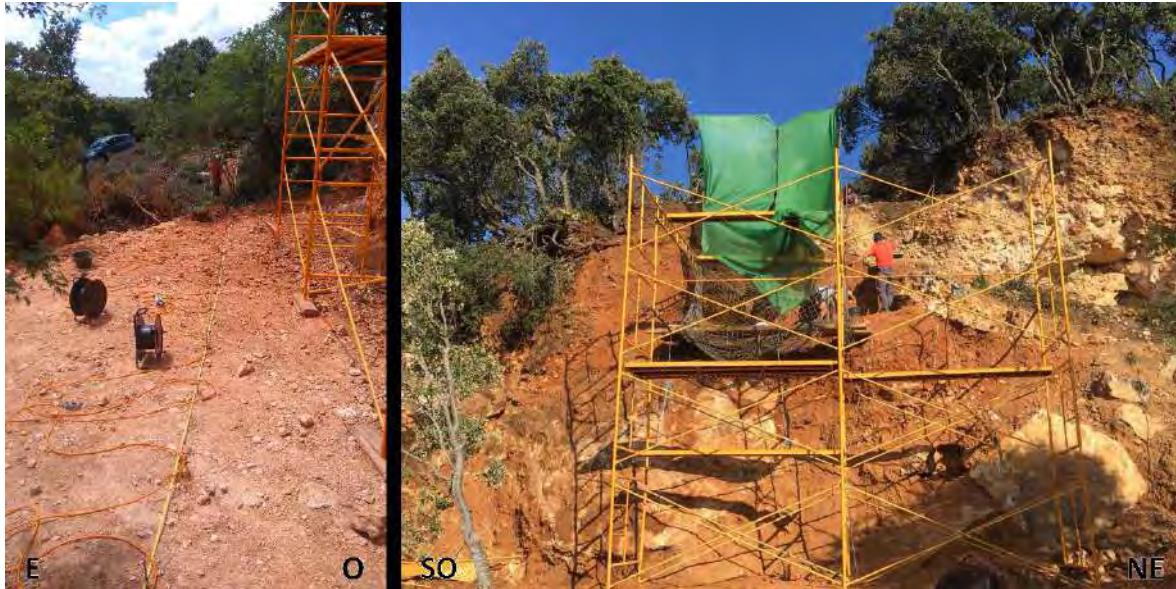


Figura 4.134. Izq: Tramo central del perfil ERT\_56 durante su realización en 2018. Dcha: Yacimiento de La Paredeja en 2018. Se aprecian diferentes litologías: sedimentos terrígenos, conglomerados y bloques de caliza de tamaño métrico. (Fotografía dcha.: I. Fernández/<http://elhombredeanchiano.blogspot.com>).

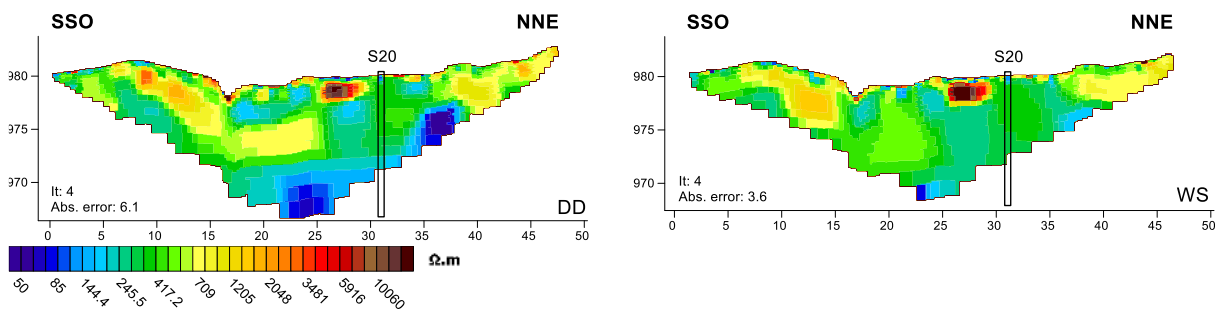


Figura 4.135. Perfil ERT\_56. Izq.: dispositivo DD, dcha.: dispositivo WS. La excavación se desarrolla entre los metros 17 y 35, aproximadamente.



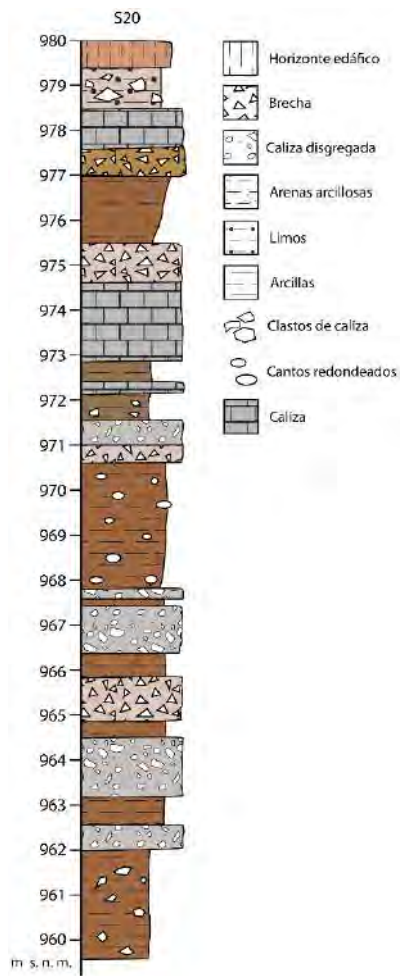


Figura 4.136. Descripción esquemática de la litología del sondeo mecánico con recuperación de testigo S20.

#### 4.1.2.2 GEORRADAR (GPR)

La comparación de los resultados obtenidos en las prospecciones de georradar con los elementos kársticos conocidos, los perfiles de resistividad eléctrica y los datos aportados por los sondeos mecánicos ha permitido identificar características comunes en el comportamiento de las ondas de radar en elementos kársticos y litológicos concretos.

Así, las reflexiones de mayor amplitud que se recogen en estos perfiles han sido producidas por los tramos aéreos de las cavidades y, en menor medida, por las discontinuidades entre los estratos de caliza. En contraposición, los rellenos sedimentarios terrígenos y margosos, que constituyen un ambiente muy húmedo y conductivo, atenúan rápidamente la onda de radar, por lo que en estos medios se registran escasas reflexiones. Otro medio en el que se generan pocas reflexiones está constituido por la roca caliza compacta, aunque en este caso el estudio de las ondas de radar indica que la energía no muestra más atenuaciones que las propias de su propagación en profundidad. Por su parte, los depósitos de terraza, que presentan una mayor concentración de clastos y sedimentos arenosos, permiten que la onda de radar se propague varios metros en profundidad. Por último, los cuerpos espeleotémicos, que se caracterizan por mostrar una batería de reflexiones, permiten una buena penetración de la onda de radar.

Aunque los perfiles de este apartado se presentan con dos formatos distintos (escala de color verde-rojo y negra-blanca), todos los datos fueron adquiridos con unas antenas VIY®3 (Transient Technologies) de 300 MHz y esta diferencia corresponde únicamente al hecho de que los primeros fueron tratados con el software GPR-slice (ver 7.0), que permite, además, incluir la topografía del terreno (ver apartado 3.2.3). Los datos adquiridos con las antenas de 270 MHz de GSSI se recogen en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1) y en este apartado se presentan sólo los mapas de amplitud para su comparación con los resultados inéditos adquiridos en otras localizaciones.

#### 4.1.2.2.1 Sistema Trinchera

Los perfiles de GPR realizados en el sistema kárstico de Trinchera, comprenden los perfiles GPR\_1-GPR\_46, que se sitúan en torno a las cavidades de Cueva Fantasma, Gran Dolina-Penal, el Complejo Galería, la Cueva del Compressor y el límite oeste del karst (figura 4.137).

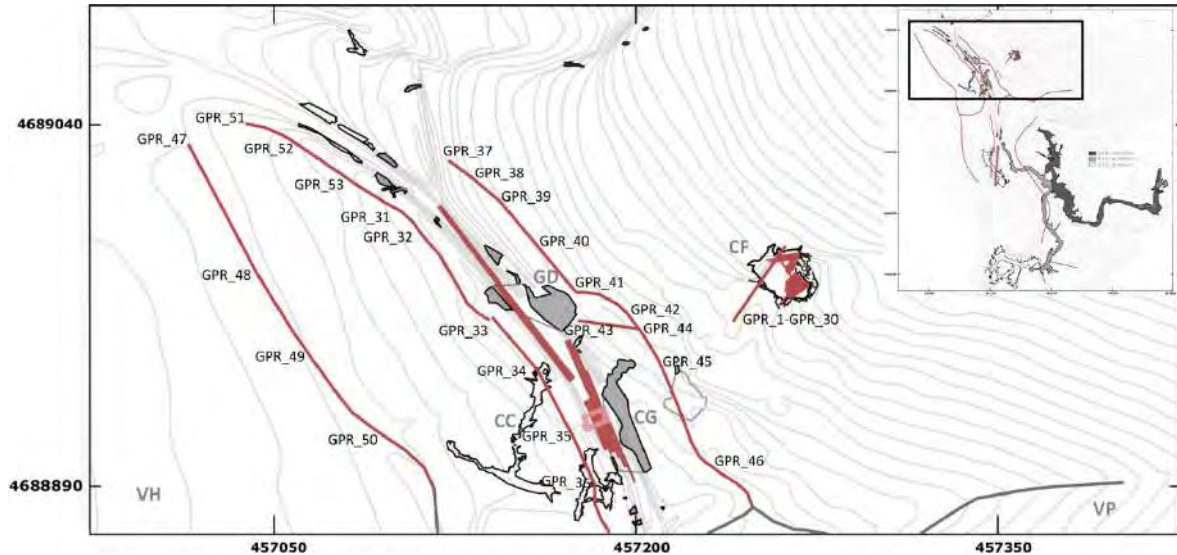


Figura 4.137. Localización de los perfiles de GPR realizados en el sistema kárstico de Trinchera (en rojo). Los polígonos rojo y rosa situados en la trinchera del ferrocarril representan el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo.

##### 4.1.2.2.1.1 Nivel superior

Los perfiles de GPR que abarcan el nivel superior del sistema de Trinchera se sitúan en el yacimiento de Cueva Fantasma. Los 30 perfiles de GPR realizados en esta cavidad, que se localizan mayoritariamente sobre el sector sedimentario de *Cueva Fantasma* (CF), se organizan en 3 mallas de perfiles paralelos de distintas orientaciones. Sólo los perfiles GPR\_1 y GPR\_7 se disponen de manera individual, aunque cruzando estas mallas (figura 4.138).

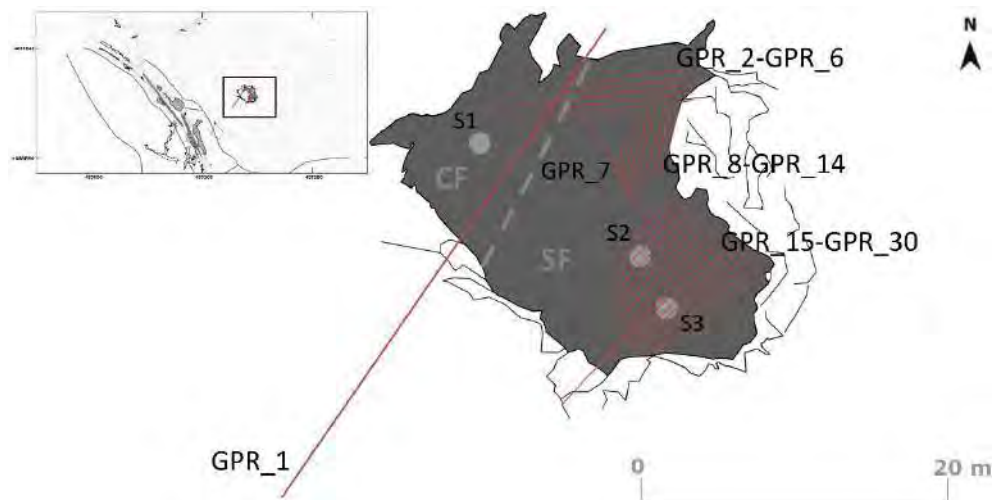


Figura 4.138. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR y los sondeos mecánicos realizados en Cueva Fantasma.

Las reflexiones de gran amplitud constituyen los elementos más reconocibles de estos perfiles que, en Cueva Fantasma, están relacionadas con las escombreras y los cuerpos espeleotémicos. Los escombros de cantera se han identificado únicamente en el perfil GPR\_1 (figura 4.139), ya que éste fue realizado antes de la limpieza del yacimiento. Por su parte, la correlación entre los espeleotemas documentados en la superficie del yacimiento y los grupos de reflexiones presentes en los perfiles de GPR ha permitido identificar su distribución en diferentes zonas del área de estudio (figura 4.140).

El análisis en detalle de este conjunto de reflexiones indica, por un lado, que los cuerpos espeleotémicos de Cueva Fantasma se encuentran cercanos al nivel de excavación actual, ya que estas reflexiones se muestran prácticamente desde la superficie perfil. Por otro lado, la profundidad que alcanzan estas reflexiones, que varía de un conjunto a otro, indica que estos espeleotemas presentan diferentes espesores. Los más someros, que se reflejan en los perfiles GPR\_5-GPR\_6 (figura 4.141), GPR\_9-GPR\_11 (figura 4.142) y GPR\_24-GPR\_26 (figura 4.143), apenas registran reflexiones pasado el primer metro de profundidad, mientras que en el resto de perfiles superan los 4 m de espesor.

En cualquier caso, no debe interpretarse que la profundidad máxima que alcanza cada grupo de reflexiones indica la localización del suelo rocoso de la cueva, ya que los sondeos mecánicos S2 y S3 (figura 4.15, pág. X), que se encuentran cercanos a los espeleotemas identificados en los perfiles GPR\_17 y GPR\_25 (figura 4.143), comprobaron que éste se ubica entre los 8 m y los 12 m de profundidad.

Por último, no ha sido posible identificar características asociadas a los rellenos sedimentarios de Cueva Fantasma más allá del hecho de que estas generan reflexiones de escasa amplitud. A pesar de que algunos perfiles muestran ciertas reflexiones superficiales que podrían relacionarse con diferentes niveles sedimentarios, como los visibles en el primer metro de profundidad de los perfiles GPR\_27-GPR\_30 (figura 4.143), estos no se corresponden con la secuencia litológica de los testigos recuperados en los sondeos mecánicos S2 y S3 (figura 4.15, pág. X).

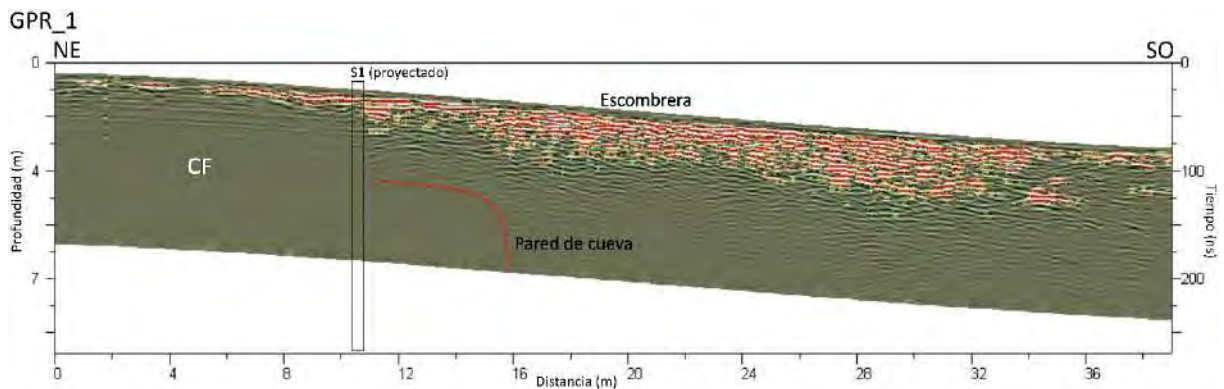


Figura 4.139. Perfil GPR\_1. CF indica el relleno del sector *Cueva Fantasma* y S1 el sondeo mecánico. La superficie se encuentra a unos 1016 m s.n.m.

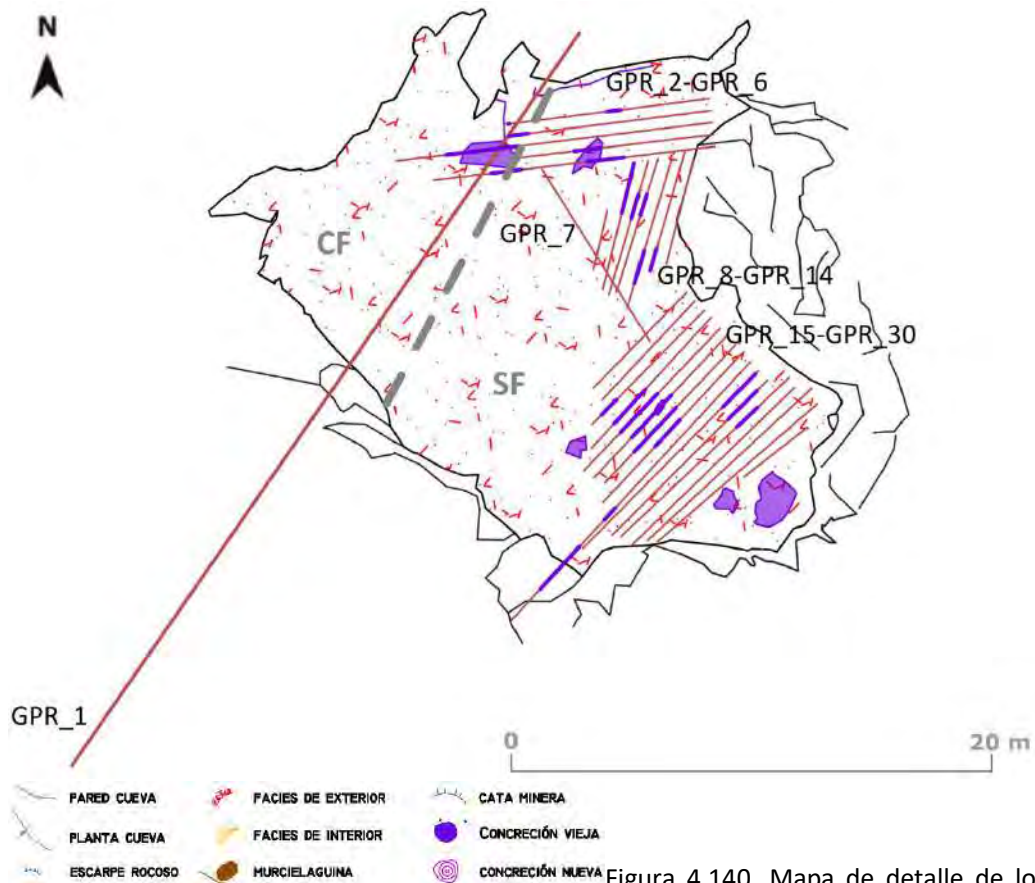


Figura 4.140. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_1-GPR\_30 en torno a los 1015 m s.n.m. Los trazos morados indican los espeleotemas identificados en estos perfiles y los polígonos las concreciones topografiadas hasta la fecha. CF indica el relleno del sector *Cueva Fantasma* y SF el de *Sala Fantasma*.

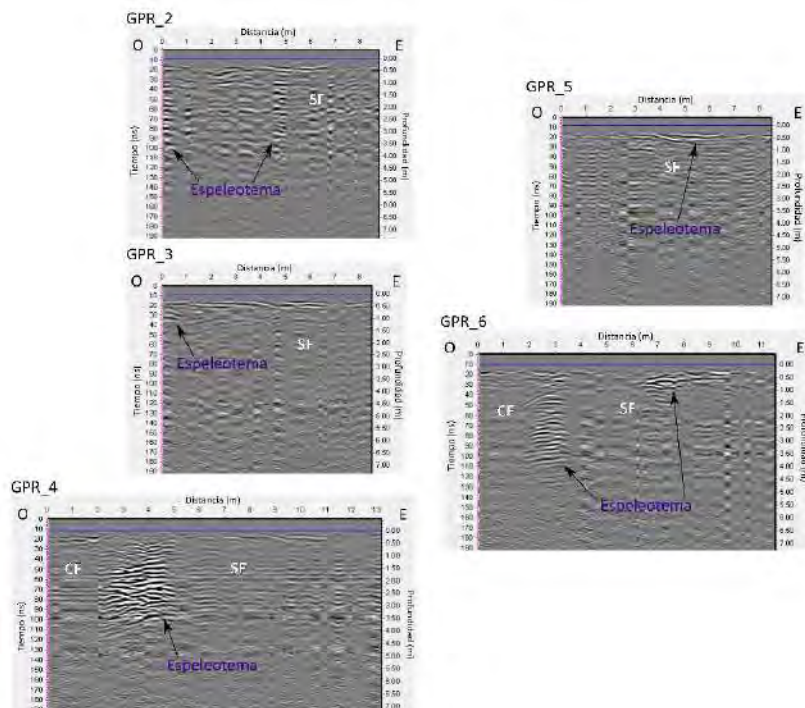


Figura 4.141. Perfiles GPR\_2-GPR\_6. SF indica el relleno del sector *Sala Fantasma* y CF el del sector *Cueva Fantasma*. La superficie se encuentra a unos 1016 m s.n.m.



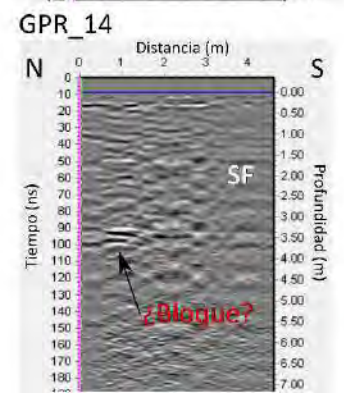
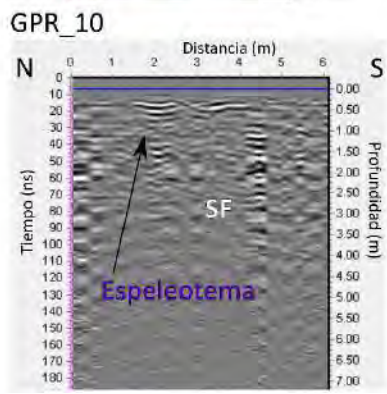
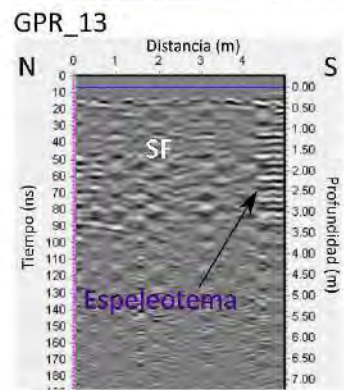
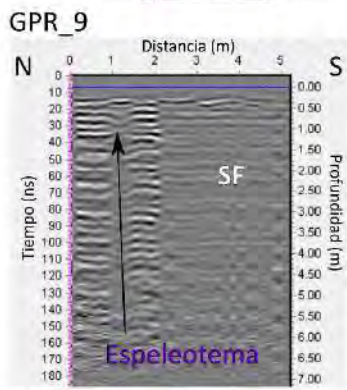
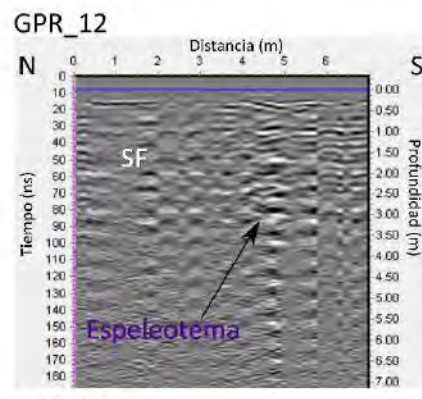
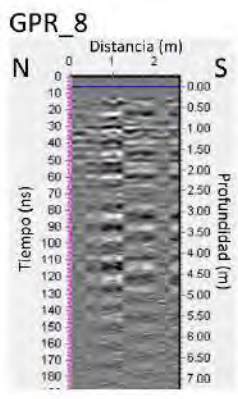
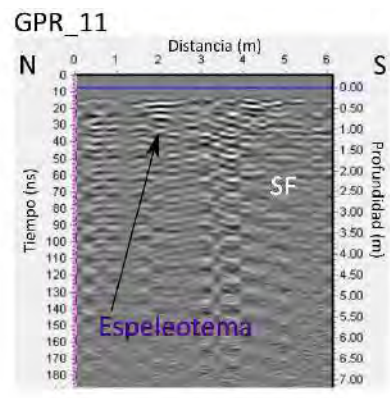
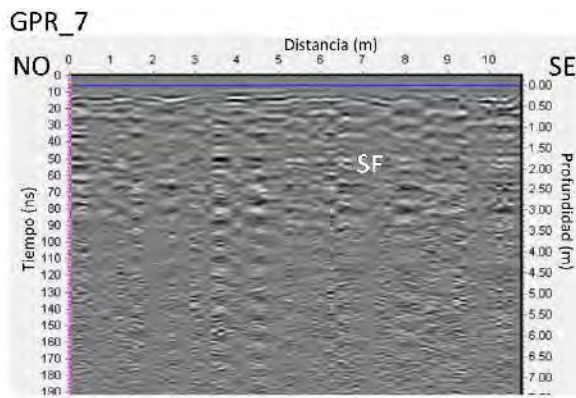


Figura 4.142. Perfiles GPR\_7-GPR\_14. SF indica el relleno del sector *Sala Fantasma*. La superficie se encuentra a unos 1016 m s.n.m.

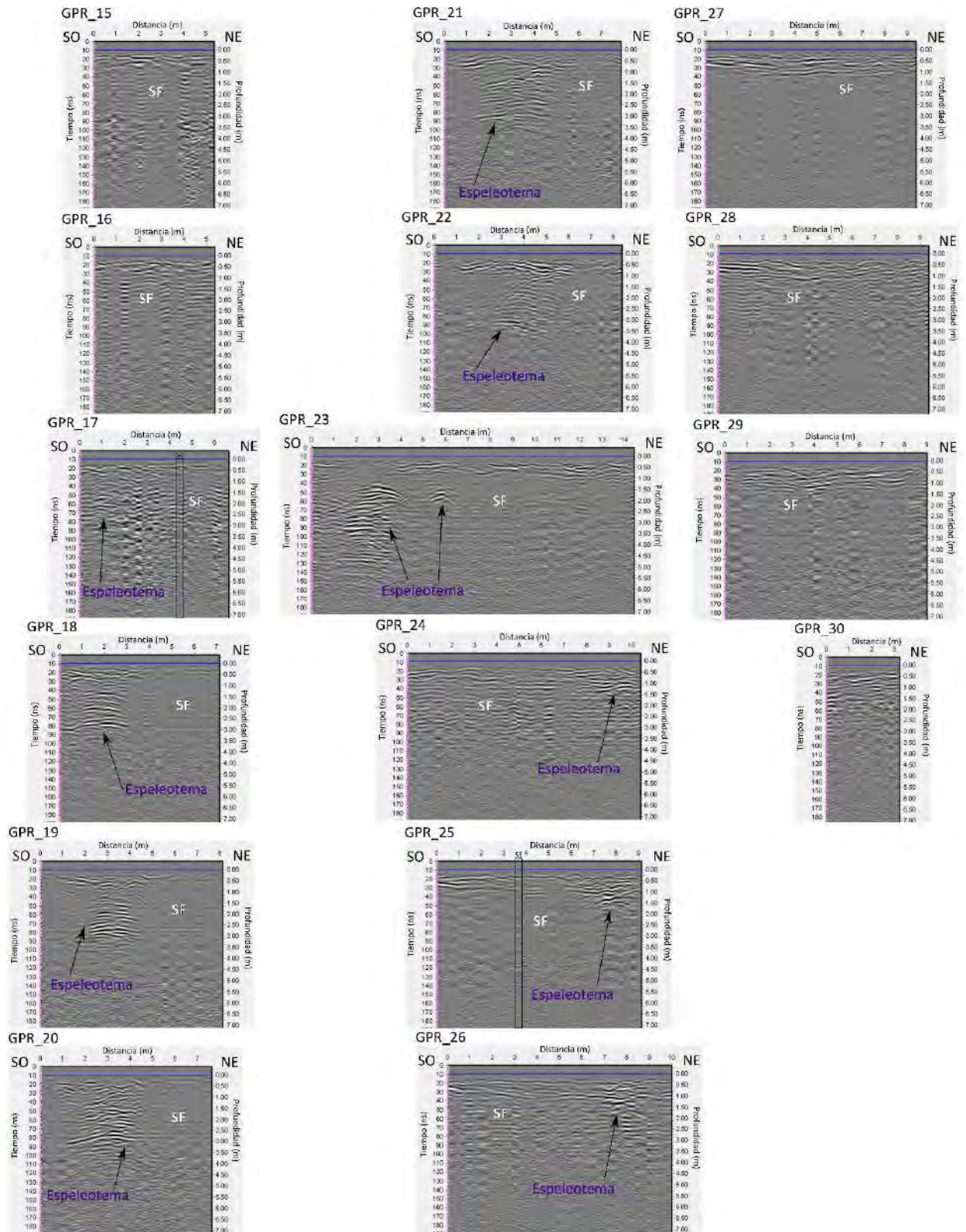


Figura 4.143. Perfiles GPR\_15-GPR\_30. SF indica el relleno del sector *Sala Fantasma* y S2 y S3 los sondeos mecánicos. La superficie se encuentra a unos 1016 m s.n.m.



#### 4.1.2.2.1.2 Nivel intermedio

Los perfiles de GPR que abarcan el nivel intermedio del sistema de Trinchera se sitúan en torno a los conductos de Gran Dolina-Penal, el Complejo Galería y la Cueva de los Zorros (figuras 4.144-4.146).

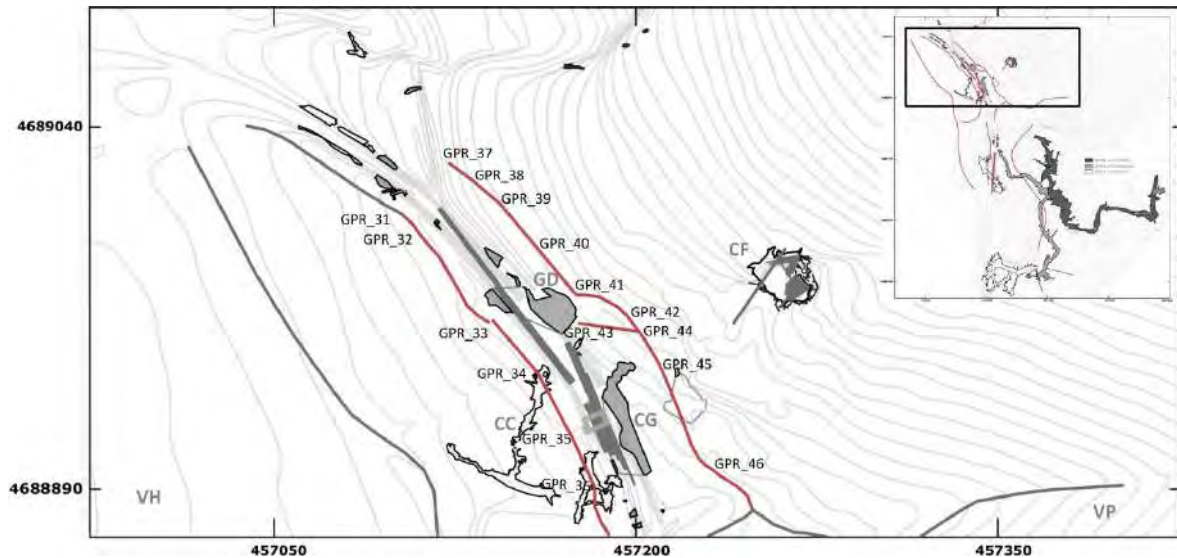


Figura 4.144. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel intermedio del sistema de Trinchera (en rojo) y su relación con el resto de perfiles de GPR (en gris). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CZ Cueva de los Zorros; CC Cueva del Compresor, y VH Valle de Valhondo.

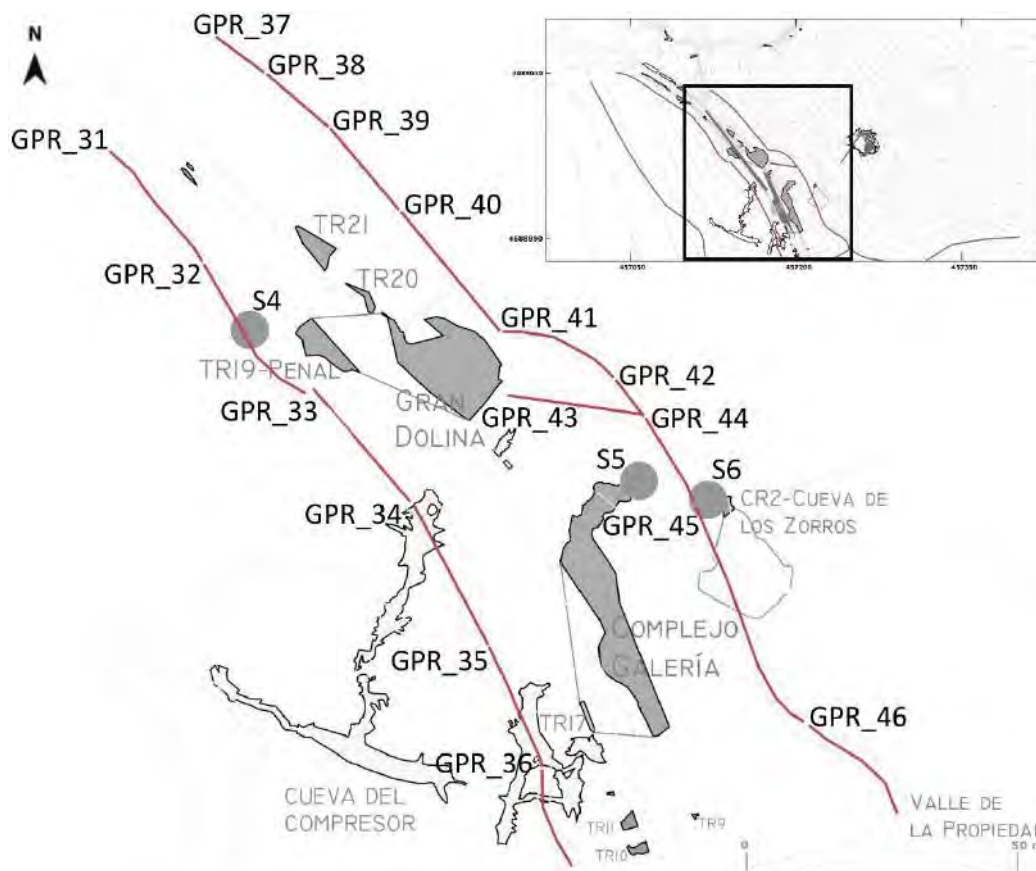


Figura 4.145. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR y los sondeos mecánicos realizados en torno a Gran Dolina-Penal, el Complejo Galería y la Cueva de los Zorros.

Los perfiles GPR\_31-GPR\_36, situados al oeste de la trinchera del ferrocarril, muestran una serie de reflexiones paralelas a la superficie que podrían corresponder a la estratificación de la roca caliza. En general, estas reflexiones presentan un carácter subhorizontal y solamente en el perfil GPR\_33 muestran una ligera pendiente aparente hacia el NO (figura 4.147).

La ausencia de reflexiones sólo puede asociarse a la presencia de sedimentos que atenúen la onda de radar en los perfiles GPR\_32 y GPR\_33, en los que esta falta de registro puede relacionarse con el relleno sedimentario del yacimiento de Penal (figuras 4.146 y 1.147). Comparado con el sondeo mecánico S4 (figura 4.27, pág. X), las reflexiones visibles en el primer metro de profundidad, corresponden al horizonte edáfico, mientras las interfases entre el resto de niveles limo-arcillosos y el nivel de caliza situado a apenas 4 m de profundidad no habrían generado ningún tipo de reflexiones. Otra de las características que permite identificar este relleno es el contacto vertical visible hacia los metros 12 de los perfiles GPR\_32 y GPR\_33 (figura 4.146), que acota un espacio coincidente con la anomalía conductiva asociada al yacimiento Penal del perfil ERT\_5 (figura 4.30, pág. X)

En el resto de perfiles, el análisis de la onda de radar indica que ésta no se encuentra especialmente atenuada, por lo que la ausencia de reflexiones indicaría la presencia de una caliza más compacta (figura 4.145).

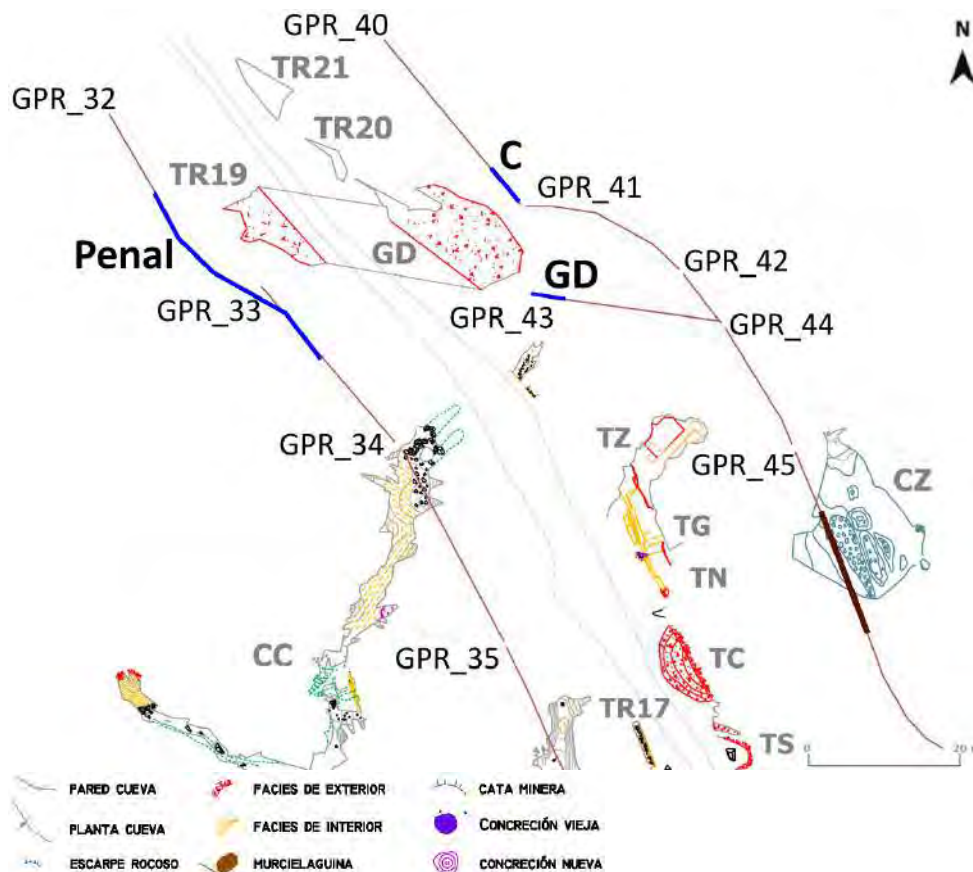


Figura 4.146. Mapa de detalle de los perfiles GPR32-GPR35 y GPR\_40-GPR\_45 y su relación con Gran Dolina-Penal, el Complejo Galería y la Cueva de los Zorros. GD indica Gran Dolina; TZ Covacha de los Zarpazos; TG Galería; TN Sima Norte; TC Sima Central; TS Sima Sur; CZ Cueva de los Zorros, y CC Cueva del Compressor. C representa la anomalía identificada en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1). Los trazos azules indican los rellenos sedimentarios identificados en estos perfiles y el trazo marrón el tramo aéreo.

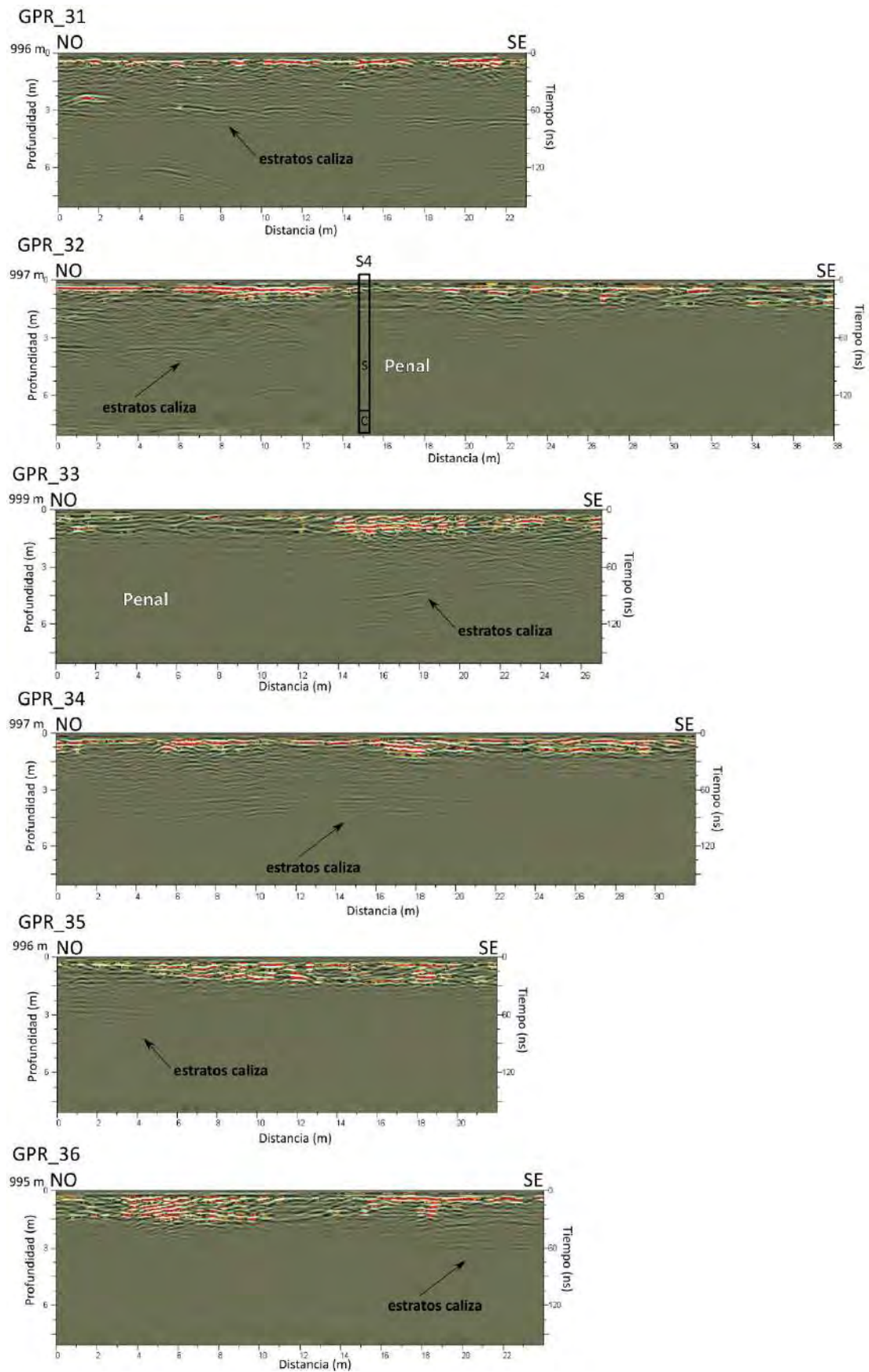


Figura 4.147. Perfiles GPR\_31-GPR\_36. En el sondeo mecánico S4, S indica sedimento y C caliza. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.



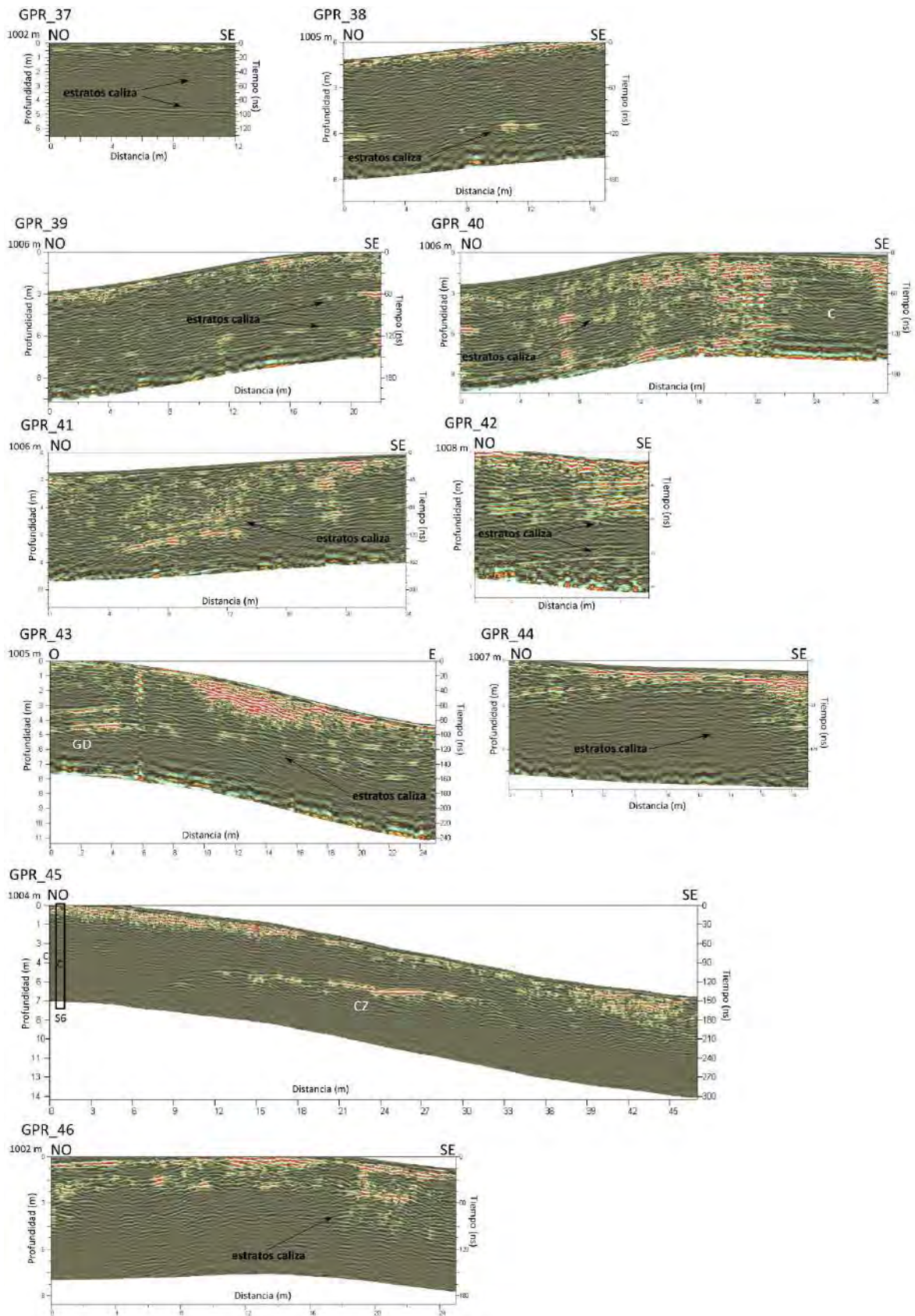


Figura 4.148. Perfiles GPR\_37-GPR\_46. GD indica Gran Dolina, CZ Cueva de los Zorros y C la anomalía identificada en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1). En el sondeo mecánico S6 C indica caliza. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.

Los perfiles situados al este de la trinchera del ferrocarril (GPR\_37-GPR\_46) muestran, asimismo, numerosas reflexiones subhorizontales que pueden relacionarse con las discontinuidades entre los estratos de la caliza (aunque es posible que algunas de las agrupaciones de reflexiones superficiales correspondan a las escombreras de cantera visibles en esta zona).

En cuanto a los espacios sin reflexiones debidos a la presencia de sedimentos, ha sido posible asociar el que se sitúa entre los metros 22 y 27 del perfil GPR\_40 (figuras 4.146 y 4.148) a la anomalía conductiva C, identificada en los perfiles ERT\_6, ERT\_7 y ERT\_M (figura 4.31, pág. X).

Por su parte, las reflexiones de gran amplitud situadas en los primeros 6 m del perfil ERT\_43 (figuras 4.146 y 4.148) podrían corresponder al conducto colmatado de Gran Dolina que, según las prospecciones de tomografía eléctrica, continúa en dirección NO-SE a partir de los 1000 m s.n.m. (Bermejo et al., 2017, anexo I.1).

Por último, la reflexión que se encuentra entre los metros 15 y 30 del perfil GPR\_45 (figura 4.148), corresponde al hueco de la cantera bajo techo de la Cueva de los Zorros, que fue rellenándose con los escombros de la cantera y que, en la actualidad, alcanza un máximo de 2 m de altitud en su interior (figura 4.149). Esta reflexión de gran amplitud ha sido generada por la interfase entre la roca caliza y el aire del espacio aéreo de la cantera, mientras que la interfase aire-escombros ha producido reflexiones de menor amplitud y continuidad. Por lo demás, llama la atención que esta reflexión se prolongue unos 5 m al sur del área topografiada (figura 4.146).



Figura 4.149. Cantera bajo techo de la Cueva de los Zorros. Se aprecian las huellas de cantera en la roca caliza y, en el suelo, los escombros que la rellenan.

#### 4.1.2.2.1.3 Nivel inferior

Los perfiles de GPR realizados sobre el nivel inferior del sistema de Trinchera se sitúan al oeste de las secciones TR19-TR30 y en límite oeste del karst (figuras 4.150 y 4.151).

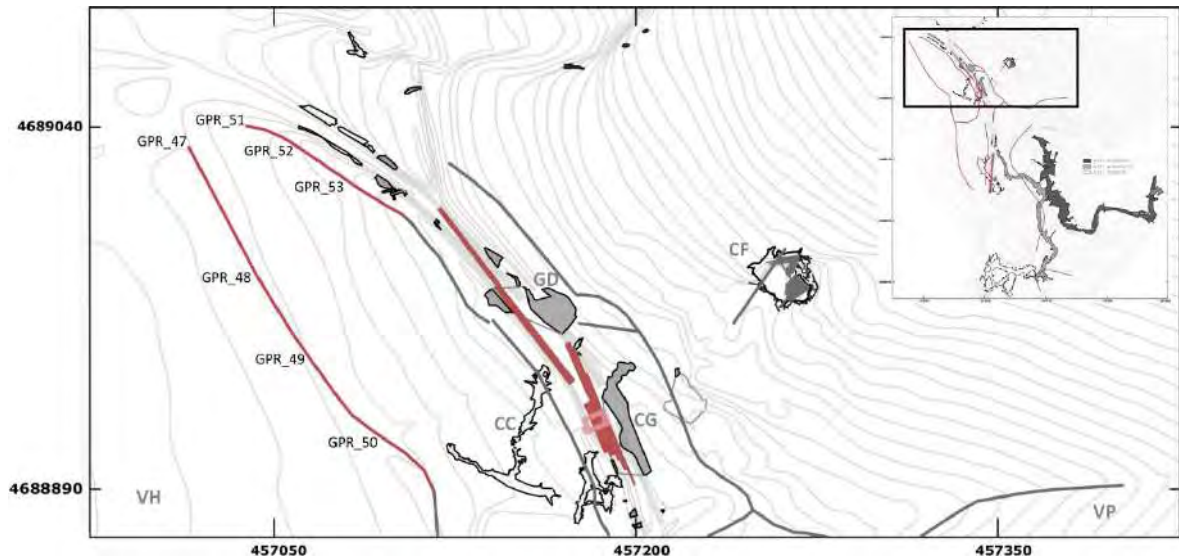


Figura 4.150. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel inferior del sistema de Trinchera (en rojo) y su relación con el resto de perfiles de GPR (en gris). Los polígonos rojos y rosa situados en la trinchera del ferrocarril representan el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1). CF indica Cueva Fantasma; VP Valle de la Propiedad; GD Gran Dolina; CG Complejo Galería; CC Cueva del Compresor, y VH Valle de Valhondo.

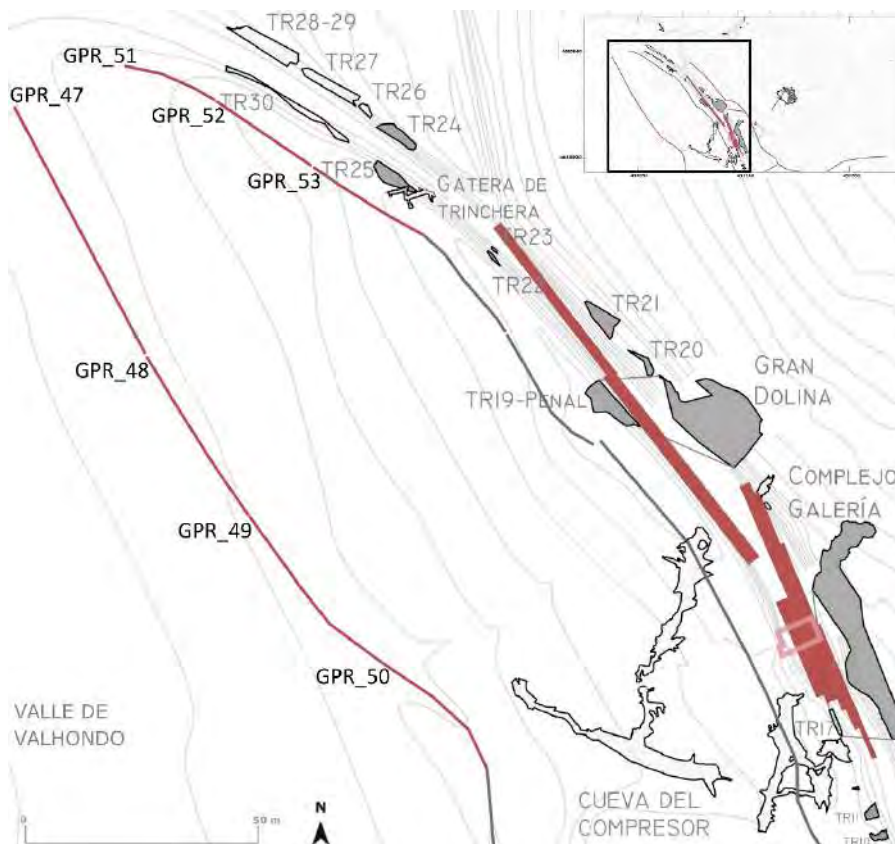


Figura 4.151. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel inferior del sistema kárstico de Trinchera.



La interpretación de los perfiles de GPR realizados en este sector resulta complicada, puesto que los datos presentan reflexiones de escasa amplitud (figura 4.152). No obstante, su comparación con los resultados obtenidos en las prospecciones de resistividad eléctrica ha permitido establecer, por un lado, los límites laterales entre los depósitos de coluvión y las calizas, y por otro, identificar posibles rellenos sedimentarios asociados al desarrollo del karst.

Los depósitos de coluvión descritos en este sector (Benito-Calvo y Pérez González, 2015), e identificados en los perfiles de ERT, presentarían una potencia de unos 5 m de espesor (pág. X, después de figura 4.39) de la que no se registran reflexiones, por lo que asumimos que estos sedimentos, que muestran unos valores muy conductivos, habrían atenuado la onda de radar antes de alcanzar dicha profundidad. Así pues, la extensión de estos depósitos sólo puede acotarse con respecto a los límites de las reflexiones correspondientes a los estratos de caliza. Estos límites, que presentan un carácter vertical, pueden apreciarse hacia el metro 32 del perfil GPR\_48, para el grupo de perfiles situado en el límite NE del karst (GPR\_47-GPR50), y el metro 3 del perfil GPR\_52, para el grupo de perfiles cercanos a la trinchera del ferrocarril (GPR\_51-GPR53) (figuras 4.151 y 4.152).

En otros términos, es posible relacionar la falta de reflexiones que se encuentra en el perfil GPR\_49, a partir del primer metro de profundidad, con la anomalía conductiva PS (figura 4.37, pág. X). Aunque la extensión de esta anomalía resulta difícil de determinar, parece que la discontinuidad que se encuentra hacia el metro 14 del perfil GRP\_49 podría marcar su límite sur, mientras que el límite norte podría ubicarse al inicio de este perfil (figuras 4.152 y 4.153).

Por otro lado, las reflexiones situadas entre los metros 20 y 29 del perfil GPR\_50, que forman una estructura en forma de U (figura 4.152), podrían relacionarse con la anomalía conductiva superficial CC, asociada a la entrada de la Cueva del Compresor (figura 4.37, pág. X). En este sentido, las reflexiones de mayor amplitud corresponderían a la interfase entre los sedimentos superficiales y la base caliza, ya que este relleno sedimentario presentaría unos de 2 m de potencia según los perfiles de ERT (pág. X, después de figura 4.42).

Por último, en el perfil GPR\_53 se aprecian dos zonas desprovistas de reflexiones que, por localización, podrían relacionarse con los conductos de la sección TR25 y la Gatera de Trinchera (GT) (figura 4.153). Estos rellenos se situarían a partir de los 990 m s.n.m. (figura 4.152), es decir, a cotas inferiores a TR25, pero superiores a la Gatera de Trinchera (figura 4.151), lo que indicaría una relación entre el nivel intermedio e inferior del karst a esta altura.

El estudio del nivel inferior del karst se completa con la malla de perfiles publicada en Bermejo et al., 2020 (anexo I.1), cuyos resultados indican que las cavidades de TR21, TR20, Gran Dolina-Penal y el Complejo Galería presentan asimismo un desarrollo hacia el nivel inferior del karst a la altura de la trinchera del ferrocarril (figura 1.153).

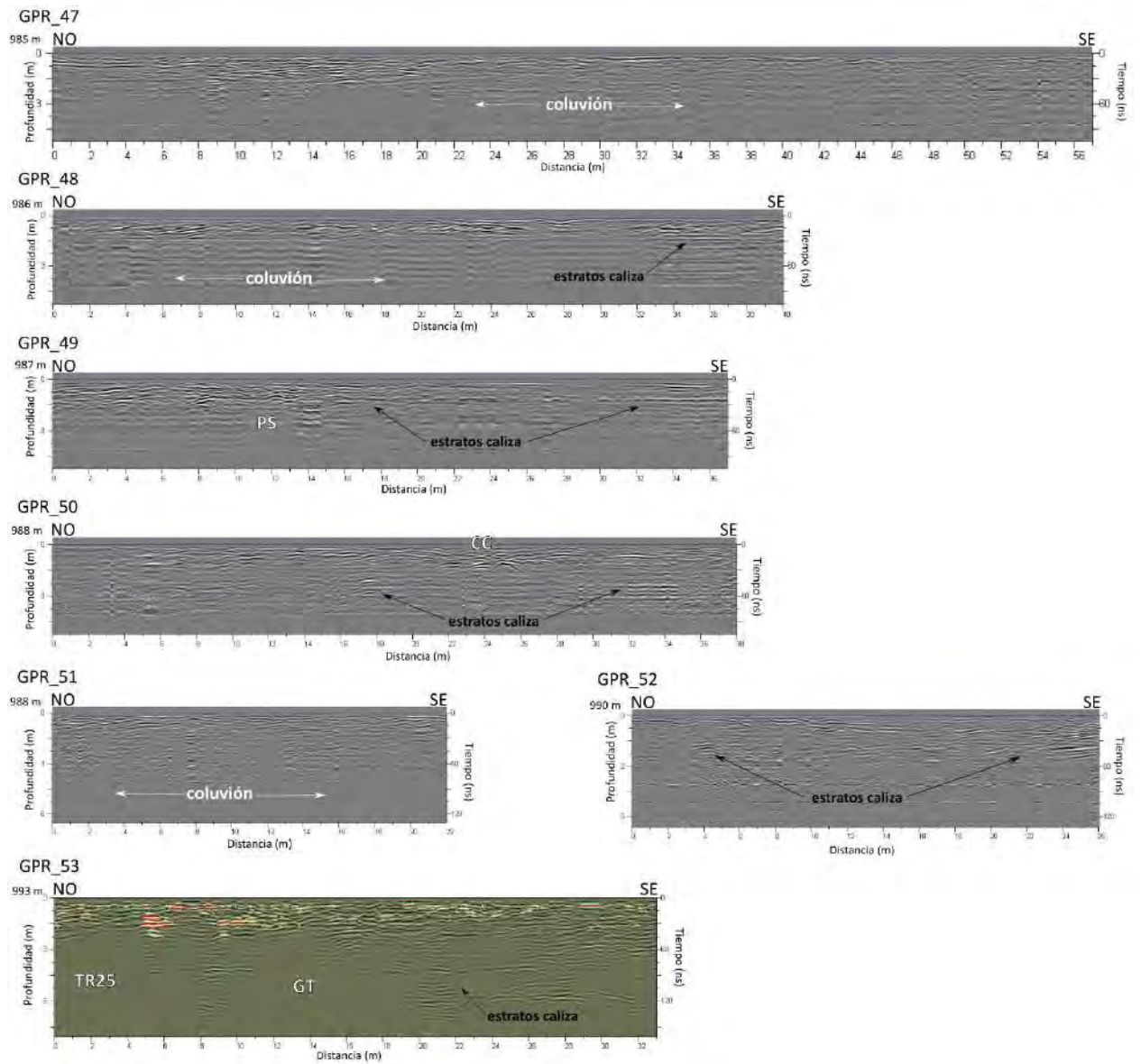


Figura 4.152. Perfiles GPR\_47-GPR\_53. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.



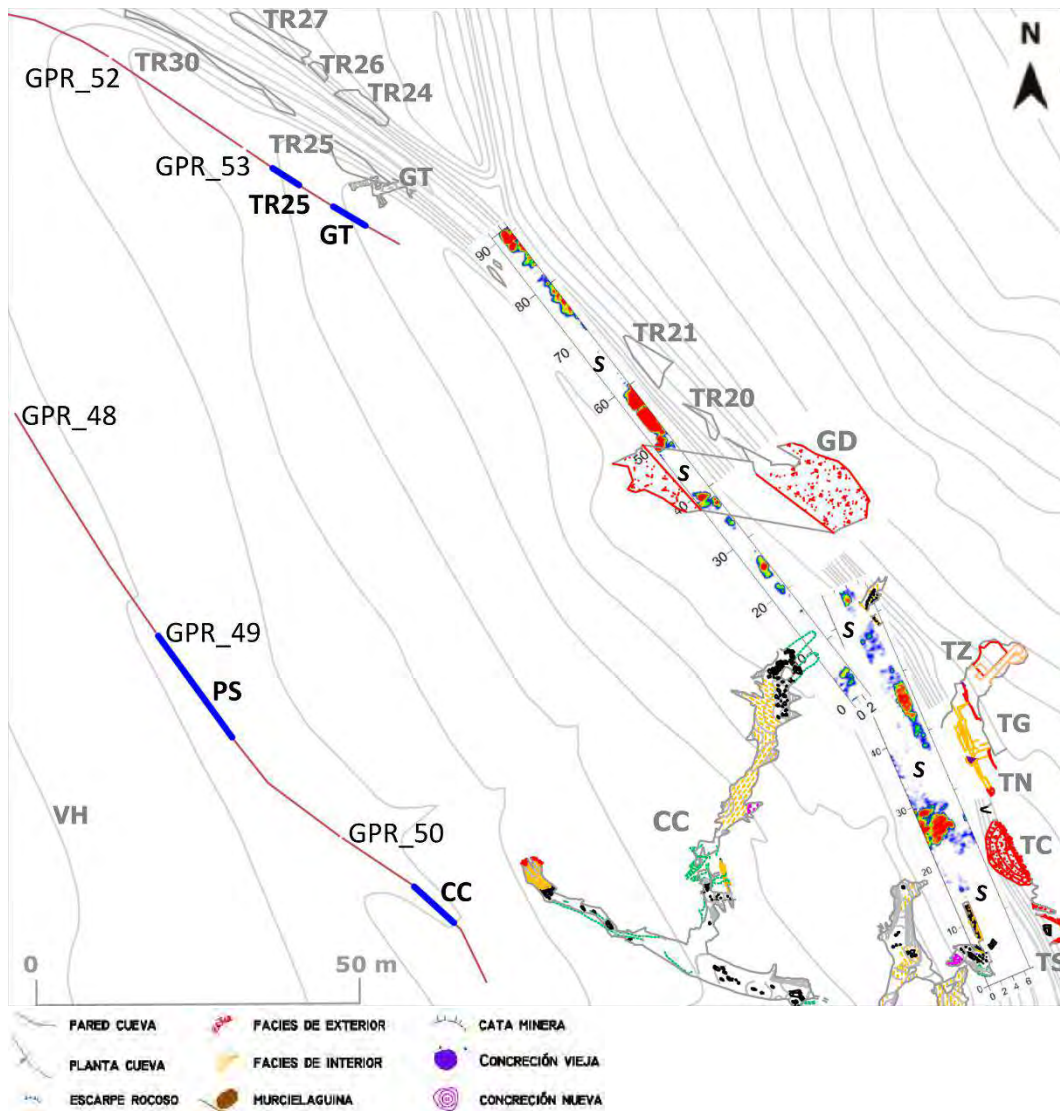


Figura 4.153. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_48-GPR\_52 en torno a los 985 m s.n.m. y su relación con las secciones TR19-TR30 y el límite NE del karst. GT indica Gatera de Trincheras; GD Gran Dolina; TG Galería; TN Sima Norte; TC Sima Central; TS Sima Sur; CZ Cueva de los Zorros, CC Cueva del Compressor, y VH Valle de Valhondo. Los trazos azules indican los rellenos sedimentarios identificados en estos perfiles. Los mapas de amplitud situados en la trinchera del ferrocarril representan el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1), en los que S indica los rellenos sedimentarios.

#### 4.1.2.2.2 Valle de la Propiedad

Los perfiles de GPR realizados sobre el Valle de la Propiedad comprenden los perfiles GPR\_54-GPR\_57 para el nivel superior del karst; los perfiles GPR\_58-GPR\_61 para el nivel intermedio, y los perfiles GPR\_62-GPR\_67 para el nivel inferior (figura 4.154).

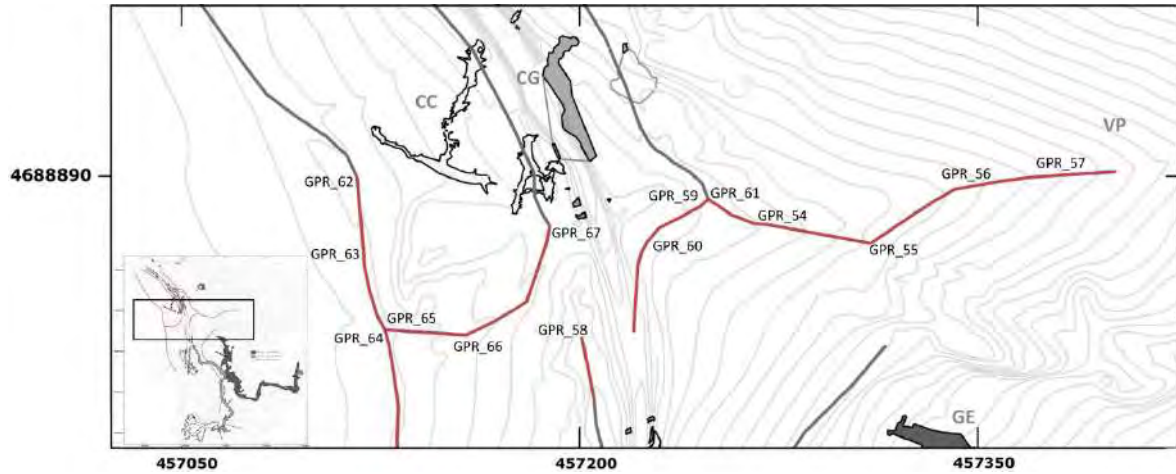


Figura 4.154. Localización de los perfiles de GPR realizados en el Valle de la Propiedad (en rojo). VP indica Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; CG Complejo Galería, y CC Cueva del Compresor.

##### 4.1.2.2.2.1 Nivel superior

El trazado de los perfiles GPR\_54-GPR\_57 discurre a lo largo del eje longitudinal del Valle de la Propiedad (figuras 4.155 y 4.156), a cotas propias del nivel superior del karst.

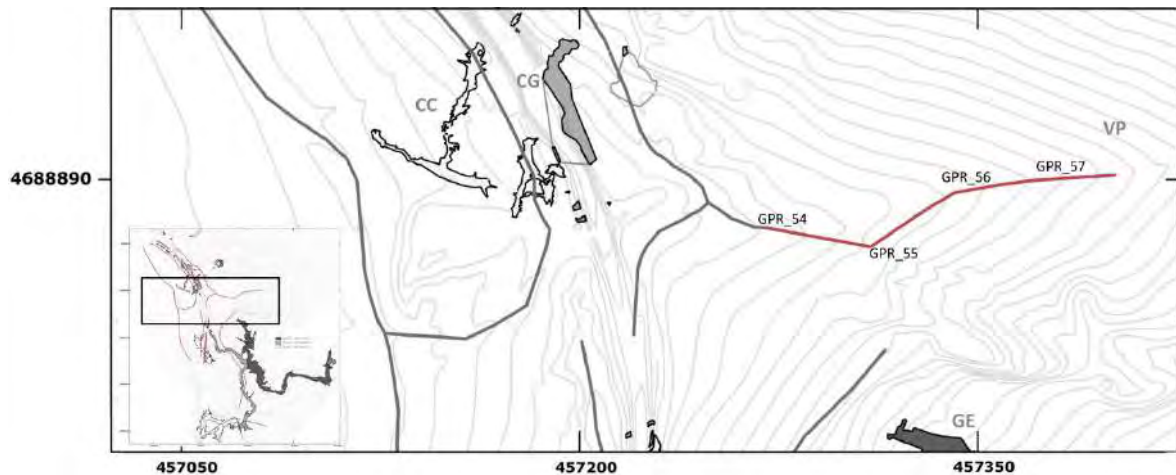


Figura 4.155. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel superior del Valle de la Propiedad (en rojo) y su relación con el resto de los perfiles de GPR (en gris). VP indica Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; CG Complejo Galería, y CC Cueva del Compresor.

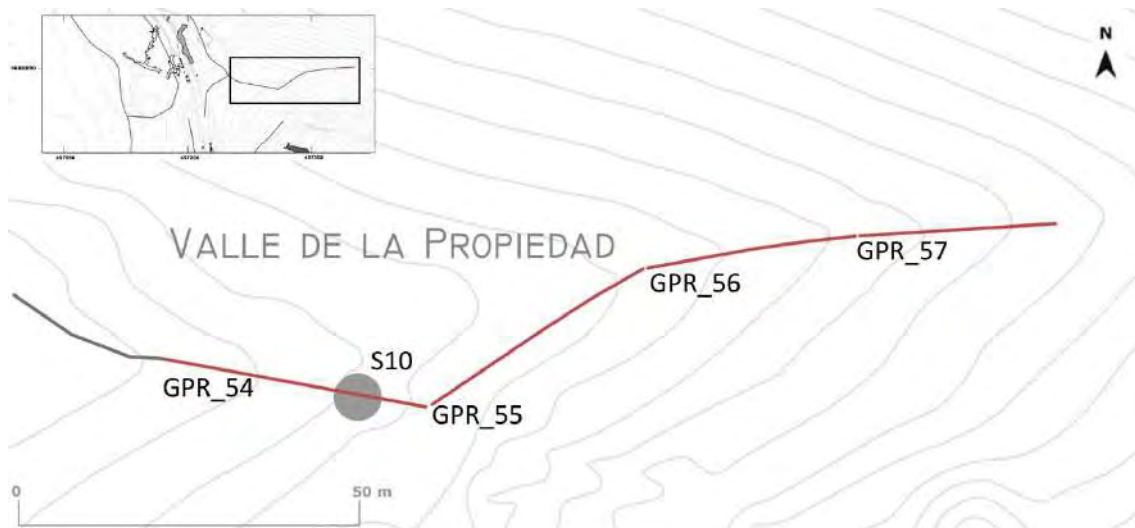


Figura 4.156. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR (en rojo) y el sondeo mecánico realizado en el Valle de la Propiedad a cotas del nivel superior del karst.

La interpretación de los datos registrados en los perfiles GPR\_54-GPR\_57 ha permitido establecer el límite entre las terrazas fluvial y erosiva del Valle de la Propiedad, que se caracteriza por mostrar un contacto vertical entre las reflexiones asociadas a los estratos de la roca caliza y las escasas reflexiones asociadas al relleno sedimentario del Valle de la Propiedad. Este contacto, que se sitúa hacia el metro 32 del perfil GPR\_54 (figura 4.157), coincide con los resultados aportados por el perfil ERT\_14 y los trabajos geomorfológicos (figura 4.48, pág. X).

La secuencia recuperada en el sondeo S10, que se sitúa unos pocos metros al oeste de este límite, indica que las ondas de radar han sido atenuadas rápidamente por el relleno del valle, ya que no son capaces de reflejar el paquete de caliza situado a unos 5 m de profundidad (figuras 4.157 y 4.49, pág. X). Por esta misma razón, en estos perfiles no se registran reflexiones que permitan establecer la potencia sedimentaria de la terraza fluvial que, según los resultados de ERT, debería presentar unos 3 m profundidad (figura 4.47, pág. X).

En este sentido, tampoco es posible determinar la profundidad del relleno sedimentario asociado a la anomalía conductiva VP3 (figura 4.47, pág.X), que es reconocible entre los metros 34 y 36 del perfil GPR\_54, a partir del primer metro de profundidad (figura 4.157).

Por último, cabe destacar la claridad con la que se reflejan en estos perfiles algunos de los estratos de caliza, cuyo trazado puede incluso continuarse de un perfil a otro. Esta nitidez, ha permitido estimar la pendiente aparente de la estratificación, que muestran una media de unos 8° hacia el oeste.

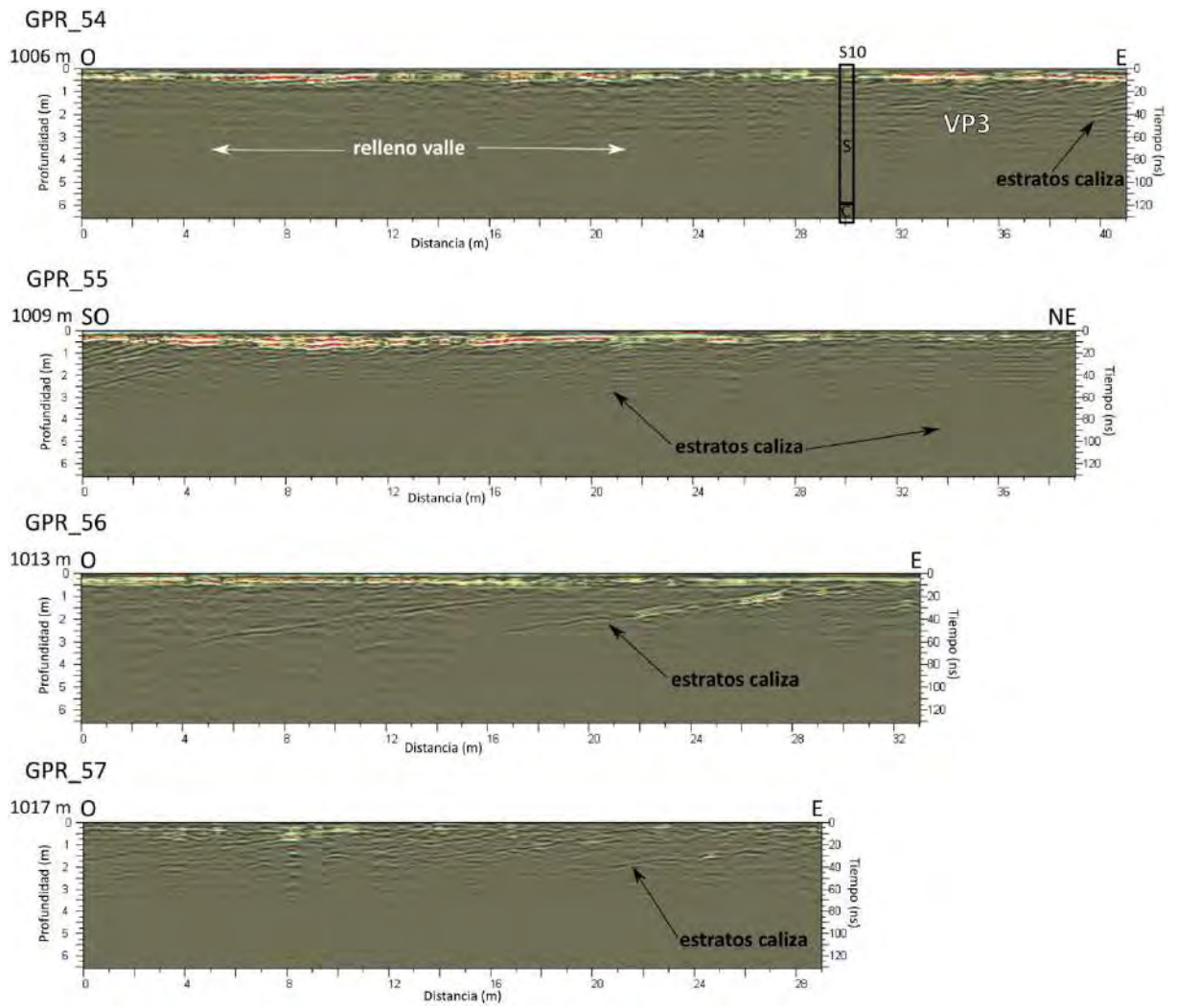


Figura 4.157. Perfiles GPR\_54-GPR\_57. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie. En el sondeo mecánico S10, S indica sedimento y C caliza.



#### 4.1.2.2.2 Nivel intermedio

Los perfiles GPR\_58-GPR\_61 definen los límites del Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst (figuras 4.158, 4.159 y 4.160).

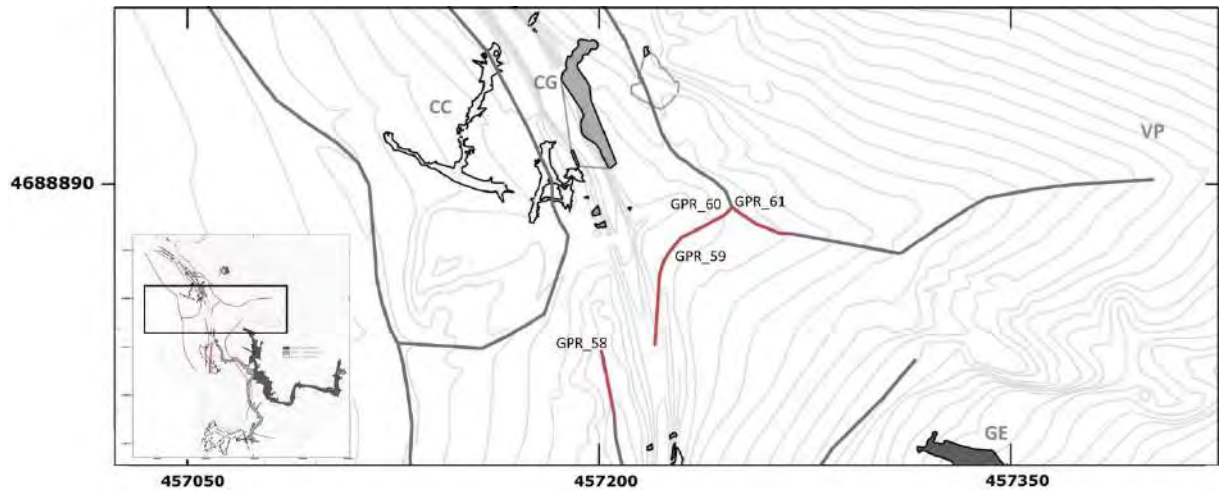


Figura 4.158. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre el Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst (en rojo) y su relación con el resto de los perfiles de GPR (en gris). VP indica Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; CG Complejo Galería, y CC Cueva del Compressor.

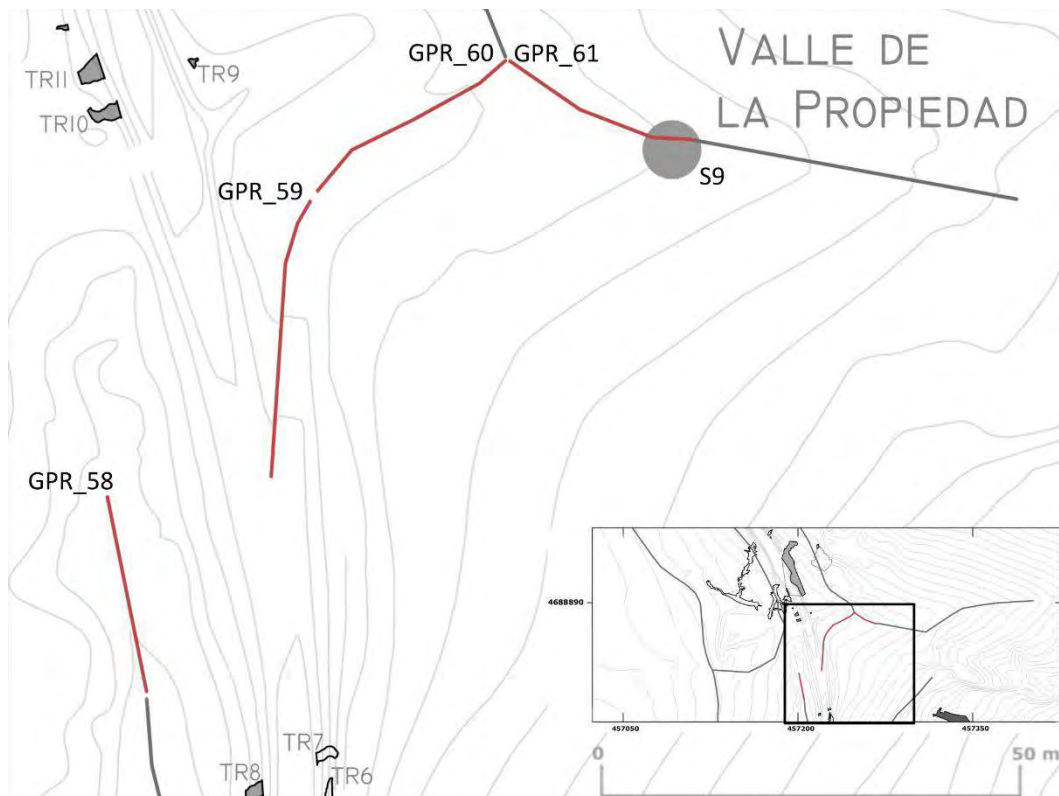


Figura 4.159. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR (en rojo) y el sondeo mecánico realizado en el Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst.



A cotas del nivel intermedio del karst, el límite sur del Valle de la Propiedad está definido únicamente por el perfil GPR\_58, que muestra, hacia el metro 18, un contacto entre las reflexiones asociadas a los estratos de la caliza (hacia el sur) y el inicio de un área sin apenas reflexiones (hacia el norte) atribuido a la presencia de sedimentos conductivos (figura 4.161). Especialmente, este límite coincide con el final del desarrollo kárstico marcado por el conducto TR7-TR8 (figura 1.160) y con los datos aportados por los perfiles de ERT (figura 4.54, pág. X).

En los perfiles realizados al este de la trinchera del ferrocarril, estas mismas características han permitido identificar el contacto entre la terraza fluvial y la terraza erosiva del valle, que se sitúa entre el metro 24 del perfil ERT\_60 y el metro 12 del perfil ERT\_61, aproximadamente (figura 4.161), creando un límite de dirección E-O (figura 4.160). Así, al contrario que en el nivel superior del karst, este contacto mostraría un carácter longitudinal con respecto al eje del valle.

Al igual que sucedía en el nivel superior del karst, tampoco es posible determinar en estos perfiles la profundidad del relleno del valle, debido a que los sedimentos fluviales habrían atenuado la onda de radar en los primeros metros de profundidad.

Por otro lado, entre el metro 3 del perfil GPR\_59 y el metro 5 del perfil GPR\_60, aproximadamente, puede apreciarse un grupo de reflexiones de gran amplitud que muestran las mismas características que los estratos de la roca caliza (figura 4.161). Puesto que estas reflexiones, que definen una estructura de 9 m de longitud y al menos 5 m de espesor, se situarían dentro de la terraza fluvial (figura 4.160) podrían corresponder a uno de los bloques de gran tamaño que se observan en el perfil de la trinchera del ferrocarril, a la altura del Valle de la Propiedad (figura 1.X, pág. X).

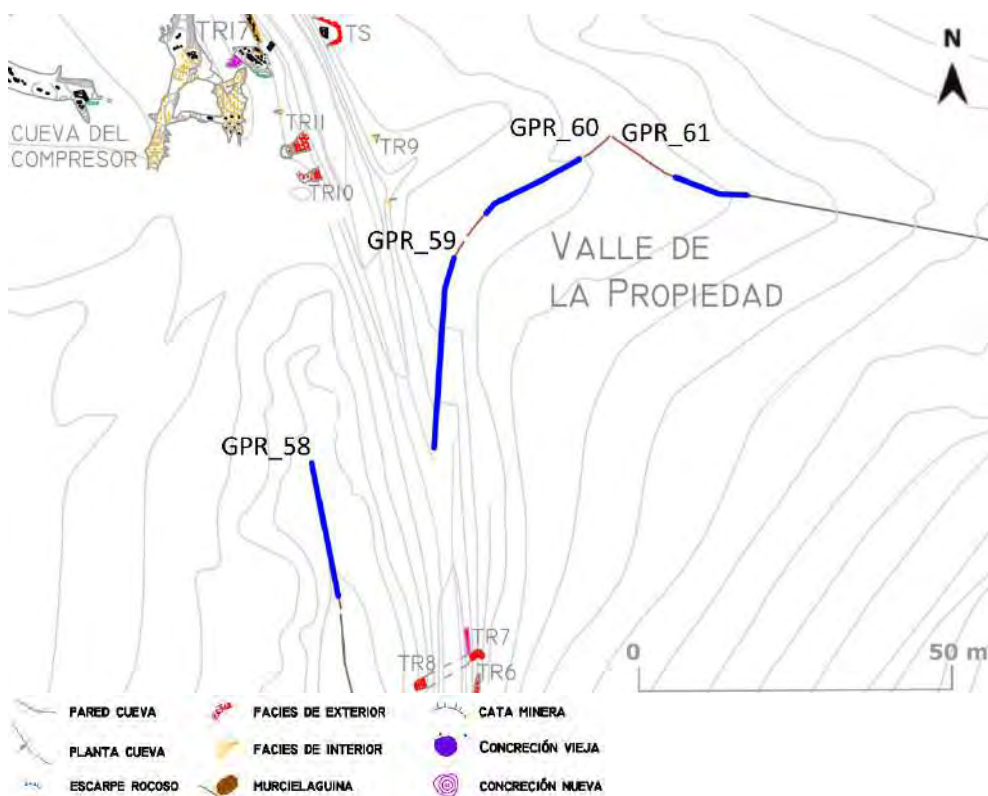


Figura 4.60. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_58-GPR\_61 y su relación con el Valle de la Propiedad a cotas del nivel intermedio del karst. Los trazos azules indican la extensión del relleno del valle identificado en estos perfiles.

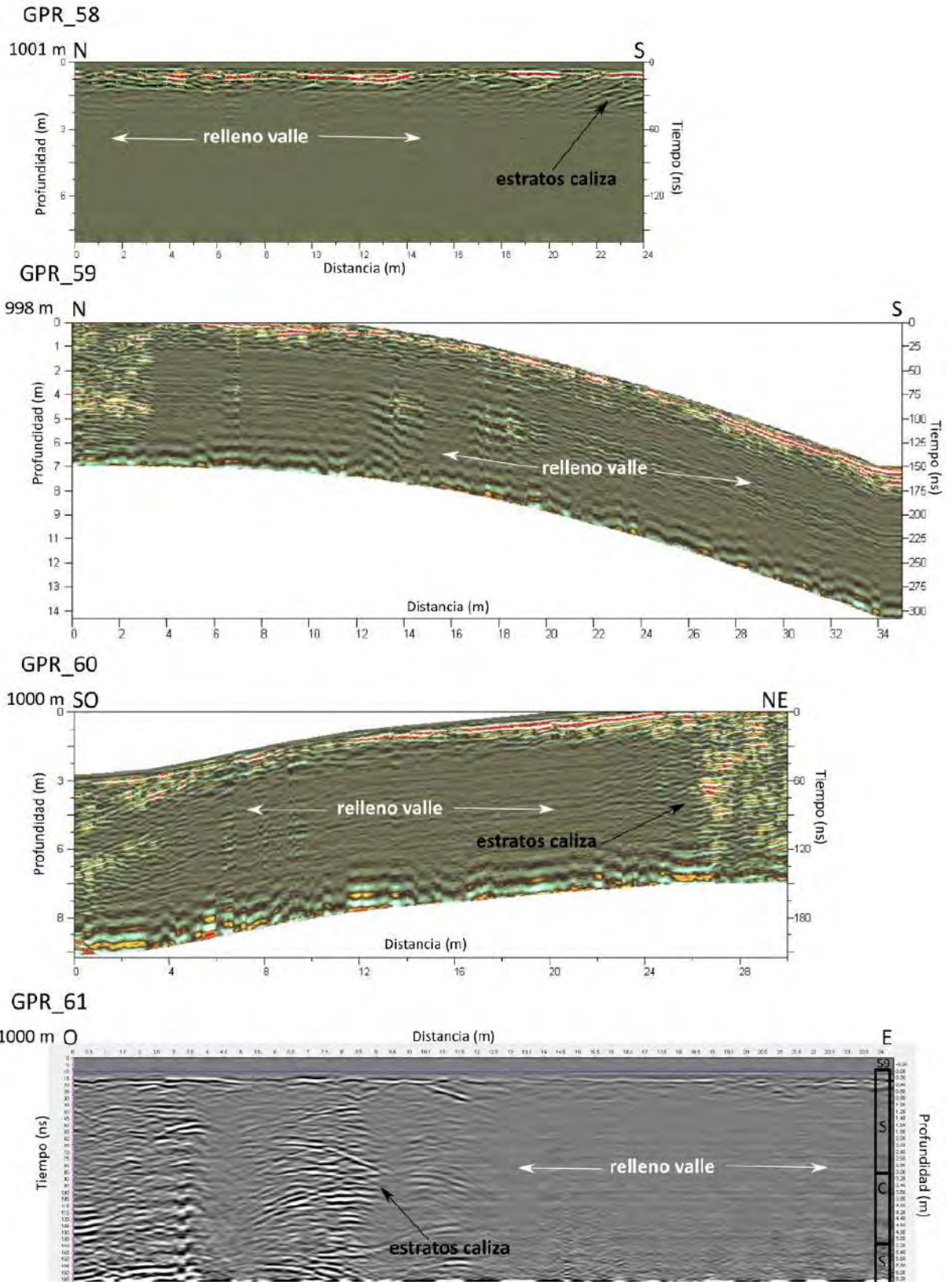


Figura 4.161. Perfiles GPR\_58-GPR\_61. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie. En el sondeo mecánico S9, S indica sedimento y C caliza.

#### 4.1.2.2.3 Nivel inferior

Los perfiles GPR\_62-GPR\_67 definen el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst (figuras 4.162, 4.163 y 4.164).

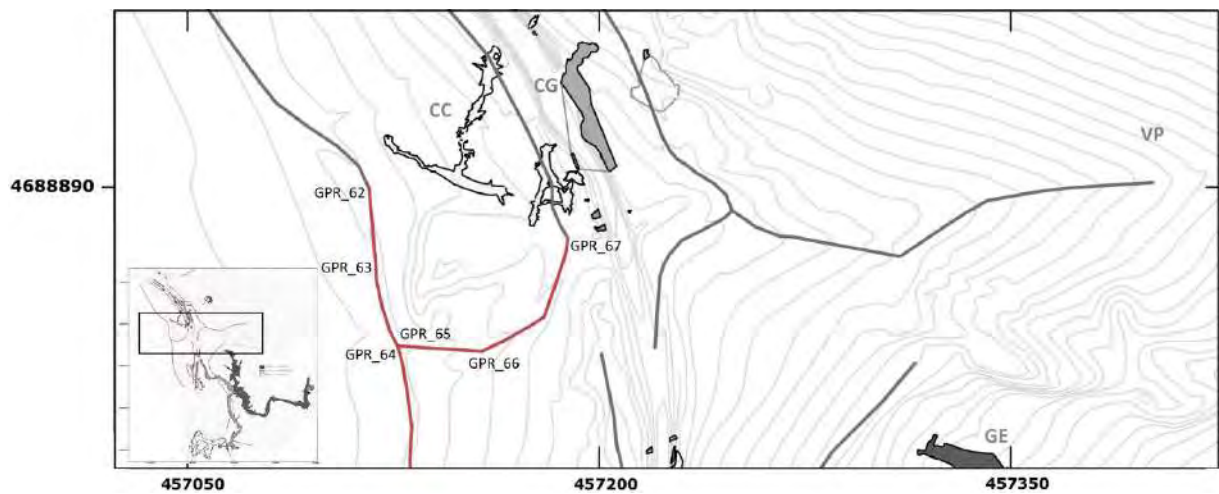


Figura 4.162. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst (en rojo) y su relación con el resto de perfiles de GPR (en gris). VP indica Valle de la Propiedad; GE Galería de las Estatuas; CG Complejo Galería, y CC Cueva del Compresor.



Figura 4.163. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR (en rojo) realizados en el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst.

Los perfiles situados sobre el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst muestran escasas reflexiones, lo que complica su interpretación. Tan sólo las reflexiones situadas hacia el metro 9 del perfil GPR\_62 y el metro 5 del perfil GPR\_67 (figura 4.165) podrían asociarse a los estratos de la roca caliza, marcando el límite norte del valle (figura 4.164). Por su parte, las reflexiones localizadas hacia el metro 7 del perfil GPR\_85 (figura 4.165), que se distinguen con mayor nitidez, marcarían su límite sur (figura 4.164).

El resto de reflexiones superficiales presentes en estos perfiles, que apenas superan el primer metro de profundidad (figura 4.165), corresponderían, por lo tanto, al relleno sedimentario del valle. Sin embargo, no ha sido posible identificar ninguna característica, más allá de la capacidad de estos sedimentos para atenuar la onda de radar, que permita aportar más información con respecto a este relleno sedimentario, ni siquiera que permita diferenciar las dos unidades sedimentarias identificadas en los perfiles de ERT (figura 4.62, pág. X).

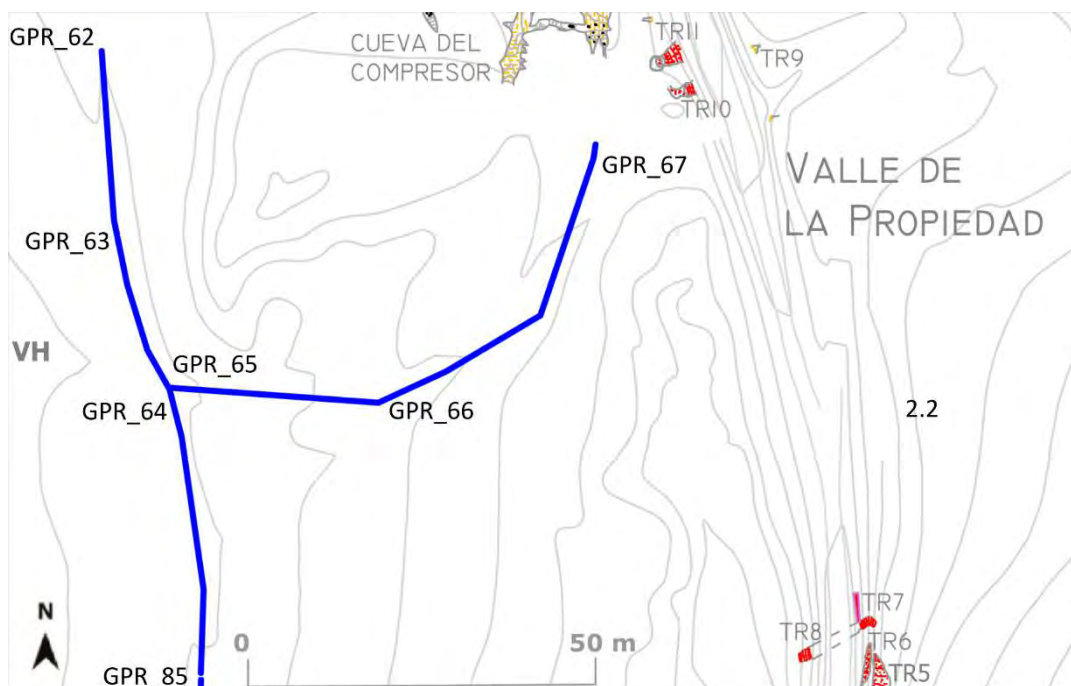


Figura 4.64. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_62-GPR\_67 y su relación con el Valle de la Propiedad a cotas del nivel inferior del karst. Los trazos azules indican la extensión del relleno del valle identificado en estos perfiles.



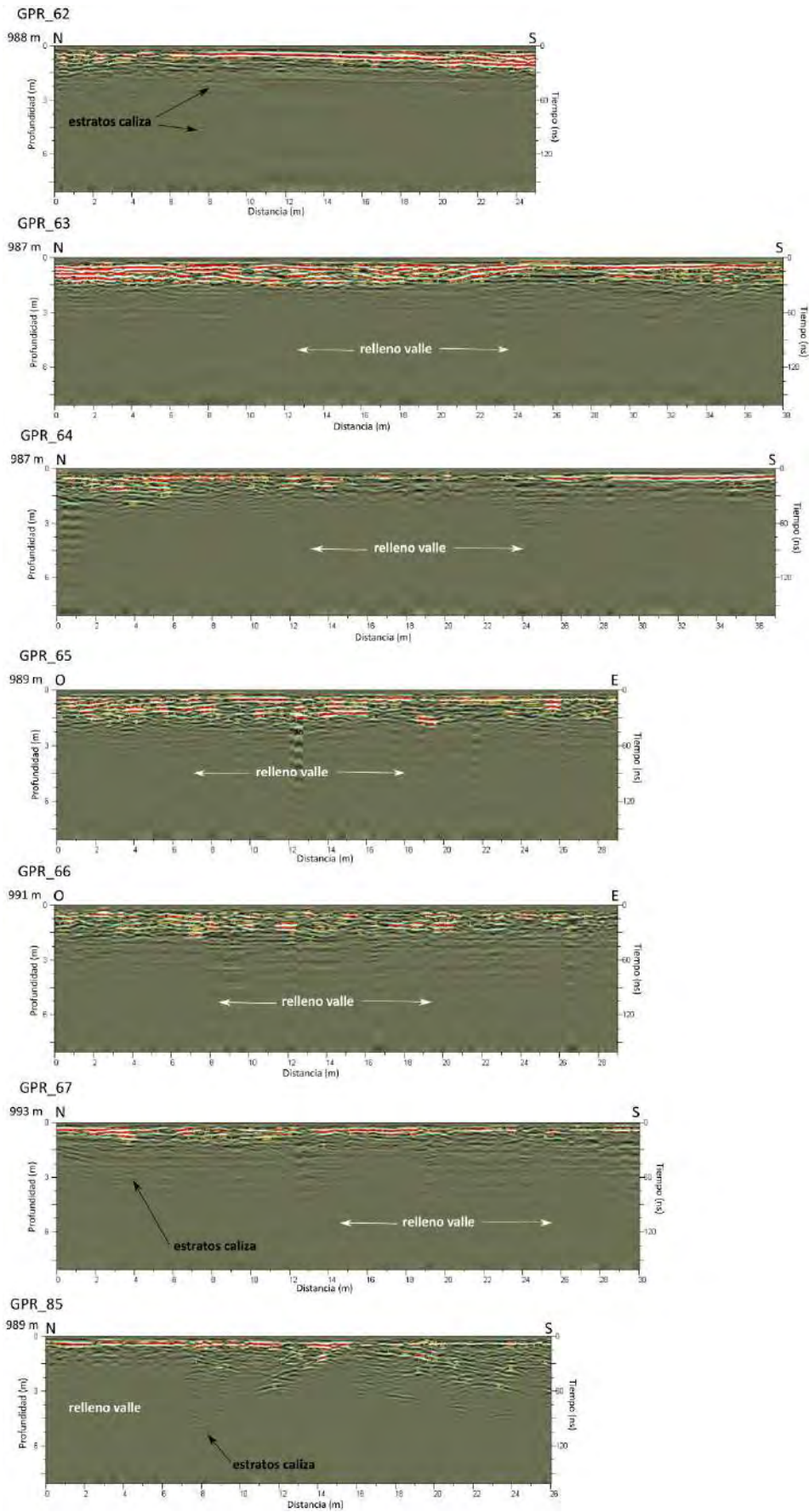


Figura 4.165. Perfiles GPR\_62-GPR\_67 y GPR\_85. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.



#### 4.1.2.2.3 Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo

Los perfiles de GPR realizados al sur del Valle de la Propiedad, en el sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo, comprenden los perfiles GPR\_68-GPR\_79 para el nivel superior del karst, GPR\_80-GPR\_84 para el nivel intermedio y GPR\_85-GPR\_89, junto con la malla publicada en Bermejo et al., 2020 (anexo I.1), para el nivel inferior (figura 4.166).

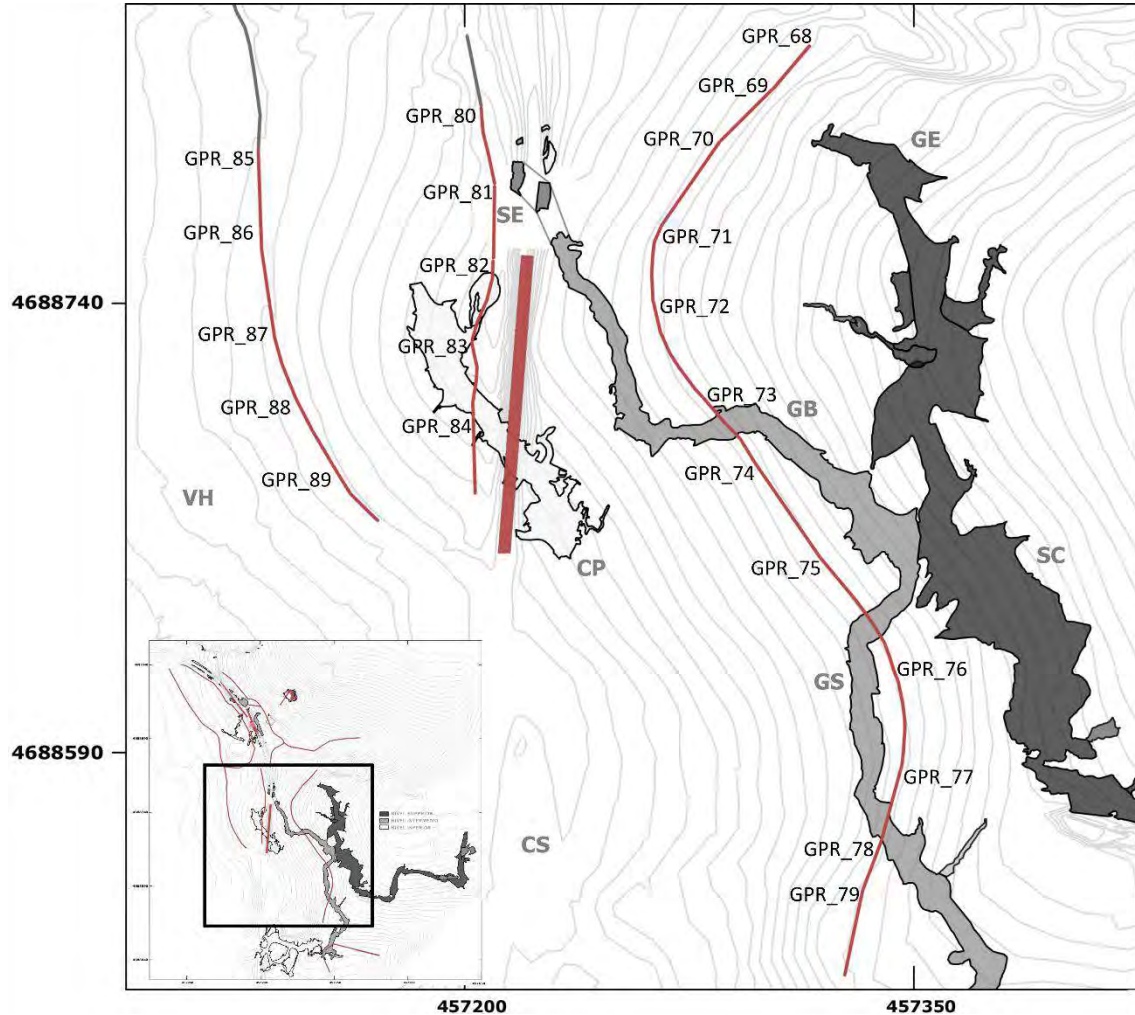


Figura 4.166. Localización de los perfiles de GPR realizados en el sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo. El polígono rojo representa el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.

#### 4.1.2.2.3.1 Nivel superior

Los perfiles de GPR realizados en el nivel superior del sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo, cuyo trazado discurre a lo largo del camino de la Roza (figura 4.167), abarcan varios sectores: los perfiles GPR\_68-GPR\_74 definen la entrada de Galería de las Estatuas y un área del nivel superior del karst relacionada con el conducto del nivel intermedio de Galería Baja, y los perfiles GPR\_75-GPR\_79 definen un área situada sobre el conducto de Galería del Silo, pero a cotas del nivel superior del karst.

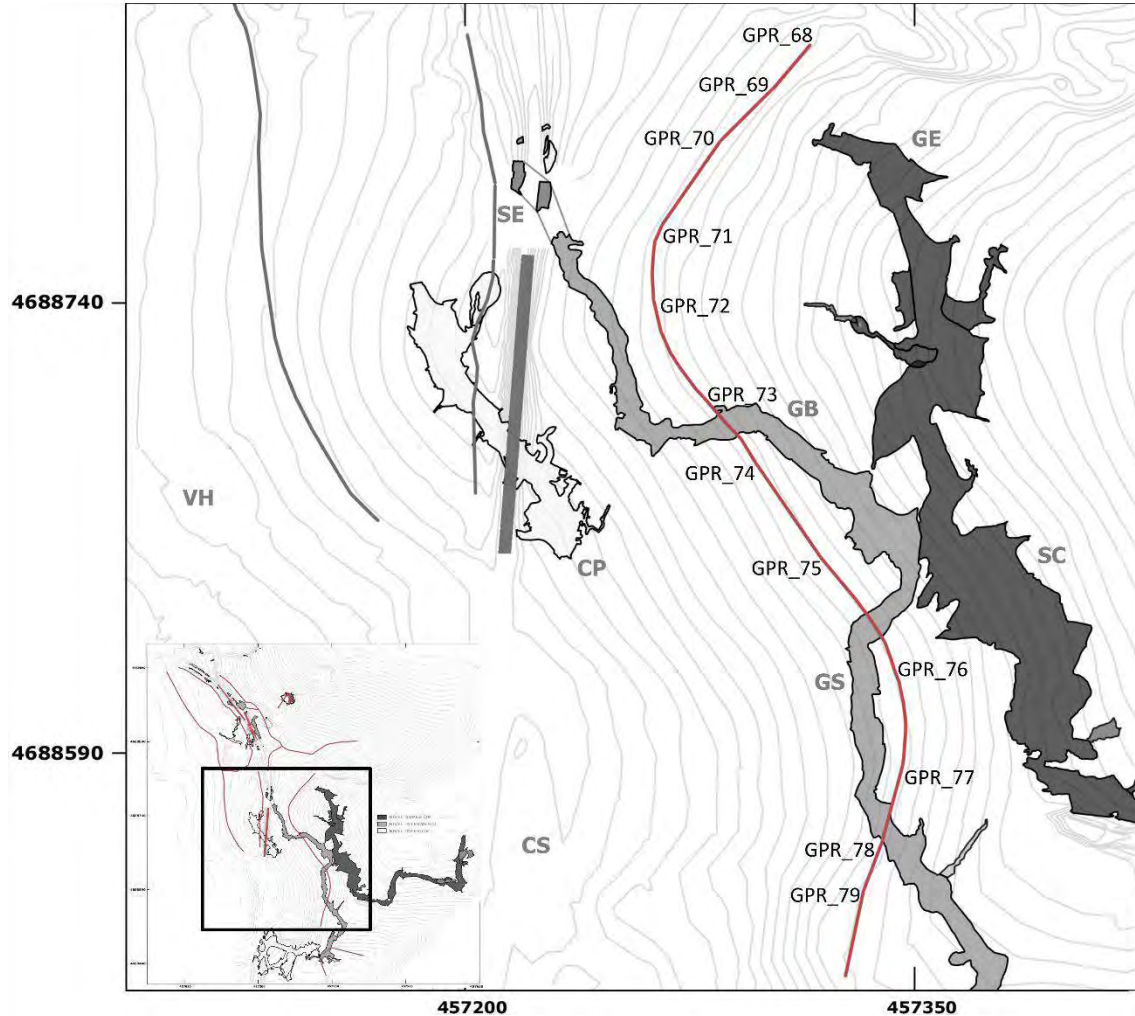


Figura 4.167. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel superior del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo (en rojo) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.

- Perfiles GPR\_68-GPR\_75

Los perfiles GPR\_68-GPR\_75, que se sitúan entre la Galería de las Estatuas y la Galería Baja, han podido ser interpretados en detalle gracias a su comparación con los resultados aportados por los perfiles de ERT (apartado 4.1.2.1.3.1), los sondeos mecánicos con recuperación de testigo S11, S13, S14 y los sondeos manuales S15 y S16 (figura 4.168), cuya descripción litológica puede consultarse en las figuras 4.70 (pág. X) y 4.87 (pág. X), respectivamente.

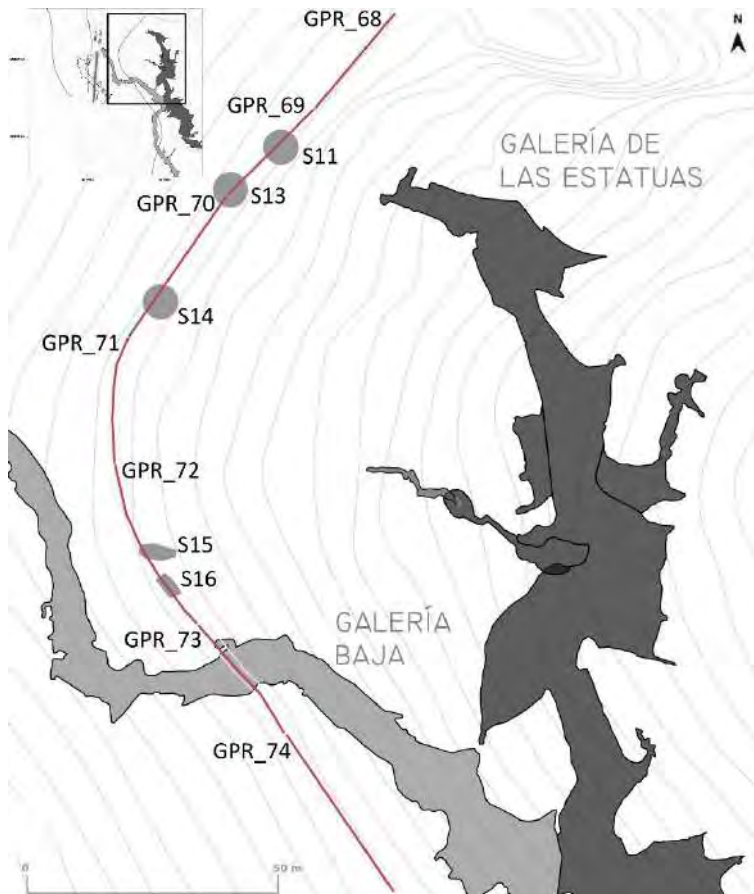


Figura 4.168. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR y los sondeos mecánicos realizados entre la Galería de las Estatuas y la Galería Baja.

La entrada colmatada de sedimentos de Galería de la Estatuas está definida por el perfil GPR\_69 (figura 4.169) que muestra, hacia el metro 9, un límite vertical entre las reflexiones asociadas a los estratos de caliza y la falta de reflexiones relacionada con los rellenos sedimentarios (figura 4.170). La extensión de esta discontinuidad, que comenzaría al inicio de este perfil, coincide con la anchura que muestra el conducto de Galería de las Estatuas en su extremo NO (figura 4.169). El sondeo S11, realizado sobre este perfil, confirma que esta falta de reflexiones se debe a que los sedimentos endokársticos atenúan la onda de radar, puesto que ésta no llega a generar una reflexión de suelo calizo de la cueva, que se sitúa a apenas 5 m de profundidad (figura 4.170). Por su parte, el sondeo S13, que recuperó únicamente caliza, confirma que las reflexiones de mayor amplitud que se encuentran en estos perfiles corresponden a las interfaces en la estratificación de la roca caliza.

Estos límites verticales entre sedimentos y caliza han permitido, asimismo, relacionar la falta de reflexiones que se encuentra entre los metros 20 y 26 del perfil GPR\_70, aproximadamente, con la anomalía conductiva R1 (figuras 4.169 y 4.170). El sondeo S14 reveló, además, que la onda de radar tuvo que atenuarse antes de los 3 m, ya que no se registran reflexiones del paquete de caliza de más de 1 m de espesor que se encuentra a partir de esa profundidad (figura 4.170).

De igual manera, es posible reconocer la anomalía conductiva SGB, cuyos límites pueden apreciarse hacia los metros 6 y 27 del perfil GPR\_72 (figuras 4.169 y 4.170). Esta anomalía, que está asociada al relleno de un conducto paralelo a Galería Baja, pero situado a cotas del nivel superior del karst, presentaría, según los perfiles de ERT, unos 5 m de profundidad, pero, como en otras ocasiones, las ondas de radar han debido ser atenuadas por estos sedimentos ya que no se registran reflexiones de su base. En este sentido, llaman la atención las reflexiones de gran amplitud que se reflejan hacia el metro 20 de este perfil y que se encontrarían, por profundidad, dentro de este relleno sedimentario

(figura 4.170). Puesto que los sondeos manuales S15 y S16 revelaron una costra estalagmática de más de 50 cm de espesor, es posible que estas reflexiones correspondan a una estructura de este estilo.

Por último, cabe destacar que, en los perfiles GPR\_85-GPR\_71, los límites estratigráficos de la caliza muestran una pendiente aparente hacia el SO, mientras que a partir del metro 18 del perfil GPR\_71 los estratos muestran un carácter subhorizontal. Este cambio en la inclinación de los estratos coincide con una reflexión que muestra una pendiente hacia en NE (figura 4.170), que conforma una estructura con forma de U (indicada como ? en el perfil GPR\_71) que no ha podido relacionarse con los resultados de los perfiles de ERT.

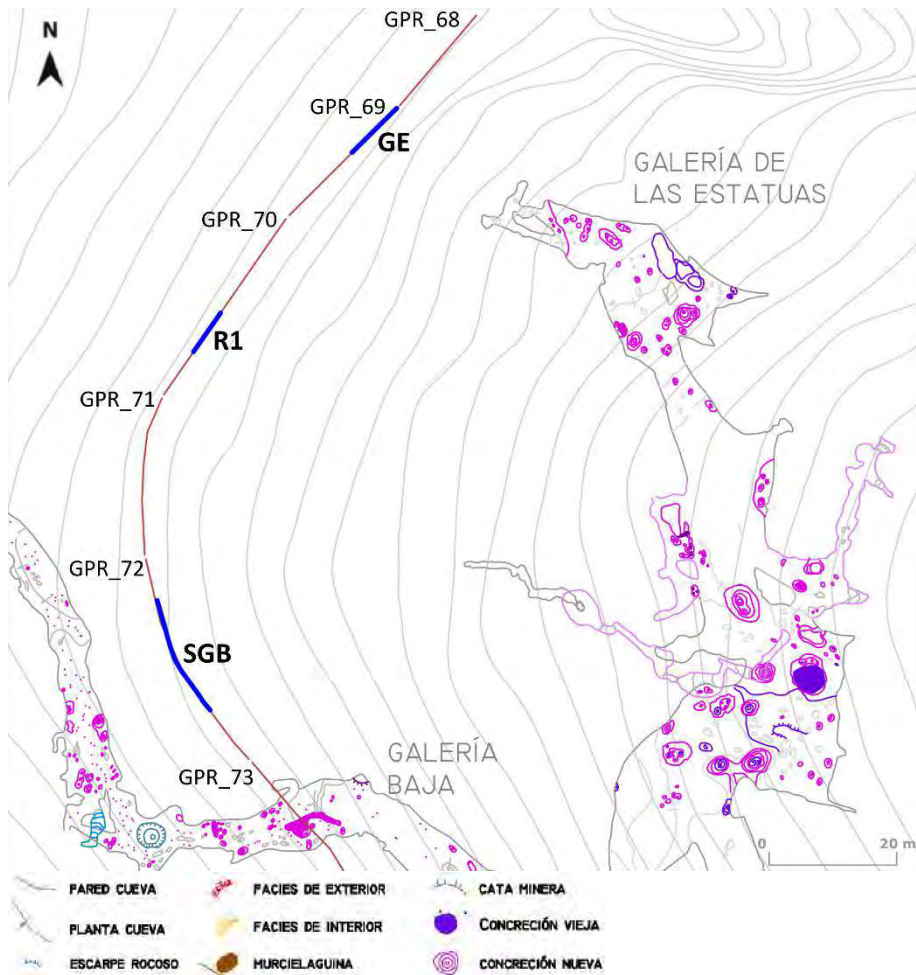


Figura 4.169. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_58-GPR\_73 en torno a los 1015 m s.n.m. y su relación con Galería de las Estatuas y Galería Baja. Los trazos azules indican los rellenos sedimentarios identificados en estos perfiles.



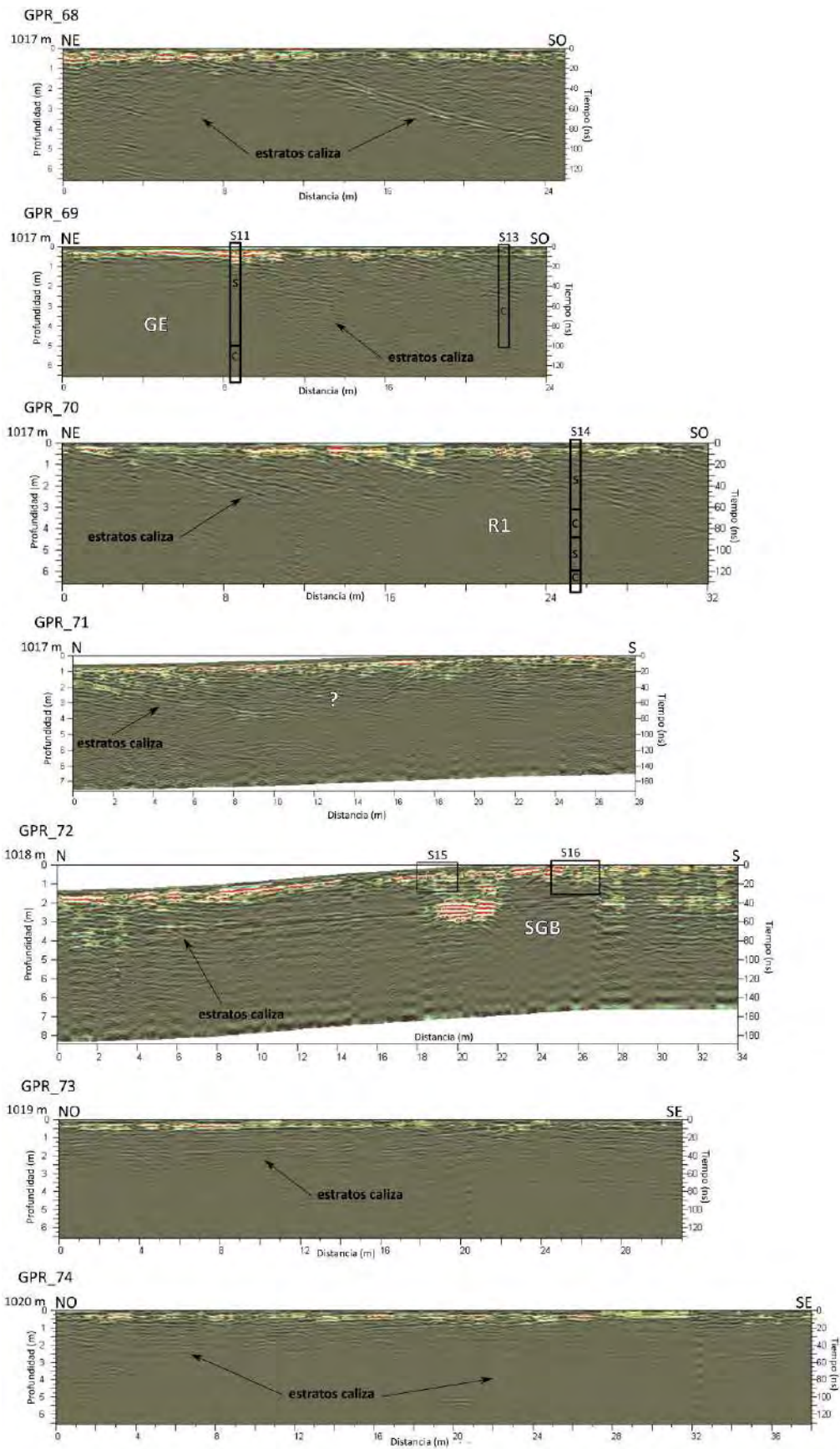


Figura 4.170. Perfiles GPR\_68-GPR\_74. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie. En los sondeos mecánicos S11, S13 y S14 S indica sedimento y C caliza.

- Perfiles GPR\_75-GPR\_79

Los perfiles GPR\_75-GPR\_79, que siguen el camino de la Roza a cotas de 1020 m s.n.m. (figura 4.171), muestran los mismos contactos verticales descritos con anterioridad que permiten distinguir los límites superficiales de los rellenos sedimentarios.

Así, los límites que se observan hacia el metro 17 del perfil GPR\_76 y el metro 2 del perfil GPR\_77, marcan la extensión de una zona con pocas reflexiones (figuras 4.172 y 4.173) que coincide, *grosso modo*, con la anomalía R2 identificada en los perfiles de ERT (figura 4.89, pág. X) y que está relacionada con un depósito de conglomerados.

De la misma manera, entre los metros 13 del perfil GPR\_78 y 3 del perfil GPR\_79 se aprecia otra área desprovista de reflexiones que se corresponde con la anomalía conductiva R3 (figuras 4.172 y 4.173).

En cuanto a la inclinación de los estratos de la caliza, estos muestran un carácter subhorizontal en el perfil GPR\_75 y una pendiente aparente hacia el sur a partir del perfil GPR\_77.

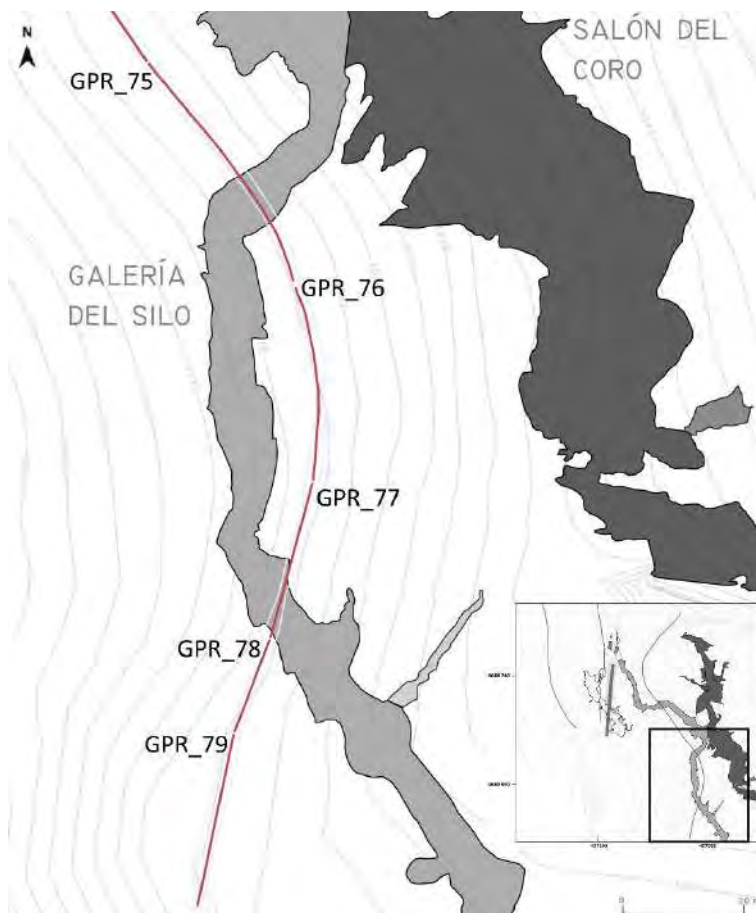


Figura 4.171. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR realizados sobre el camino de la Roza, a unos 1020 m s.n.m.

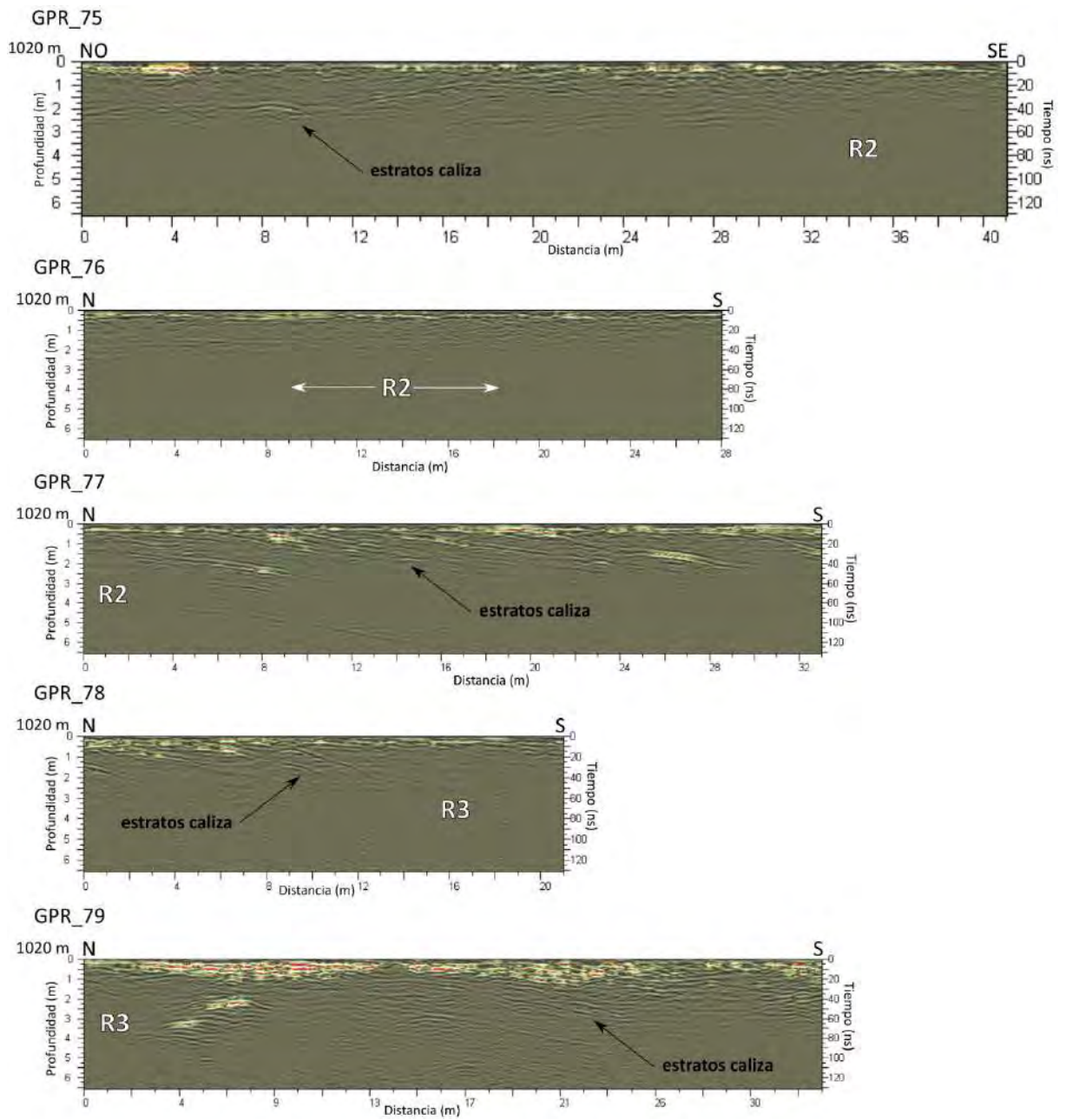


Figura 4.172. Perfiles GPR\_75-GPR\_79. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.



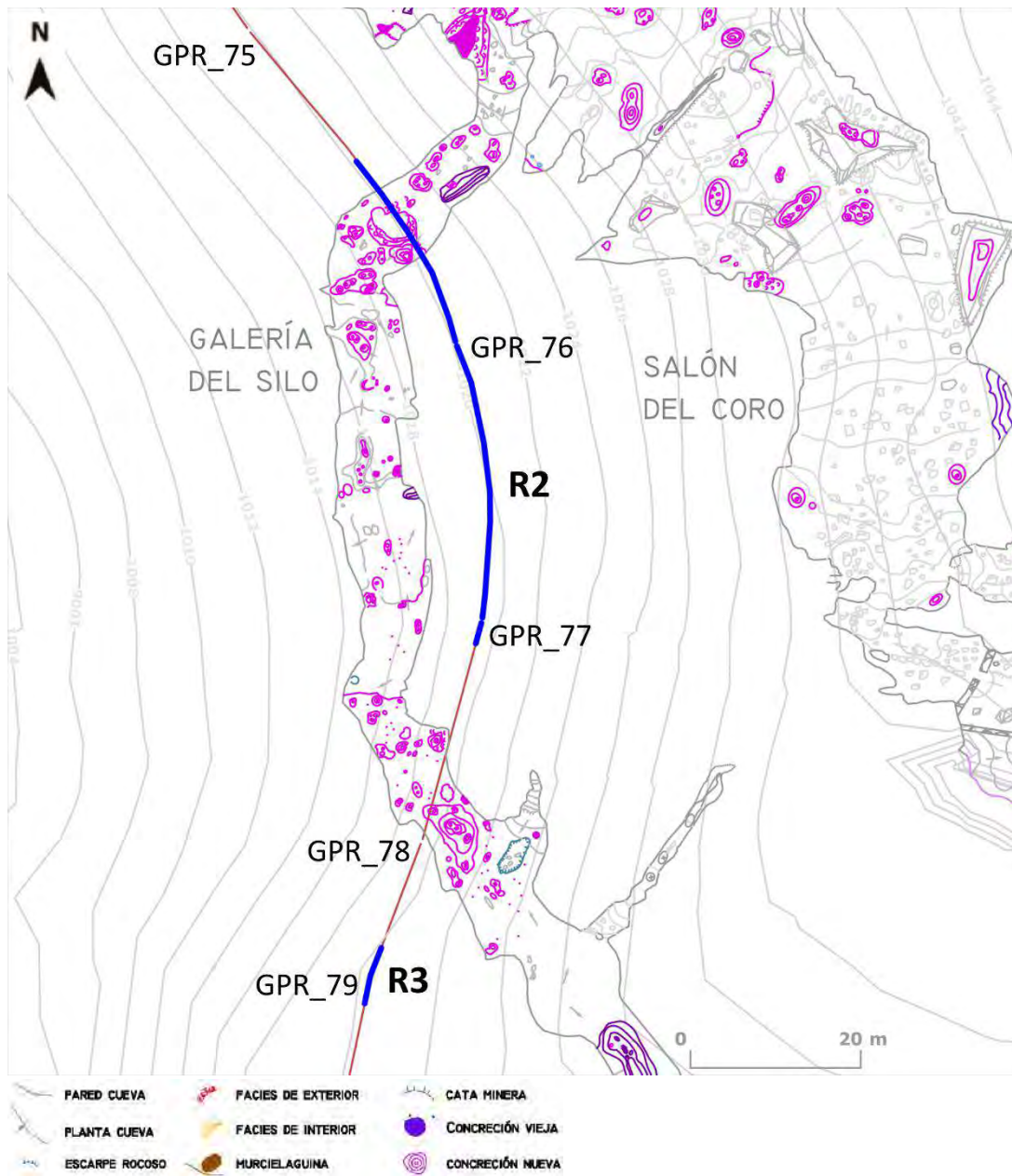


Figura 4.173. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_75-GPR\_79 en torno a los 1018 m s.n.m. Los trazos azules indican los rellenos sedimentarios identificados en estos perfiles.



#### 4.1.2.2.3.2 Nivel intermedio

Los perfiles de GPR que abarcan el nivel intermedio del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo se sitúan sobre la continuación del yacimiento de la Sima del Elefante y un tramo de Cueva Peluda (figuras 4.174, 4.175 y 4.176).

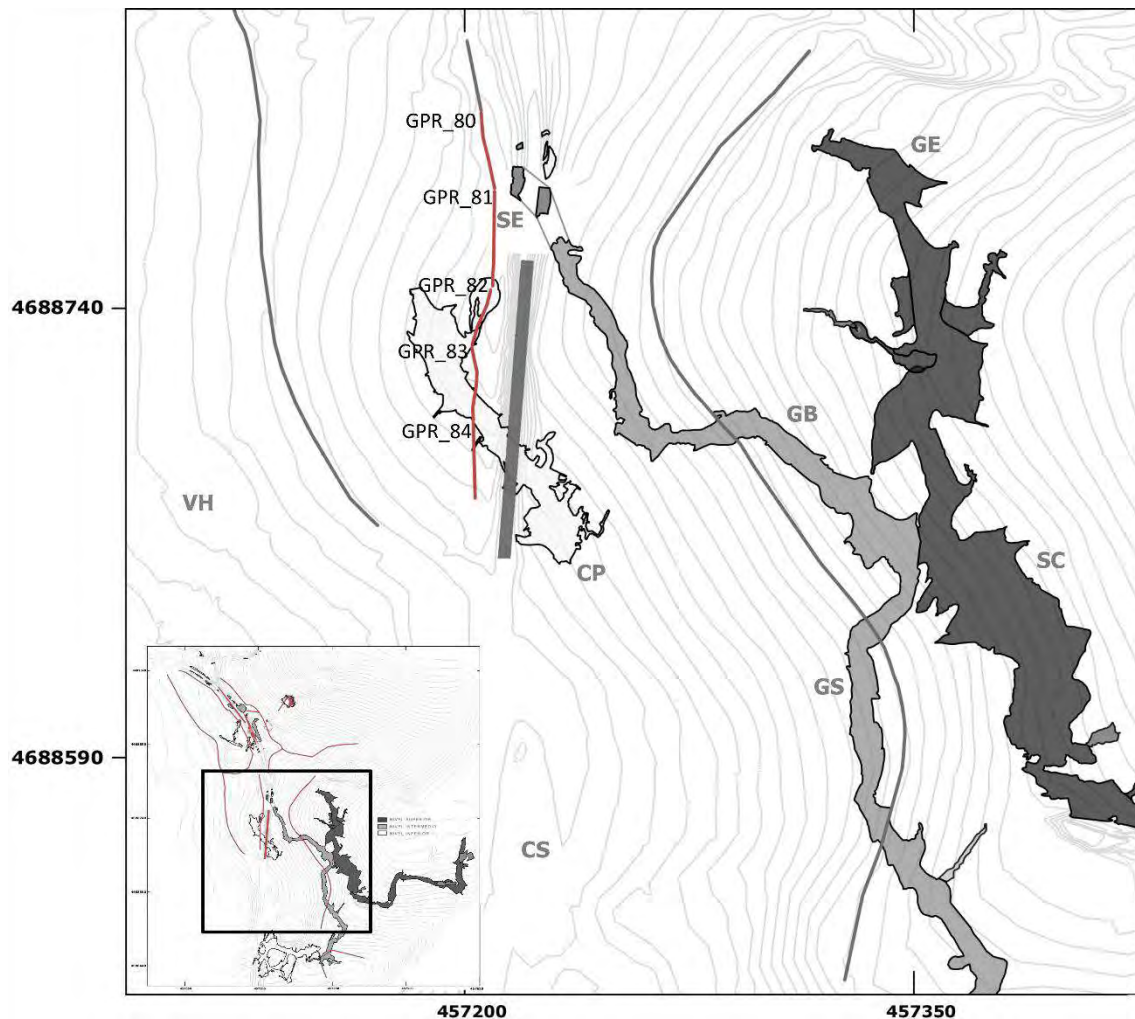


Figura 4.174. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel intermedio del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo (en rojo) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.

Los perfiles GPR\_80-GPR\_84 muestran varias discontinuidades en las reflexiones relacionadas con los estratos de caliza que pueden asociarse a rellenos sedimentarios endokársticos (figura 4.176), ya que todas muestran escasas reflexiones y una rápida atenuación de la onda de radar.

En primer lugar, hacia el metro 17 del perfil GPR\_80 se aprecia el final de un grupo de reflexiones parecido al que se reconoce a partir el primer metro del perfil GPR\_81 (figura 4.177). La extensión de esta discontinuidad coincide con relleno sedimentario de la sección TR4 (figura 4.176) y la anomalía conductiva SE (figura 4.95, pág. X), lo que confirmaría la continuidad hacia el oeste del conducto de la Sima del Elefante.

Por su parte, la discontinuidad que se observa entre los metros 10 y 15 del perfil GPR\_81 (figura 4.177) puede relacionarse con la anomalía conductiva SE1 que, al igual que en el perfil ERT\_15, se

sitúa bajo unos dos metros de reflexiones asociadas a la roca caliza (figura 4.94, pág. X) y ocupa una extensión parecida (figuras 4.176 y figura 4.95, pág. X).

De la misma manera, se reconoce una discontinuidad entre los metros 7 y 9 del perfil GPR\_83, a partir de los 2 m de profundidad aproximadamente (figura 4.177), que, por dimensiones y localización, coincide con la sección TR2 (figura 4.176) y la anomalía conductiva TR2 del perfil ERT\_15 (figura 4.95, pág. X).

Finalmente, entre los metros 10 y 18 del perfil GPR\_84 (figura 4.177) se distingue un área (CP4) que presenta un grupo de reflexiones distintas a las descritas hasta ahora. A nivel espacial, estas reflexiones se sitúan en relación con una entrada lateral de Cueva Peluda (figura 4.176), que finaliza en una chimenea ascendente (Ortega, 2009), pero, a falta de un estudio más pormenorizado de la zona, resulta difícil determinar su origen.

En cuanto a los estratos de caliza, cabe destacar que en los perfiles GPR\_81 y GPR\_82 estos muestran una pendiente aparente hacia el sur, mientras que el resto de perfiles presentan un carácter subhorizontal.

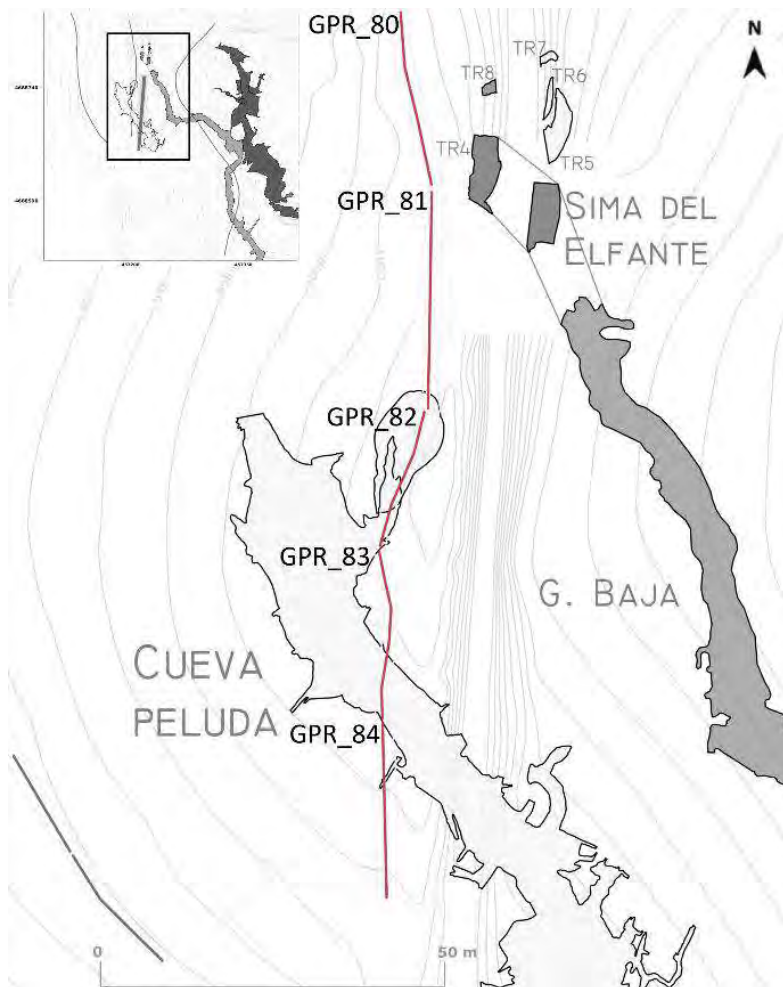


Figura 4.175. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR realizados en torno a Sima del Elefante y Cueva Peluda, a cotas del nivel intermedio del karst.

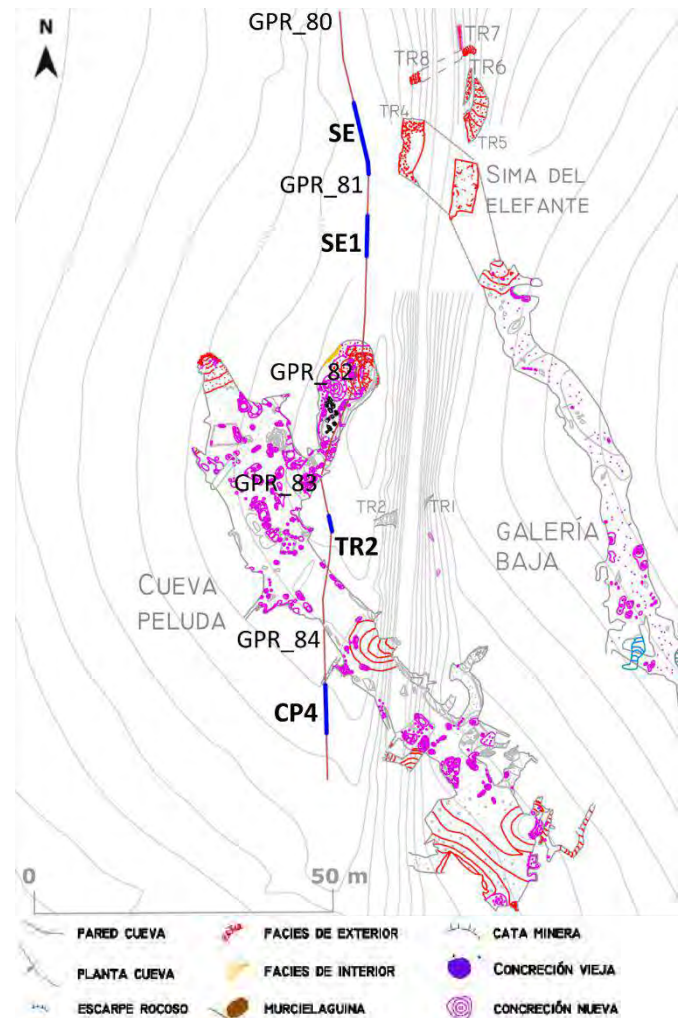


Figura 4.176. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_80-GPR\_84 y su relación con los yacimientos de la Sima del Elefante y Cueva Peluda, a cotas del nivel intermedio del karst. Los trazos azules indican los rellenos sedimentarios identificados en estos perfiles.

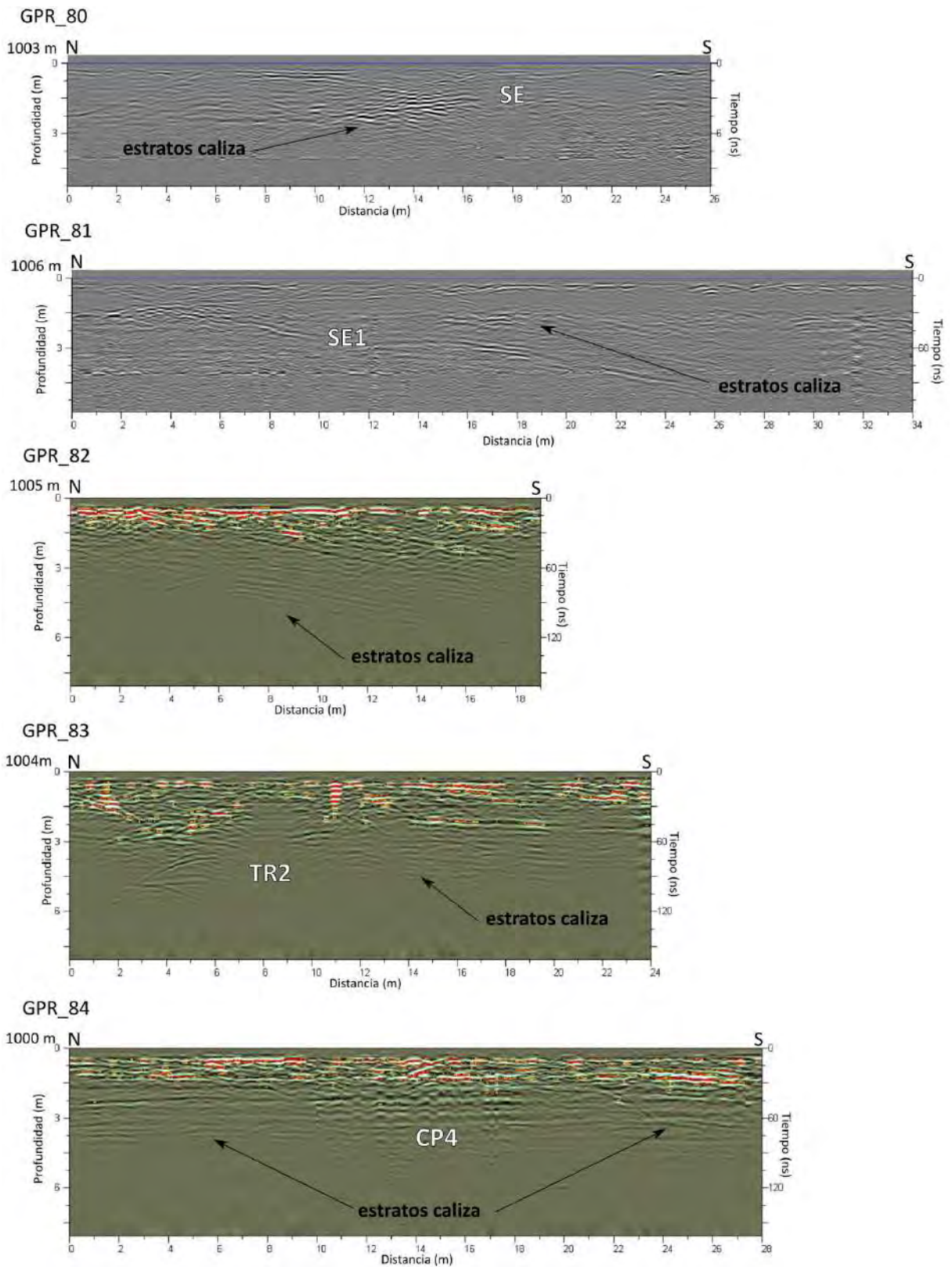


Figura 4.177. Perfiles GPR\_80-GPR\_84. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.



#### 4.1.2.2.3.3 Nivel inferior

Los perfiles de GPR que comprenden el nivel inferior del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo abarcan el nivel principal e inferior de Cueva Peluda y el extremo NO de este sistema kárstico (figuras 4.178 y 4.179).

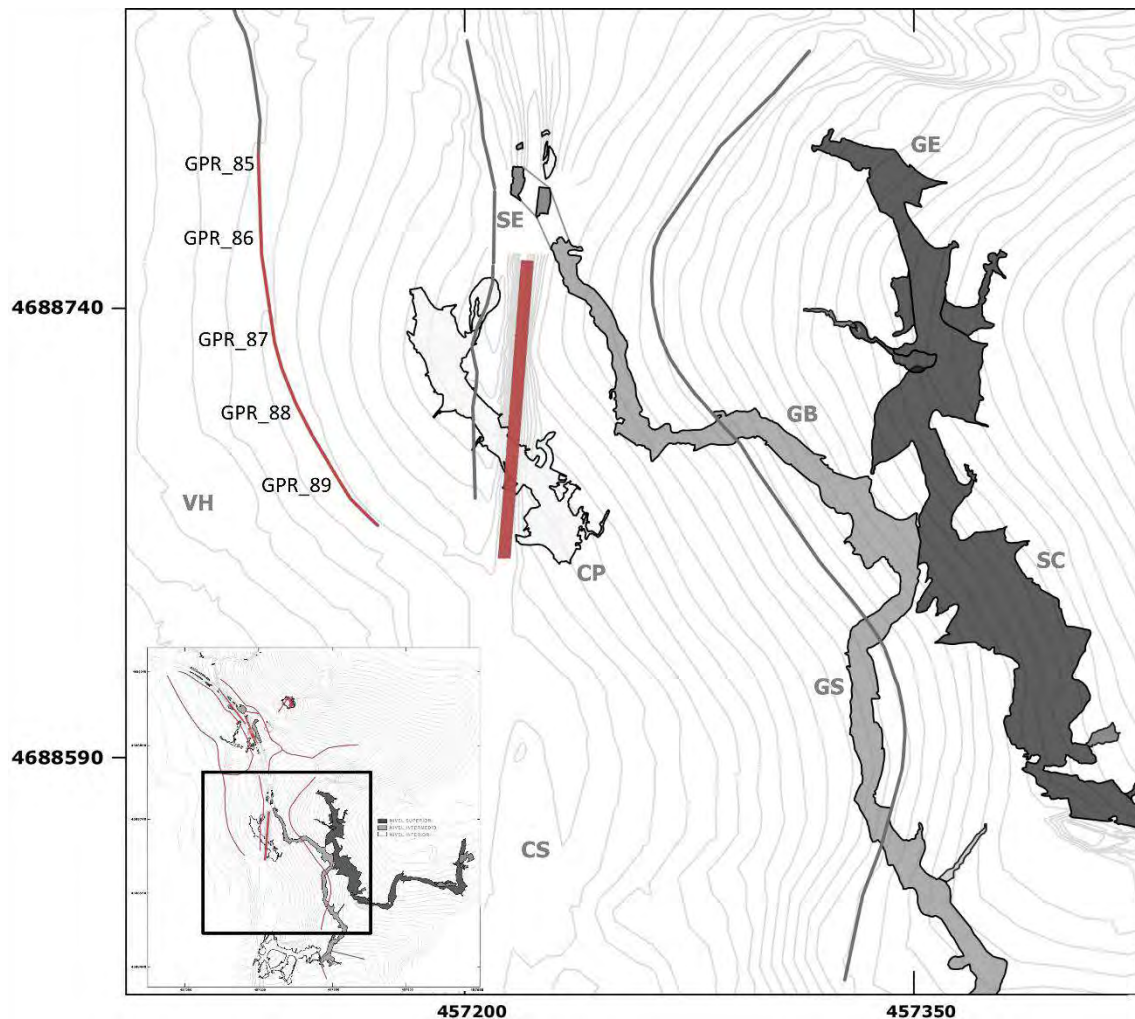


Figura 4.178. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre nivel inferior del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo (en rojo) y su relación con el resto de los perfiles realizados en este sistema kárstico (en gris). El polígono rojo representa el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1). GE indica Galería de las Estatuas, SC Salón del Coro, GB Galería Baja, SE Sima del Elefante, GS Galería del Silo, CP Cueva Peluda, CS Campa del Silo y VH Valle de Valhondo.

El estudio en detalle de los perfiles GPR\_85-GPR\_89 ha permitido identificar hasta 4 discontinuidades diferentes entre las reflexiones relacionadas con los estratos de caliza. Sin embargo, estos espacios desprovistos de reflexiones no se corresponden con las anomalías conductivas de los perfiles de ERT realizados en esta misma área (figura 4.112, pág. X). Así, ante la falta de otros indicadores geológicos o geomorfológicos que permitan interpretar estas diferencias, hemos decidido nombrar a estas discontinuidades D1-D4, según su ubicación de norte a sur (figuras 4.180 y 4.181).

El estudio del nivel inferior de este sistema kárstico se completa con la malla de perfiles publicada en Bermejo et al., 2020 (anexo I.1), que permitió ubicar con claridad el espacio hueco de Cueva Peluda (figura 4.180) y establecer su posible conexión con la Sima del Elefante.



Por su parte, los estratos de caliza de los perfiles de esta publicación muestran una clara inclinación hacia el sur, que contrasta con la pendiente aparentemente subhorizontal de los perfiles GPR\_85-GPR\_89 (figura 4.181).

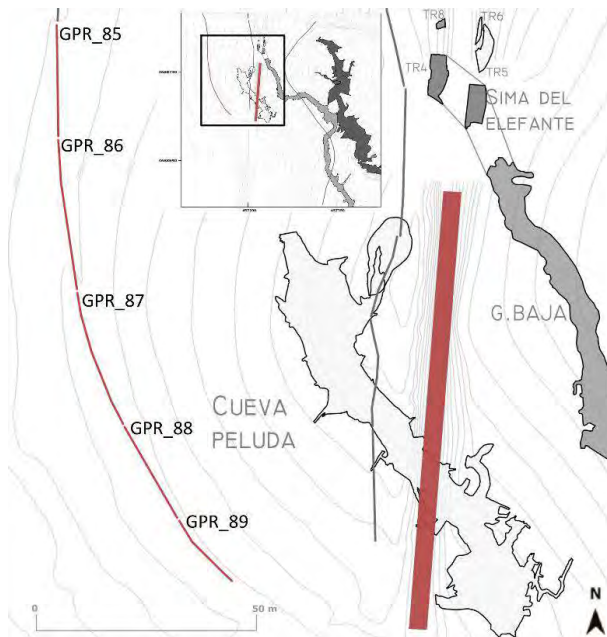


Figura 4.179. Mapa de detalle de la localización de los perfiles de GPR (en rojo) realizados sobre Cueva Peluda y el límite NO del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo, a cotas del nivel inferior del karst. El polígono rojo representa el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1).

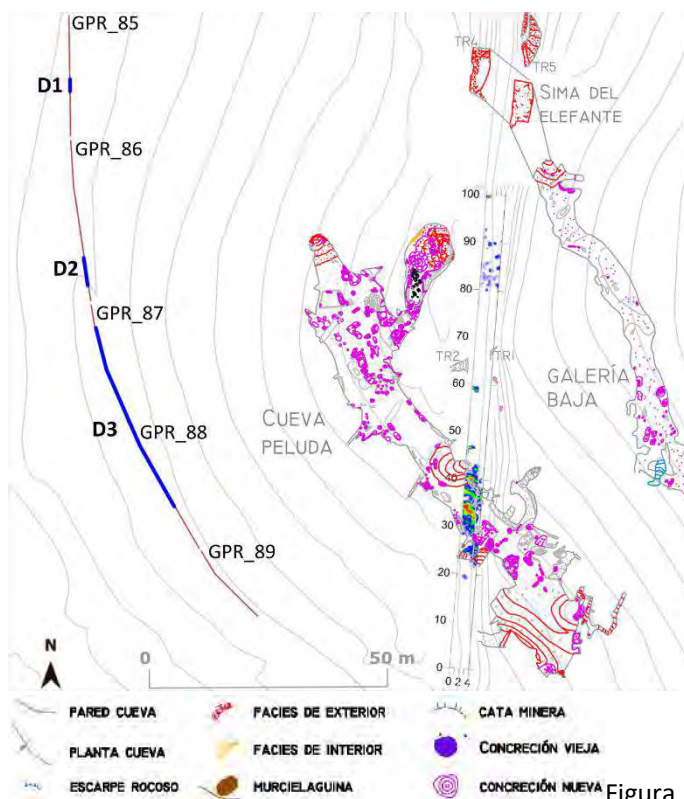
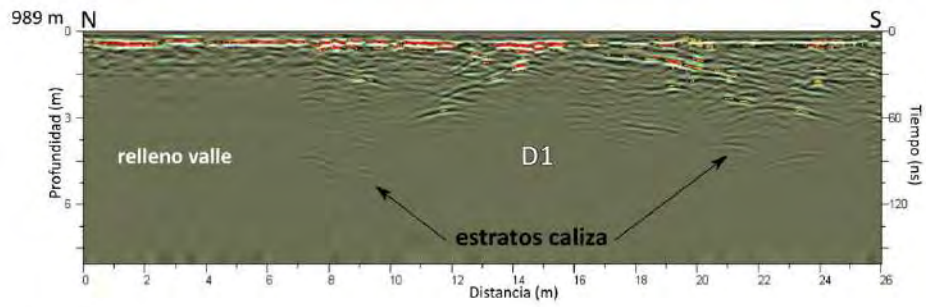
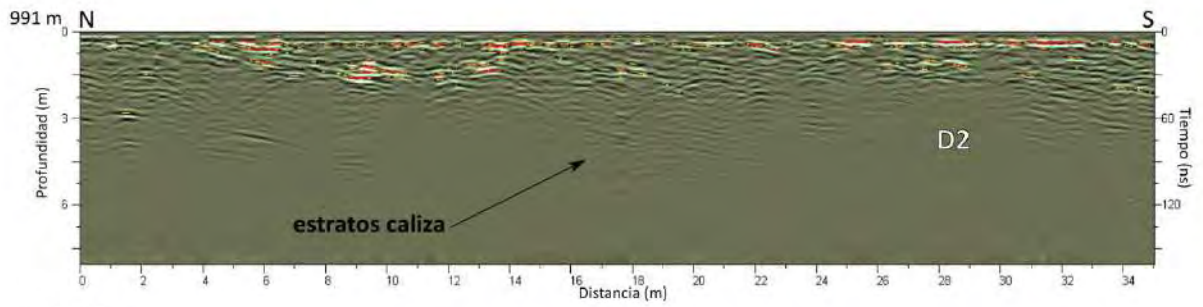


Figura 4.180. Mapa de detalle de los perfiles GPR\_85-GPR\_89 y su relación límite NO del sistema de Cueva Mayor-Cueva del Silo, a cotas del nivel intermedio del karst. Los trazos azules indican los rellenos sedimentarios identificados en estos perfiles. El mapa de amplitud situado en la trinchera del ferrocarril representa el área estudiada en la publicación Bermejo et al., 2020 (anexo I.1).

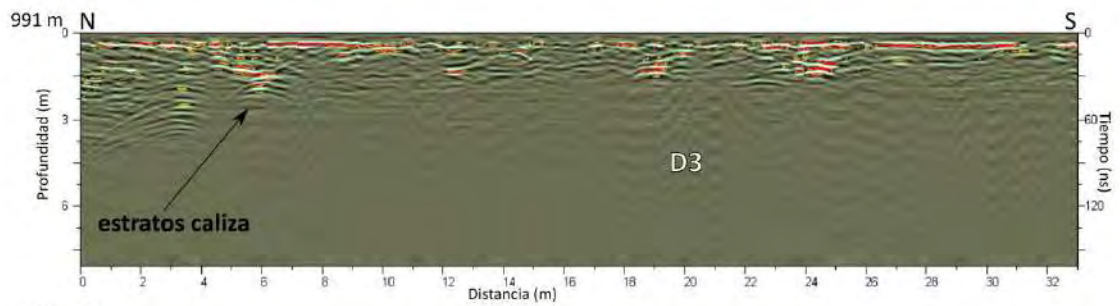
GPR\_85



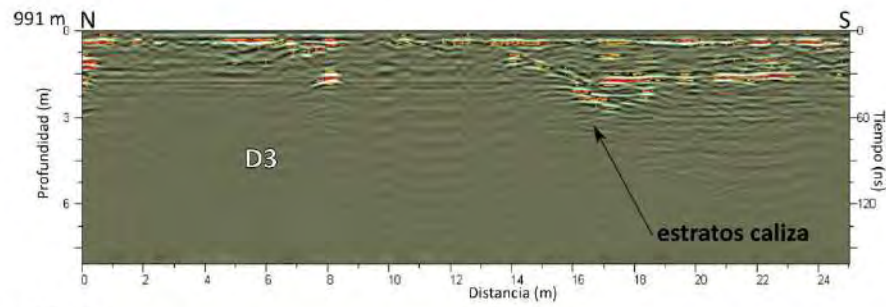
GPR\_86



GPR\_87



GPR\_88



GPR\_89

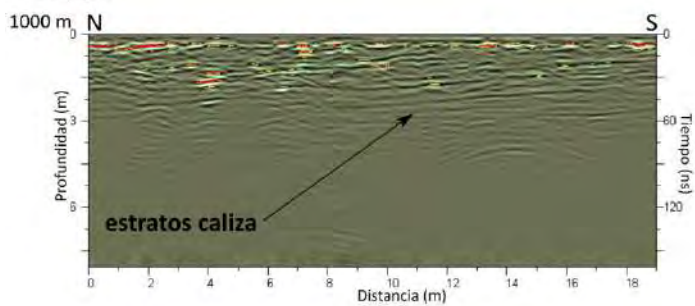


Figura 4.181. Perfiles GPR\_85-GPR\_89. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.

#### 4.1.2.2.4 Valle de Cueva Mayor

Los perfiles GPR\_90-GPR\_96 (figura 4.182) se disponen sobre la Sala Cíclopes y el curso medio del Valle de Cueva Mayor a cotas del nivel superior del karst.

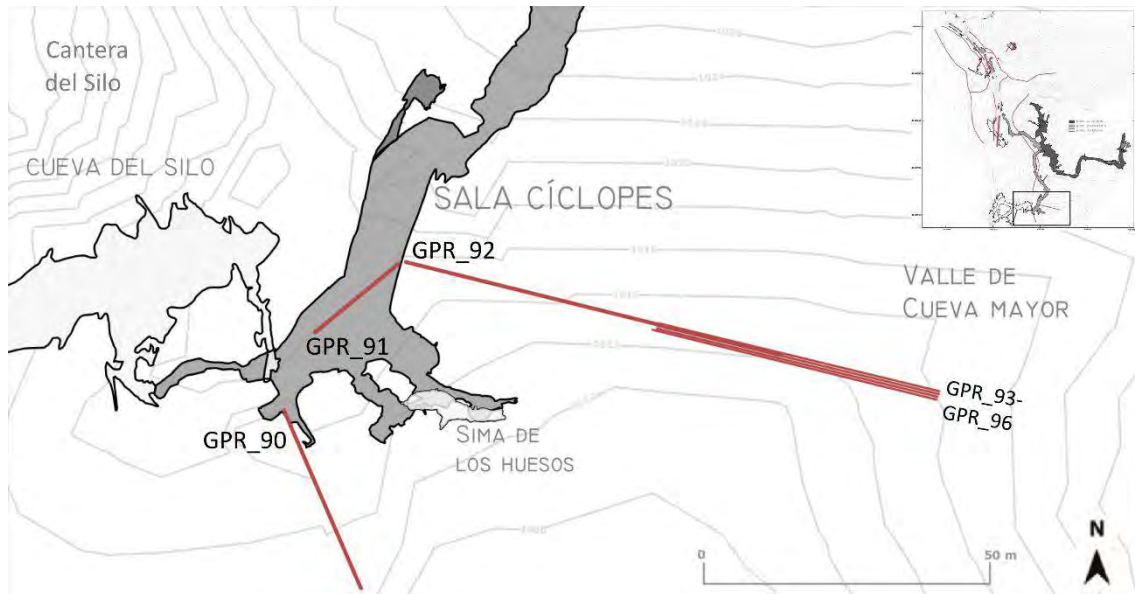


Figura 4.182. Localización de los perfiles de GPR realizados sobre la Sala Cíclopes y el curso medio del Valle de Cueva Mayor.

El detallado estudio geofísico y geomorfológico realizado en este sector (Ortega et al., 2010; Benito-Calvo y Pérez-González, 2015), junto con las prospecciones de ERT presentadas en este manuscrito (apartado 4.1.2.1.4), ha permitido distinguir diferentes elementos geológicos en los perfiles GPR\_90-GPR\_94.

Así, en el perfil GPR\_90 ha sido posible identificar tres tipos de depósitos sedimentarios. Por un lado, el espacio situado entre el inicio del perfil y el metro 13 (figura 4.183), en el que se registran pocas reflexiones, puede relacionarse con los depósitos de coluvión descritos a esta altura (figura 4.119, pág. X). Por otro lado, las reflexiones de mayor amplitud que se encuentran entre el metro 13 y el 24 (figura 4.183) pueden asociarse a la terraza fluvial T4 (figura 4.119, pág. X). Estas reflexiones destacan, además, por mostrar dos contactos diferentes: mientras que por el norte el límite es inclinado, por el sur, muestra un carácter vertical. Por último, el tramo final de este perfil, en el que no se registran reflexiones (figura 4.183), se corresponde con las margas terciarias presentes en esta zona (figura 4.119, pág. X).

Estos depósitos de margas, que ocupan toda la extensión del perfil GPR\_91, destacan por no registrar prácticamente ningún tipo de reflexión (figura 4.183). Si bien es cierto que la falta de reflexiones puede ser debida a la homogeneidad de este paquete sedimentario, como sugieren los resultados de los perfiles de ERT (pág. X), los valores de resistividad que presentan estos sedimentos son muy conductivos, por lo que es posible que atenúen rápidamente la onda de radar.

Por su parte, los perfiles GPR\_92-GPR\_96, cuyo trazado es transversal al eje longitudinal del Valle de Cueva Mayor, muestran unas las reflexiones de gran amplitud que corresponden a los estratos de caliza. Sin embargo, estas reflexiones, que muestran una pendiente aparente hacia el oeste, no indican en ningún caso la presencia de tramos aéreos, tal y como apuntaba el perfil ERT\_47 (figura 4.123, pág. X).



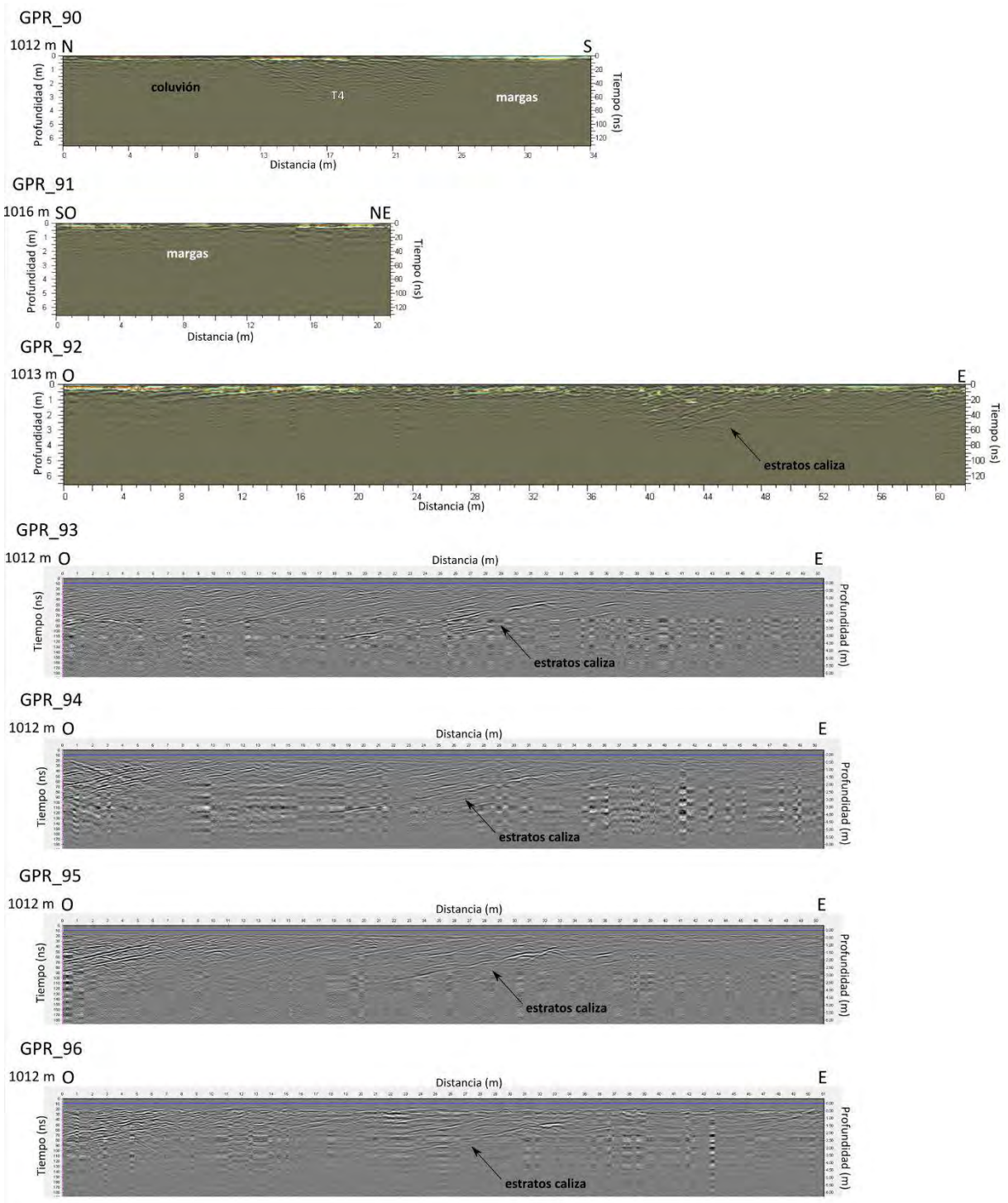


Figura 4.183. Perfiles GPR\_90-GPR\_96. En cada perfil se indica la profundidad aproximada (en m s.n.m.) a la que se encuentra la superficie.



## 4.2 OJO GUAREÑA

### 4.2.1 Planificación del trabajo de campo

Debido a las vastas dimensiones del karst de Ojo Guareña ha sido necesario restringir su estudio por medio de métodos de prospección geofísica a un número limitado de cavidades. Así, por su importancia arqueológica y accesibilidad, se escogieron exclusivamente Cueva Palomera, Kaite y Covaneria (figura 4.2.1), que presentan evidencias de actividad humana entre el Paleolítico superior y la Prehistoria reciente y corresponden a diferentes sectores del complejo kárstico.



Figura 4.2.1 Mapa del complejo kárstico de Ojo Guareña. Aparecen destacadas las cavidades de Kaite, Cueva Palomera y Covaneria (modificada de Ortega et al., 2013).

En diciembre de 2013 se realizó un perfil de ERT en Cueva de Palomera cubriendo en el sector de entrada y la Rampa de Palomera, en colaboración con José Ángel Porres de la Universidad de Burgos y tres perfiles de ERT en Kaite, en colaboración con el equipo de Enrique Aracil (AGS), a lo largo de los diferentes transectos de la cueva como el sector del antiguo sumidero o Portalón de Kaite, y el sector interno de la cavidad. Estos resultados, publicados en Bermejo et al., 2016, sirvieron para determinar y comparar profundidad y caracterización de los sedimentos en el sector de entrada o de ocupación humana en comparación con las facies de interior de Kaite y para determinar la profundidad y caracterizar los sedimentos del Portalón de entrada, con una importante ocupación durante la Prehistoria en Cueva Palomera.

Alentados por los positivos resultados de Cueva Palomera, y coincidiendo con la campaña de limpieza de perfiles y estudios estratigráficos y geomorfológicos de Cueva Palomera, en agosto de 2016 se realizaron un total de 11 perfiles GPR en diferentes tramos, incluyendo la rampa de entrada y la Galería del Sueño. Estos perfiles se suman a los de ERT publicados en 2016 (anexo II) y sirven como elemento de comparación y control de estudio geofísico de esta cavidad.

Por último, en septiembre de 2019 se realizó un perfil de ERT en Covaneria a lo largo de la longitud máxima de la cueva, para determinar la profundidad de los sedimentos que rellenan la cueva y su posible área de ocupación, así como para delimitar la extensión y morfología de la propia cavidad.

## **DISCUSIÓN**

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Metodología

#### 5.1.1 Cuerpos conductivos

##### 5.1.1.1 ERT

Las anomalías conductivas, que constituyen el principal objeto de estudio de este trabajo puesto que corresponden a los rellenos endokársticos susceptibles de albergar restos arqueológicos, son también las que mayor complejidad de interpretación presentan. El análisis de los resultados obtenidos en la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña ha puesto de manifiesto diferentes tipos de respuestas ante su estudio que las caracterizan y que se describen a continuación.

- Ubicación en profundidad

Es importante contemplar que el espesor de las anomalías conductivas en los modelos de ERT no suele reflejar la profundidad real de las estructuras a las que corresponden. Aunque la resolución de las anomalías conductivas con respecto al cuerpo que representan depende principalmente de la separación entre electrodos y de la profundidad a la que se halle dicho cuerpo (Dahlin y Zhou, 2004), las anomalías conductivas suelen sobredimensionar el objeto de estudio que representan. En general, los límites superior y lateral del cuerpo conductivo reflejan con mayor precisión, mientras que el límite inferior de la anomalía suele presentar un halo de valores algo más resistivos (Bentley y Gharibi, 2004) que dificulta determinar su profundidad real, como se observa en muchos de los perfiles presentados en este trabajo.

En el caso de las anomalías de menor tamaño de este estudio, que constituyen estructuras cerradas y homogéneas situadas relativamente cerca de la superficie, éstas parecen bien definidas por la prospección eléctrica. Así lo demuestra el sondeo S14, que reveló unos 5 m de sedimentos para la anomalía R1, que, en los perfiles ERT\_30 y ERT\_31, muestra una profundidad máxima de 8 m (figuras 4.170-4.72, [pág. X](#)).

Tan sólo tenemos constancia de que el límite superior de una anomalía conductiva no coincida con su profundidad real en el perfil ERT\_9 (figura 4.38, [pág. X](#)), en el los sedimentos asociados a la anomalía P, que se refleja a unos 5 m de profundidad, aparecen pasados los 8 m de profundidad en el testigo del sondeo S7 (figura 4.39, [pág. X](#)).

Las anomalías conductivas de mayor tamaño, que corresponden a los rellenos sedimentarios de Gran Dolina, Galería Baja, Sima del Elefante, Cueva Peluda y el Valle de Propiedad, superan el tercio inferior del perfil. Debido a la pérdida de resolución en profundidad, es esperable que el espesor real de estos rellenos no se corresponda con el de las anomalías conductivas. De hecho, la escasa densidad de datos en la parte inferior de los perfiles ha causado que la base caliza no se refleje en muchos de ellos. Éste es el caso de los perfiles ERT\_6 (figura 4.28, [pág. X](#)), ERT\_8 (figura 4.32, [pág. X](#)), ERT\_28 (figura 4.110, [pág. X](#)) y ERT\_41 (figura 4.113, [pág. X](#)), en los que no se reflejan los últimos 3 m de caliza recuperados en la base de los sondeos S6, S5 (figura 4.27, [pág. X](#)), S18 y S19 (figura 4.111, [pág. X](#)), respectivamente.

También es posible que suceda el caso contrario, es decir, que los resultados de ERT reflejen unos valores resistivos en el extremo inferior del perfil que puedan interpretarse como la base caliza del relleno sedimentario. A pesar de que no contamos con datos de prospecciones reales y sondeos mecánicos de comprobación, este fenómeno puede deducirse de la modelización realizada para el estudio de los yacimientos de Gran Dolina (A) y el Complejo Galería (B), que muestra una base resistiva para la estructura A, a pesar de que, según el modelo diseñado, esta anomalía conductiva debería sobrepasar el borde inferior del perfil (figura 5.1).

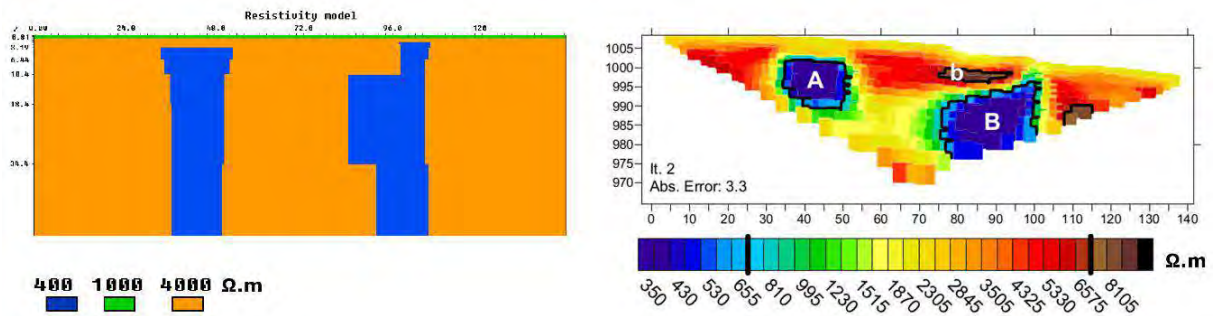


Figura 5.1. Izq.: Modelización 2D de dos cuerpos conductivos para el estudio de los rellenos sedimentarios de Gran Dolina (A) y el Complejo Galería (B). Dcha.: Resultado de la inversión 2D de la modelización propuesta a la izq. (Figura modificada de Bermejo et al., 2017, anexo I.1).

Por otro lado, en la Sierra de Atapuerca encontramos dos ejemplos muy característicos de sendas anomalías que se encuentran en contacto con la superficie y cuya profundidad es sustancialmente inferior a la que los sondeos mecánicos han revelado.

Este es el caso de Cueva Fantasma, en el que los sondeos S2 y S3 revelaron una profundidad de 8,5 m y 12,5 m, respectivamente, para los sedimentos endokársticos, que, en el perfil ERT\_2, muestran una profundidad de apenas 3,5 m (figuras 4.14 y 4.15, pág. X). Lo mismo sucede en Galería de las Estatuas, en la que la anomalía conductiva GE del perfil ERT\_29 refleja un espesor máximo de 10 m para el relleno sedimentario que alcanza unos 15 m de profundidad según el sondeo S12 (figuras 4.69 y 4.70, pág. X).

En el caso de Galería de las Estatuas esta discordancia puede deberse al hecho de que el trazado del perfil sea longitudinal al eje del relleno sedimentario, lo que habría creado un efecto 3D similar al descrito por Sjödaahl y colegas (2006) y Dahlin y colegas (2008). Estos investigadores argumentan que la disposición de los perfiles de manera longitudinal a las presas de materiales sueltos, en los que estos materiales son más conductivos que el resto del conjunto, favorece la concentración de la corriente eléctrica en la zona más conductiva, que en nuestro caso correspondería a los sedimentos endokársticos. Este efecto 3D, generado porque las variaciones de resistividad se sitúan perpendiculares a la disposición de los electrodos, en contradicción con las asunciones básicas de la inversión 2D, conllevaría un fuerte incremento de la resistividad en profundidad que distorsionaría la ubicación de la base de la anomalía conductiva.

El perfil ERT\_32, perpendicular al relleno de Galería de las Estatuas, apoyaría esta teoría, ya que la profundidad de la anomalía GE concuerda con la potencia sedimentaria recuperada en el sondeo S12 (figuras 4.70 y 4.73, pág. X).

En Cueva Fantasma, la observación de los elementos kársticos superficiales y los sondeos mecánicos realizados indican que el perfil ERT\_2 cruza el relleno sedimentario de manera perpendicular al eje del conducto y que, en su parte central, encontraría sedimentos tanto de manera perpendicular como longitudinal al trazado del perfil. De este modo, la discordancia que existe en entre la profundidad que alcanza la anomalía conductiva SF y la base de los sedimentos en los sondeos S2 y S3 (figuras 4.14 y 4.15, pág. X) no puede corresponder al mismo efecto de distorsión 3D descrito anteriormente.

Con el fin de encontrar una explicación a este fenómeno hemos realizado una modelización 2D, cuyo empleo resulta pertinente puesto que en este caso no se han observado importantes variaciones de carácter 3D, que recree la composición del terreno a lo largo del trazado del perfil ERT\_2 (figura 5.2). En esta modelización se dispone un primer relleno superficial de 1000  $\Omega.m$  que corresponde a los valores que podrían presentar, como máximo, los sedimentos carbonatados presentes en los



primeros 4,5 m de los sondeos S2 y S3. En segundo lugar, se dispone un nivel de 50  $\Omega.m$  que representa los sedimentos más conductivos reflejados en el perfil ERT\_2 y que alcanza distintas profundidades acorde con la información aportada por los sondeos mecánicos. Por último, el relleno sedimentario se encaja dentro de un medio de 4000  $\Omega.m$ , que se corresponde con los valores de la roca caliza. En esta modelización, a la que se ha añadido un 3% de error, se ha contemplado sólo el dispositivo WS, ya que es el que menor error ha proporcionado en el perfil ERT\_2.

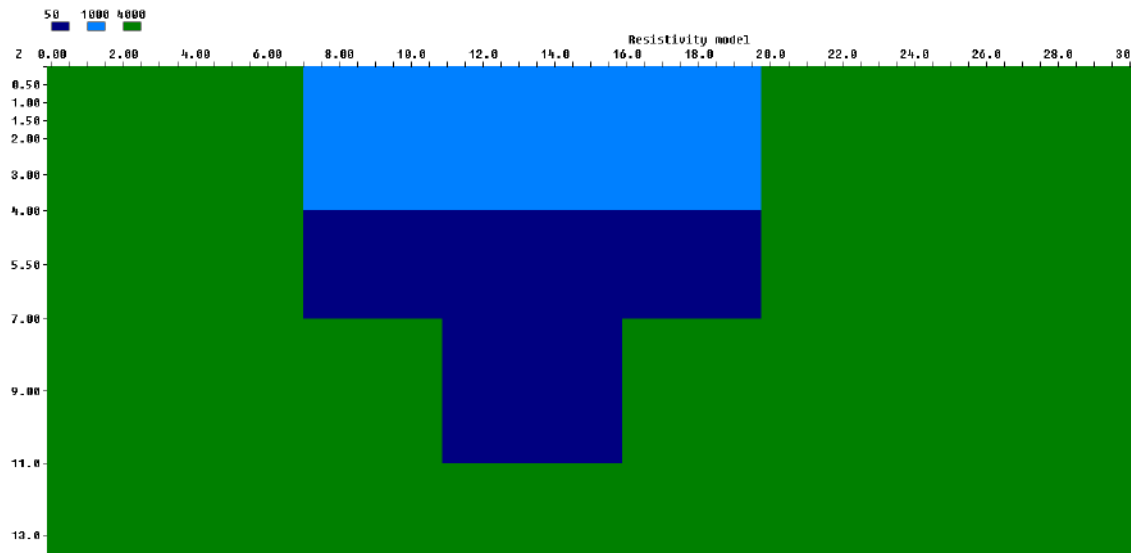


Figura 5.2. Modelización 2D del medio supuesto para el perfil ERT\_2 a partir de los datos de la observación superficial, los sondeos mecánicos y los valores de resistividad del propio perfil de ERT.

Los resultados de la inversión de esta modelización (figura 5.3) presentan una respuesta del relleno sedimentario de la cavidad que se aleja del perfil ERT\_2 y de la información aportada por los sondeos mecánicos. Sin embargo, estos resultados resultan coherentes con el modelo planteado, ya que tanto la extensión como la profundidad del nivel superficial, de 1000  $\Omega.m$ , se ven representadas en su totalidad, mientras que no hay datos sobre la base del nivel más conductivo, de 50  $\Omega.m$ , puesto que la longitud del perfil no permitiría alcanzar la profundidad propuesta en el modelo.

Así, no disponemos de una explicación para la distorsión en profundidad de la anomalía conductiva asociada al relleno sedimentario de Cueva Fantasma en el perfil ERT\_2. No obstante, hay que destacar que la base de la anomalía SF (figura 4.14, pág. X) mantiene la proporción entre las diferentes profundidades (8,5 m y 12,5 m) que presenta el relleno sedimentario de la cueva según los sondeos S2 y S3 (figura 4.15, pág. X)

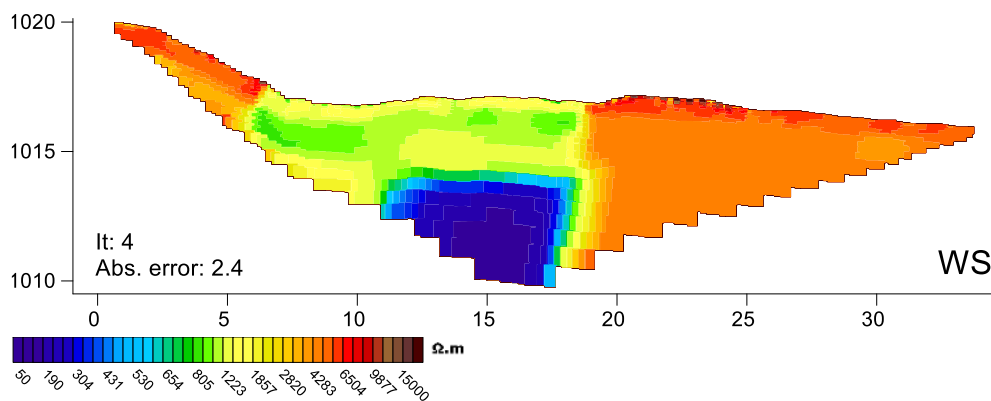


Figura 5.3. Resultado de la inversión 2D de la modelización propuesta en la figura 5.2.

- Ubicación espacial

Uno de los elementos más característicos de los ambientes kársticos es su alta variabilidad espacial (Ford y Williams, 2007), lo que supone un problema para la detección de anomalías conductivas por medio de la prospección eléctrica, puesto que los cuerpos conductivos situados en el rango de alcance de las corrientes eléctricas pueden generar un efecto 3D que enmascare la realidad geológica situada en la vertical del perfil.

De entre los perfiles de ERT realizados en la Sierra de Atapuerca llama especialmente la atención la anomalía TZ situada en el perfil ERT\_8 (figura 4.32, pág. X), que sobrepasa unos 5 m hacia el norte las paredes conocidas del conducto de la Covacha de los Zarpazos (figura 5.4). Esta anomalía TZ contrasta con los resultados de la inversión 3D de ERT\_M, en los que en la misma ubicación y a la misma profundidad se muestran valores asociados a la roca caliza. Además, la forma de esta anomalía presenta la misma orientación que la anomalía A identificada en esta malla (figura 5.4), de la que está separada por 5 m.

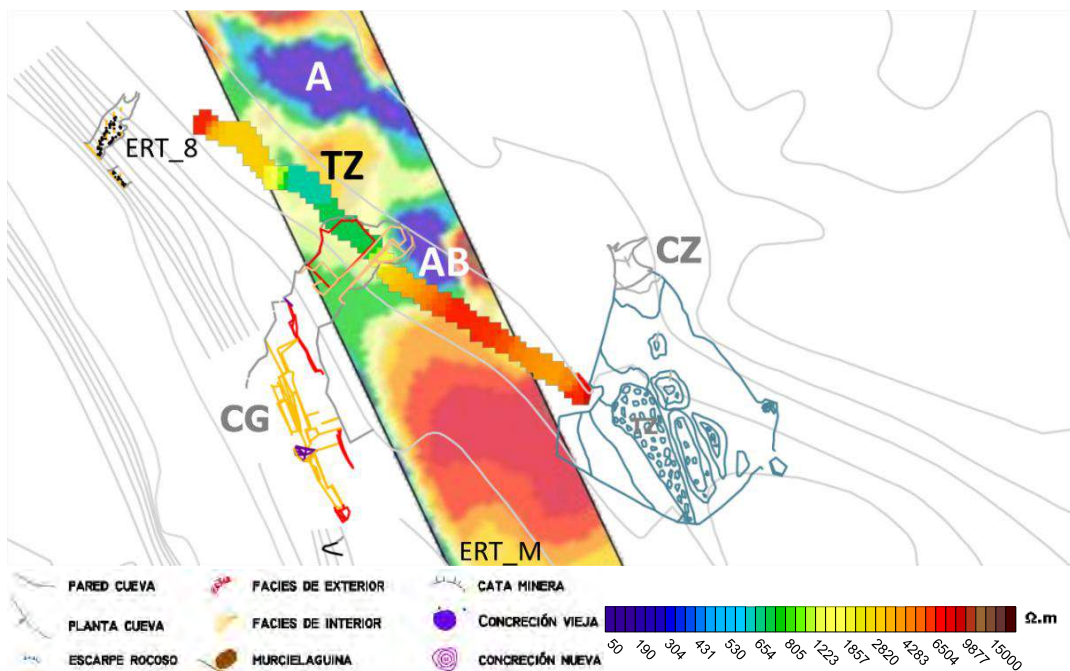


Figura 5.4. Mapa de detalle de los perfiles ERT\_8 y ERT\_M en torno a 1000 m s.n.m. El perfil ERT\_8 corresponde al dispositivo DD, y ERT\_M al dispositivo WS. CG indica Complejo Galería y CZ Cueva de los Zorros. A y AB representan las anomalías identificadas en Bermejo et al., 2017 (anexo I.1).

Para comprobar la influencia que la anomalía conductiva A, asociada al relleno sedimentario de Gran Dolina, podría haber tenido sobre la anomalía TZ, que parece relacionada con la Covacha de los Zarpazos, realizamos una modelización 3D, en el que un cuerpo conductivo de 20 m de largo, 4 m de espesor y 400  $\Omega.m$  se sitúa dentro de un medio de 4000  $\Omega.m$ , a entre 1,1 m y 5,8 m de profundidad (figura 5.5).

Tras calcular los valores de resistividad aparente para este modelo 3D, extrajimos los valores correspondientes a dos perfiles longitudinales, que procesamos con una inversión 2D (figura 5.6). Los resultados de la inversión A, que corresponden al perfil que se situaría sobre la anomalía de 400  $\Omega.m$ , muestran un cuerpo conductivo cuya localización y profundidad es coherente con la anomalía modelizada. Por su parte, los resultados de la inversión B, que se corresponden con los valores situados a 5 m de distancia de la anomalía conductiva, muestran una anomalía de unos 1000  $\Omega.m$  que se sitúa en la misma ubicación espacial que el cuerpo conductivo de la modelización 3D, pero a mayor profundidad (figura 5.5).

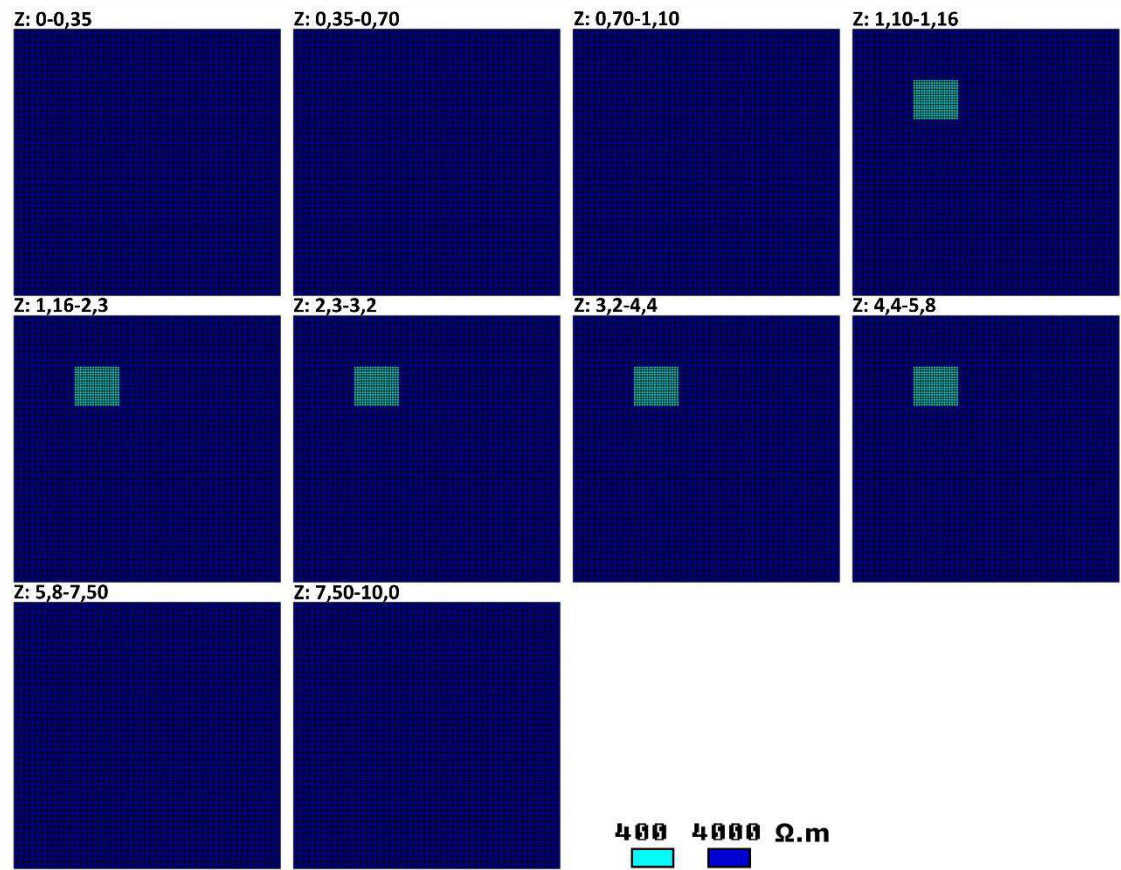


Figura 5.5. Modelización 3D de un cuerpo de 400  $\Omega.m$  en un medio de 4000  $\Omega.m$ .

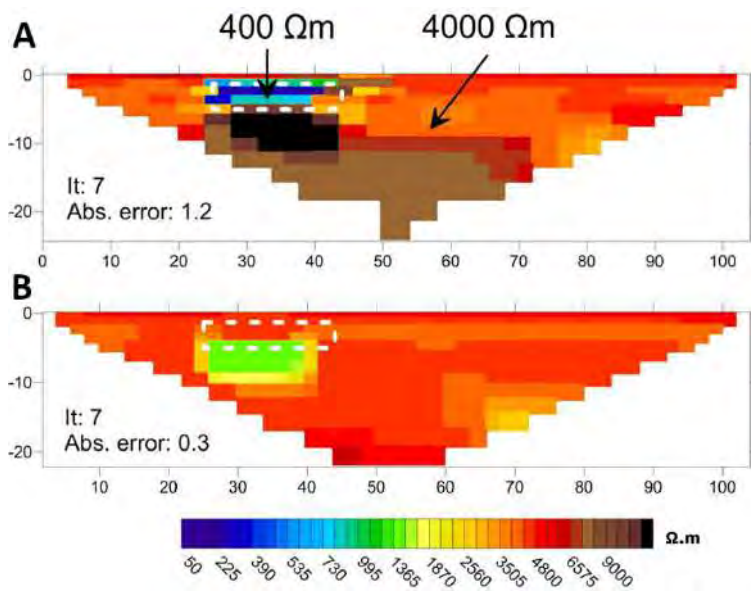


Figura 5.6. Resultado de la inversión 2D de dos perfiles longitudinales a la modelización 3D propuesta en la figura 5.5. El perfil A cruza el cuerpo de 400  $\Omega.m$ , mientras que el perfil B se sitúa a 5 m de distancia. El trazo blanco discontinuo indica la ubicación real del cuerpo conductivo.

Así, es posible que la anomalía TZ, o al menos una parte de esta anomalía, refleje un efecto 3D provocado por la cercanía de la anomalía A, que, tal y como ha demostrado la modelización 3D, se situaría dentro del alcance de las corrientes eléctricas emitidas a 5 m de distancia. Este efecto no se habría producido en los perfiles de ERT\_M, ya que estos cruzan la anomalía A de manera transversal, es decir, conservando las asunciones de la inversión 2D. En este sentido, llama la atención que la anomalía AB no se refleje en el perfil ERT\_8, ya que, según los datos de ERT\_M y el sondeo S5, ésta se situaría muy próxima al trazado del perfil (figura 5.4).

Aplicando este mismo razonamiento, las diferencias que se observan entre los resultados de los dispositivos DD y WS de los perfiles ERT\_6 y ERT\_7 en la ubicación de las anomalías A y G (figuras 4.28 y 4.29), podrían deberse a un efecto 3D. Sin embargo, el hecho de que las anomalías A y G se sitúen en diferentes ubicaciones y a diferentes profundidades complica la realización de una modelización que permita estimar la influencia de este efecto.

A partir de los resultados de esta modelización podemos deducir, asimismo, que los valores de más de 700  $\Omega$ .m que han sido relacionados con rellenos sedimentarios endokársticos podrían indicar que estos perfiles no se sitúan en la vertical de dichos rellenos, sino en su proximidad. Así, las anomalías SE de los perfiles ERT\_21-ERT\_24 (figura 4.97, pág. X) y especialmente la anomalía CPN del perfil ERT\_28 (figura 4.110, pág. X) indicarían la proximidad de los rellenos de Sima del Elefante y Cueva Peluda, respectivamente.

Por otro lado, la comparación entre los perfiles y las plantas ERT\_M (Bermejo et al., 2017, anexo I.1) indica que los algoritmos previstos en la inversión 3D son capaces de eliminar este efecto, puesto que la anomalía B de los perfiles 3 y 4 (fig. 5), que presenta unos valores superiores a 900  $\Omega$ .m, no aparece reflejada en los resultados de la inversión 3D (fig. 7).

#### 5.1.1.2 GPR

Los rellenos estudiados en este trabajo corresponden, en la mayoría de los casos, a sedimentos eléctricamente conductivos que atenúan las ondas de radar, lo que impide identificar cambios sedimentarios o detectar el límite inferior los rellenos. No obstante, es posible apreciar, según su capacidad de atenuación, entre diferentes tipos sedimentos.

Así, los depósitos de margas son los que más rápido atenúan la onda de radar, como se aprecia en los perfiles GPR\_90 y GPR\_91 (figura 4.183, pág. X) de la Sierra de Atapuerca, en los que apenas se observan reflexiones pasado el primer metro de profundidad. Algo parecido sucede con los depósitos de coluvión (figura 4.152, pág. X) y los sedimentos que rellenan el Valle de la Propiedad (apartado 4.1.2.2.2). En cambio, en el Valle de Cueva Mayor ha sido posible identificar los depósitos de la terraza fluvial T4 por las reflexiones que se recogen hasta, por lo menos, los 4 m de profundidad (figura 4.183, pág. X). En cuanto a los sedimentos, principalmente arcillosos, que rellenan las cuevas de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña, estos no presentan una penetración superior a los 5 m de profundidad.

La única excepción la constituyen los rellenos asociados a la sección TR21 y al nivel inferior de Cueva Peluda (Bermejo et al., 2020, anexo I.1). El relleno sedimentario de TR21 es el único del sistema kárstico de Trinchera que registra una reflexión correspondiente a su base (fig. 13), lo que sugiere que contiene unos sedimentos menos arcillosos que el resto de cuevas. Así, este relleno podría estar compuesto por las mismas arenas cementadas visibles en TR21 al nivel de la superficie de la trinchera del ferrocarril (Ortega, 2009).

Por su parte, las reflexiones producidas entre los 6 m y los 10 m de profundidad en los perfiles realizados sobre Cueva Peluda (fig. 7) pueden corresponder al nivel inferior de esta cavidad, que, a esa misma profundidad, se encuentra colmatada por depósitos fluviales compuestos por cantos rodados de cuarcita en una matriz arenosa (Ortega, 2009). Estos mismos depósitos se encontraron a



partir de los 6 m de profundidad en los sondeos realizados en 2001 en la Sima del Elefante (Rosas et al., 2006). Por ello, podemos deducir que este relleno sedimentario, que es diferente a todos los identificados por la prospección geofísica, no ha atenuado la onda de radar. Sin embargo, los valores de resistividad ( $<300 \Omega.m$ ) que presenta este posible conducto colmatado, que por su ubicación espacial y en profundidad (figura 4.112, pág. X) puede relacionarse con la anomalía C del perfil 2.2 (anexo II), coinciden con los valores que presentan el resto de rellenos sedimentarios de la Sierra de Atapuerca. Como la conductividad eléctrica está directamente relacionada con la atenuación de las ondas de radar, la única explicación posible es que esta diferencia se deba a que el perfil de GPR se realizó en el mes de junio y el perfil de ERT en el mes de marzo, cuando el subsuelo se encuentra más húmedo.

## 5.1.2 Efectos topográficos

### 5.1.2.1 ERT

Otro de los posibles efectos de distorsión relacionados con la toma de datos de ERT tiene como origen la topografía de la superficie sobre la que se disponen los perfiles, que puede influir sobre la medición de los valores de resistividad. En este sentido, los estudios de Fox y colegas (1980) establecieron que, en los perfiles dispuestos sobre pendiente superior a  $10^\circ$ , se generan efectos topográficos significativos que pueden corregirse si son tenidos en cuenta durante el proceso de inversión. En los programas de inversión actuales este problema se soluciona distorsionando el mado para que coincida con la topografía real (Tong y Yang, 1990; Loke, 2000).

Sin embargo, como hemos apuntado en el capítulo de resultados, en los perfiles de ERT que presentan una topografía pronunciada, las anomalías se desarrollan paralelas a la topografía de la superficie, sobre todo las más resistivas. Este efecto puede apreciarse en los perfiles de la Sierra de Atapuerca ERT\_3, ERT\_29, ERT\_35-ERT\_37, ERT\_41 y ERT\_39 (anexo II) y en los perfiles realizados sobre la rampa de Cueva Palomera y Covaneria, del sistema kárstico de Ojo Guareña (figuras 4.X y 4.X, pág. X). En el perfil ERT\_29 destaca, especialmente, que la anomalía resistiva asociada al tramo aéreo de Galería de las Estatuas no concuerde con la ubicación en profundidad ni con la morfología subhorizontal de este conducto (figura 4.69, pág. X).

Por ello, y con el fin de evaluar la capacidad de los procesos de inversión para corregir este efecto en un medio similar a nuestro objeto de estudio, realizamos una serie de modelizaciones 2D. A continuación, invertimos la resistividad aparente calculada para estas modelizaciones junto con la pendiente correspondiente al perfil ERT\_29. Así, en la primera modelización presentamos una cueva vacía paralela a la superficie (figura 5.7 A) y, en la segunda, una cueva vacía que presentaría un carácter subhorizontal si tenemos en cuenta que la topografía que se incluye en el proceso de inversión contrarresta la inclinación diseñada (figura 5.7 B). En la tercera modelización incluimos un nivel de valores más conductivos bajo esta cueva de desarrollo subhorizontal, que representaría su relleno sedimentario (figura 5.7 C). En estas modelizaciones, a las que hemos añadido un 5% de error, hemos contemplado únicamente el dispositivo DD, ya que, según Martorana y colegas (2009) y los resultados presentados en este trabajo, es el que mejor individualiza las anomalías resistivas.

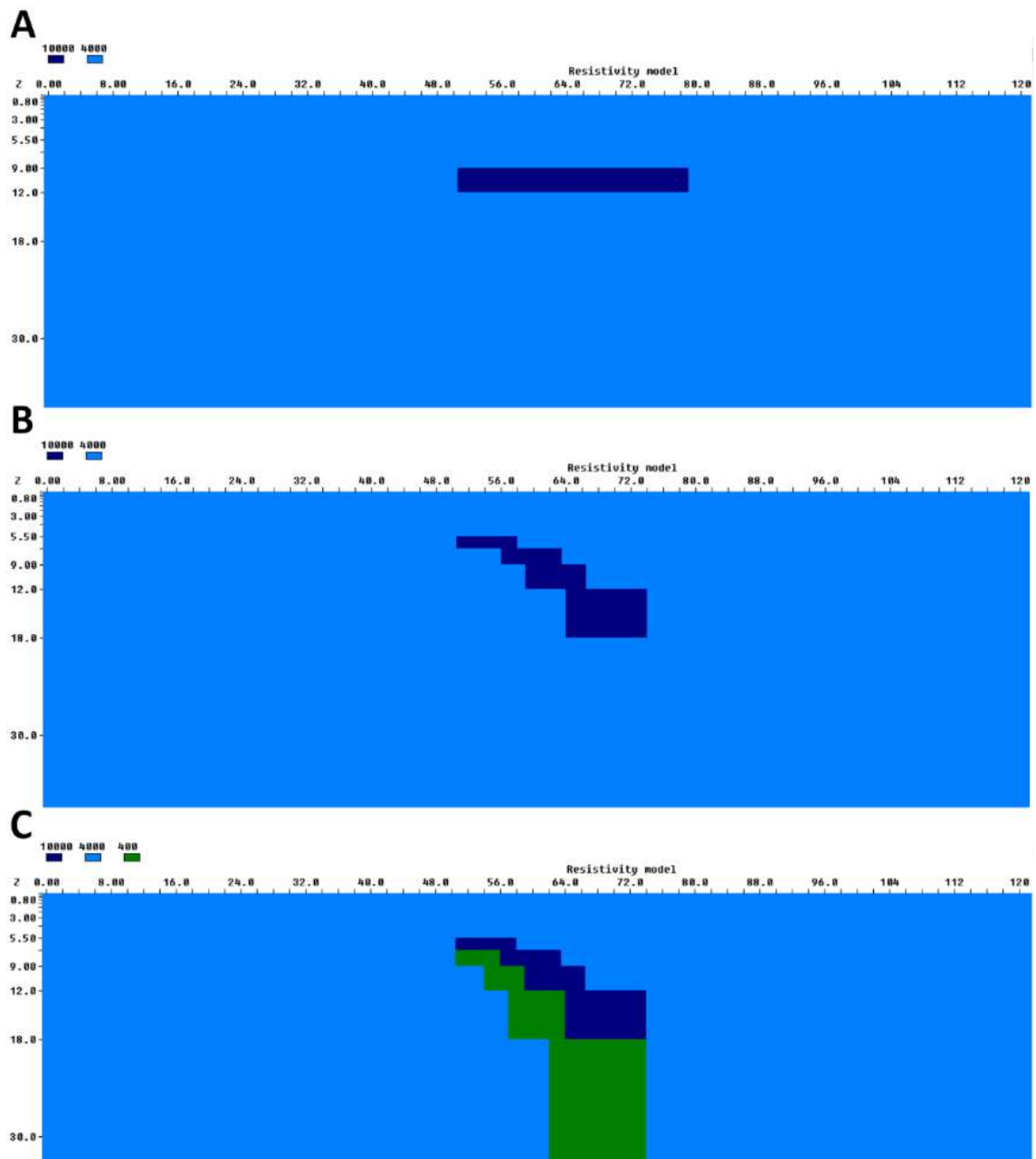


Figura 5.7. Modelizaciones 2D para evaluar el efecto topográfico. A) anomalía resistiva paralela a la superficie. B) anomalía resistiva horizontal, cuya inclinación se contrarresta con la topografía incluida en el proceso de inversión (figura 5.8). C) misma modelización que B, pero con una anomalía conductiva por debajo de la resistiva.

Los resultados de esta modelización indican que, para las anomalías resistivas, los efectos de topografía siguen siendo patentes incluso después de haber aplicado la corrección topográfica durante el proceso de inversión. Así lo demuestra el modelo B, en el que la anomalía resistiva muestra una pendiente algo menos pronunciada que en el modelo A, pero aun preferentemente paralela a la superficie (figuras 5.8 A y B). Algo parecido sucede también para la anomalía resistiva del modelo C (figura 5.8 C). En este último ejemplo, sin embargo, se puede apreciar una pendiente más horizontalizada para la anomalía conductiva, lo que sugiere que este efecto topográfico sería menos acusado en las estructuras conductivas. Volviendo a los perfiles ERT\_29 y de Cueva Palomera se aprecia, efectivamente, que las anomalías conductivas GE y a-f, respectivamente, parecen reproducir en menor medida la pendiente de la superficie.

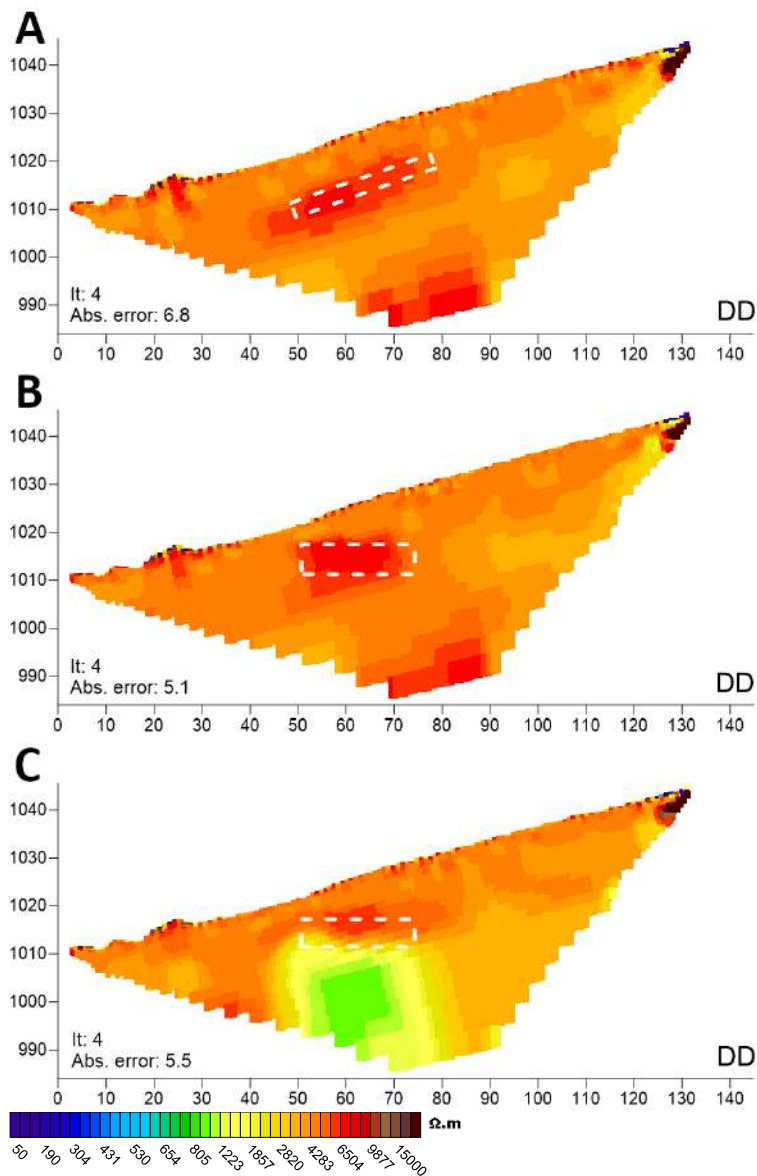


Figura 5.8. Resultado de la inversión 2D de los modelos propuestos en la figura 5.7. El trazo blanco discontinuo indica la ubicación de la anomalía resistiva propuesta en la modelización.

Otro factor que puede generar efectos topográficos es la disposición del perfil con respecto a la pendiente. Los estudios de Holcombe y Jiracek (1984) demostraron que estos efectos eran más pronunciados cuando los perfiles se disponían de manera perpendicular a la topografía y que la resistividad aparente resultaba anómalamente alta en superficies cóncavas debido a la concentración de la corriente y anómalamente baja en superficies convexas debido a la dispersión de la corriente.

En la Sierra de Atapuerca, este efecto podría haberse producido en los perfiles ERT\_16-ERT\_26 y ERT\_30-ERT\_40, realizados en la ladera que abarca los niveles superior e intermedio del sistema kárstico de Cueva Mayor-Cueva del Silo (figura 4.64, [pág. X](#)), ya que estos perfiles cruzan de manera perpendicular una pendiente de unos  $16^\circ$  (la que corresponde al perfil ERT\_29). Por su parte, la cercanía a la trinchera del ferrocarril podría haber ocasionado este mismo efecto en los perfiles ERT\_5, ERT\_15 y ERT\_41 (figuras 4.24 y 4.64). No obstante, carecemos de datos cuantitativos y cualitativos que permitan estimar este efecto topográfico, puesto que las interpretaciones de los resultados de ERT concuerdan con los sondeos mecánicos realizados en estas áreas y que los modelos no superan el 10% de error absoluto.

### 5.1.2.2 GPR

La adquisición de datos GPR se realiza preferiblemente de manera horizontal porque las superficies irregulares generan cambios de acoplamiento que impiden interpretar correctamente los resultados. En cualquier caso, en los perfiles de este trabajo realizados sobre superficies en pendiente no se han descrito efectos significativos que no hayan podido ser corregidos incluyendo la topografía en los programas de procesamiento de datos.

### **5.1.3 Cuerpos resistivos**

#### 5.1.3.1 ERT

Las anomalías resistivas de los perfiles presentados en este trabajo han sido principalmente asociadas a los tramos aéreos de las cavidades y, en menor medida, a la presencia de otros elementos extremadamente resistivos como las escombreras de las canteras o los cuerpos espeleotémicos.

- Cavidades aéreas

En muchos de los perfiles de la Sierra de Atapuerca que se disponen sobre cavidades conocidas se aprecian anomalías resistivas que coinciden *grosso modo* con la longitud de los tramos aéreos, pero que se sitúan a mayor altitud. Este fenómeno destaca especialmente en los perfiles ERT\_29, ERT\_35-ERT\_37 y ERT\_41 (anexo II), en los que la parte superior de la anomalía se localiza entre 5 m y 9 m por encima del techo de la cueva. A pesar de que estos perfiles se disponen sobre una superficie en pendiente, este efecto no puede explicarse por la influencia de la topografía, como se infiere del resultado de las modelizaciones realizadas en el apartado anterior, en las que, como mucho, la anomalía resistiva sobredimensiona el objeto diseñado (figura 5.8). Este tipo de desplazamiento vertical ha sido observado en medios en los que el nivel superior es conductivo (Cardarelli et al., 2007; Papadopoulos et al., 2010; Orlando, 2013). Sin embargo, desconocemos si estos ejemplos son extrapolables a un medio como el de la Sierra de Atapuerca, en el que las anomalías resistivas, que en ocasiones presentan valores inferiores a 10.000  $\Omega\cdot\text{m}$ , se sitúan bajo un primer nivel resistivo de unos 4000  $\Omega\cdot\text{m}$ , es decir, que no siempre muestran contrastes significativos de resistividad.

No obstante, la distorsión en la ubicación de las anomalías resistivas no sucede en todos los perfiles situados sobre cuevas con partes aéreas. De hecho, no existe ninguna anomalía resistiva correspondiente al tramo aéreo de las cavidades que cruzan los perfiles ERT\_16-ERT\_26, ERT\_28 y ERT\_40 (anexo II). En los perfiles ERT\_16-ERT\_26 esto puede deberse a que el tramo de Galería Baja sea relativamente pequeño y en el perfil ERT\_28 a que Cueva Peluda se sitúe en el límite inferior del perfil. Sin embargo, el perfil ERT\_40 presenta unas características parecidas a los perfiles ERT\_35-ERT\_37, es más, cruza un tramo aéreo de Galería Baja mayor que el de los otros perfiles (figura 4.93, pág. X). Esta discordancia entre casos similares, que se observa tanto en los dispositivos DD como WS, complica la explicación de este fenómeno.

En este sentido, no hay que perder de vista el hecho de que todas las cavidades que presentan partes aéreas están, a su vez, rellenas por sedimentos conductivos. Además, a excepción de los perfiles realizados sobre la Sala de los Cíclopes, los resultados presentados en este trabajo indican que la potencia de estos rellenos supone más del doble de la profundidad de los tramos aéreos. Por otro lado, el contraste de resistividades entre los sedimentos ( $\approx 400 \Omega\cdot\text{m}$ ) y la roca caliza ( $\approx 4000 \Omega\cdot\text{m}$ ) puede ser del orden de 10 veces, lo que podría influir en la creación de artefactos resistivos, ya que, con altos contrastes, el proceso de inversión genera límites más bruscos, especialmente en las iteraciones más altas y con la inversión de tipo robusta utilizada en este trabajo. De hecho, y como hemos apuntado a lo largo del capítulo de resultados, en casi todos los perfiles de ERT se observan anomalías resistivas que se encuentran en contacto con anomalías conductivas y cuya atribución a



tramos aéreos de cavidades resulta geológicamente inverosímil. Por lo tanto, esta asociación debe realizarse siempre con cautela.

Así, y aunque otros autores han corregido la distorsión de estas anomalías resistivas incluyendo los límites de la cavidad conocida en el proceso de inversión (Cardarelli et al., 2007; Orlando, 2013), no podemos asegurar que este procedimiento hubiera proporcionado un resultado más cercano a la realidad geológica en nuestro caso. De todas maneras, es una opción que merece la pena explorar en el futuro.

## **CONCLUSION**

2D and 3D imaging allow determining that at least the phreatic part Gran Dolina cavity, continues with an ESE direction for 30 m, and that Galería Complex extends only through the TZ sector. An unknown conduit 10 m under Gran Dolina and as wide as Gran Dolina and Galería Complex together (I, figure 7), is plausible too, although because this data come from the bottom part of the profile it should be taken with caution. There is a clear vertical entrance (AB) connected to Galería Complex through TZ, that may also be common for the phreatic part of Gran Dolina. Such opening must correspond to a ceiling collapse that may not have occurred until the Middle Pleistocene, considering the age of the sedimentary infillings of the closest site, TZ.

In terms of archaeology, anomaly AB is the most remarkable area, as it is most likely the entrance used by Middle Pleistocene humans and carnivores to enter Galería Complex site. In addition, anomalies C, D and E are of high interest as well, as its high elevation suggests they may have opened before the caves of the intermediate level and contain older archaeo-paleontological remains. All these conduits are very close to the surface and therefore, very accessible to archaeological survey. Finally, there seems to be little evidence of void karst structures.

This work shows the suitability of the ERT technique for prospecting karstic environments, as it has allowed identifying the morphology of caves as well as the presence of infilled conduits susceptible of bearing archaeological sequences. GPR surveys at the Trinchera caves in Atapuerca have helped identifying a variety of karst features of archaeological and geological interest. We were able to distinguish between these features depending on their origin as well as to determine the extent of the areas altered by recent anthropic activity.

With regard to the karstic features, we have identified: a) the air-filled passage of the Peluda Cave, based on the radar wave polarity changes, and two unknown void chimneys; b) the distribution and bedding attitude of the limestone host rock, including true dip; c) sediment-filled caves, including known and unknown conduits, most of which are filled by clay sediments that attenuated the radar waves. Caves that do not show such attenuation are interpreted as containing other types of sediments, like sands or fluvial gravels.

Identifying different types of cave-fill sediments with GPR furnishes invaluable information for the study of the Sierra de Atapuerca karstic system. In combination with the data provided by other methods, it could help determine the chronology of a cave infill by the type of sediments. It also constitutes practical information for excavation strategies, as it facilitates locating the more susceptible sites of containing archaeological remains for future studies. In this sense, further GPR surveys with different frequency antennas could gain more information on the stratigraphy.

Additionally, the study of the cave infills has exposed an intense vadose entrenchment incision for all the caves of the intermediate level of the Trinchera area and a strong relationship with the lower level of the karst, as all the caves studied in this work extent towards the west under the railroad surface (Fig. 15).

This work has shown that GPR analysis should be conducted even in areas that contain electrically conductive materials, which could attenuate radar waves. Here we found that the radar wave attenuating cave fill sediments could be easily identified, especially when bounded by the highly reflective limestone bedrock. In the Trinchera area this has been especially useful for “filling in the gaps” of the extant cave maps, as most of the unexplored and/or unknown parts of the caves remain invisible as they are filled with sediments. In this sense, GPR is an effective tool for obtaining rapid three-dimensional information on complex structures of this sort.

As for the recent anthropic alterations, we have distinguished between: a) the debris fills produced during the construction of the railroad trench, which can be seen in the first metre of all profiles except in further altered areas; b) the traces of two limestone quarries: one open-air cut and one

underground mine, which extraction process was documented thanks to historic photographs and to the recognition, in the GPR profiles, of the ramp used to extract the blocks; c) recent infills, mostly visible in the areas where the quarries left irregular surfaces.

Given the significance of the remains found in the sites of Trinchera, it is important that the original cave infillings, where the geological and archaeological context remains intact, were distinguished from modern fillings of anthropic origin. Defining the limits of these anthropic structures constitutes another tool for planning future excavations in the area.

Finally, we hope that this thorough analysis of GPR data could be of use not only for the Sierra de Atapuerca sites, but also for encouraging other researchers to use this method in karst areas. Although interpreting GPR data can sometimes be complicated, previous information on the site can be enough for interpreting small scale details that may not be appreciated using other geophysical methods, as shown in this work. An iterative interpretation using both standard types of cave mapping and GPR can produce very accurate three-dimensional analysis not possible in any other way.



## **BIBLIOGRAFÍA**

## Bibliografía

- Aitken M. J., Webster G., Rees A. 1958. Magnetic Prospecting. *Antiquity*, 32, 270-271.
- Aitken M. J. 1974. *Physics and archaeology*, 2nd edition. Oxford, Clarendon Press.
- Aizebeokhai A. P., Olayinka A. I., Singh V. S. 2009. Numerical evaluation of 3D geoelectrical resistivity imaging for environmental and engineering investigations using orthogonal 2D profiles, *SEG Expanded Abstracts* 28, 1440-1444.
- Al-Fares W., Bakalowicz M., Guérin R., Dukhan M. 2002. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 51, 97-106.
- Archie G. E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. En: *Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 146, 54-62.
- Aspinall J. C. & Lynam J. T. 1968. Induced polarization as a technique for archaeological surveying. *Prospezioni Archeologiche*, 3, 91-93.
- Athanasίου E. N., Tsourlos P. I., Papazachos C. B., Tsokas G. N. 2007. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Journal of Applied Geophysics* 62, 124-140.
- Atkinson R. 1952. Méthodes électriques de prospection en archéologie. En: A. Laming (ed.), *La Découverte du Passé*, Picard, Paris.
- Baker P. L. 1991. Response of ground-penetrating radar to bounding surfaces and lithofacies variations in sand barrier sequences. *Exploration Geophysics* 22, 19-22.
- Barringer, A. 1965. Research directed to the determination of subsurface terrain properties and ice thickness by pulsed VHF propagation methods. Air Force Cambridge Research Laboratories contribution, AF19 (628) 2998.
- Becker H. 2009. Caesium-magnetometry for landscape-archaeology. En: Campana S. y Piro S. (eds.), *Seeing the unseen – Geophysics and landscape archaeology*. Taylor y Francis Group, London, pp. 129-165.
- Benech C. 2013. Il y a cent ans, la première prospection géophysique. *ArchéOrient-Le Blog (Hypotheses.org)*, 17-12-2013 <https://archeorient.hypotheses.org/91>
- Beres M., Luetcher M., Paymond O. 2001. Integration of penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves. *Journal of Applied Geophysics* 46, 249-262.
- Bergamín J. F., Sánchez Hombre F., Sánchez Jiménez N., Souto J., Arsuaga J. L. 1992. Primeros resultados de la prospección geofísica en la zona suroeste de la Cueva Mayor (Sima de los Huesos), Atapuerca (Burgos). *Geoarqueología. Actas de la 2ª Reunión Nacional de Geoarqueología*, 449-455.
- Bermejo L., Ortega A. I., Guérin R., Benito-Calvo A., Pérez-González A., Parés J. M., Aracil E., Bermúdez de Castro J. M., Carbonell E. 2017. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *Quaternary International* 433 (PA), 393-401.

- Bevan B. y Kenyon J. 1975. Ground probing radar for historical archaeology. *MASCA Newsletter* 11, 2-7.
- Binley A. y Kemna A. 2005. DC resistivity and induced polarization methods. En: Rubin Y. y Hubbard S. S. (eds.), *Hydrogeophysics, Water Science and Technology Library*, 50, Springer, Dordrecht, pp. 129-156.
- Binley A., Slater L. D., Fukes M., Cassiani G. 2005. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone. *Water Resources Research*, 41, W12417.
- Bleil D.F. 1953. Induced polarization: A method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 636-661.
- Börner F. D., Schopper J. R., Weller A. 1996. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. *Geophysical Prospecting*, 44, 583-601.
- Brown W. A., Stafford K. W., Shaw-Faulkner M., Grubbs A. 2011. A comparative integrated geophysical study of Horseshoe Chimney Cave, Colorado Bend State Park, Texas. *International Journal of Speleology* 40 (1), 9-16.
- Campaña I. 2018. Estratigrafía y sedimentología del yacimiento de Gran Dolina (Sierra de Atapuerca, Burgos). Tesis Doctoral, Universidad de Burgos. CENIEH.
- Campbell R. B., Bower C. A. and Richards L. A. 1948. Change of Electrical Conductivity with Temperature and the Relation of Osmotic Pressure to Electrical Conductivity and Ion Concentration for Soil Extract. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 66-69.
- Cantos Figuerola J. 1987. *Tratado de Geofísica Aplicada*, Promotora de Minas de Carbón S.A.
- Cardarelli E., Di Filippo G., Tuccinardi E. 2006. Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study. *Near Surface Geophysics* 4, 387-392.
- Carpenter P., Doll W., Kaufmann R. 1998. Geophysical character of buried sinkholes on the Oak Ridge reservation, Tennessee. *Journal of Environmental Engineering Geophysics* 3, 133-145.
- Chalikakis K., Plagnes V., Guérin R., Valois R., Bosch F. 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal* 19, 1169-1180.
- Chapellier D. 2000. *Prospection électrique de surface. Cours online de géophysique*. Université de Lausanne. Institut Français du Pétrole. <https://www-ig.unil.ch/>
- Claerbout J.F. y Muir F. 1973. Robust modelling with erratic data. *Geophysics*, 38, 826-844.
- Collett L. S., 1990. History of induced polarization method. En: Fink J. B., McAlister E. O., Sternberg B. K., Widuwilt W. G., Ward S. H. (eds.), *Induced polarization: Applications and Case Histories*. Society of Exploration Geophysics, p. 5.
- Conyers L. y Goodman D. 1997. *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. Walnut Creek, Calif.: AltaMira Press.
- Conyers L. y Lucius J. 1996. Velocity Analysis in Archaeological Ground-Penetrating Radar Studies. *Archaeological Prospection* 3, 312-333.

- Conyers L. B. 2012. *Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology*. Routledge, Taylor and Francis Group, New York.
- Conyers L. B. 2013. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, 3rd edition. Rowman and Littlefield, Lanham, MD, USA.
- Cook J. 1960. Proposed monocyclus-pulse very-high-frequency radar for air-borne ice and snow measurement. En: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, 79(5), 588-594.
- Dabas M., Hesse A., Tabbagh J. 2000. Experimental resistivity survey at Wroxeter archaeological site with a fast and light recording device. *Archaeological Prospection* 7, 107-118.
- Dahlin T. y Loke M. H. 1997. Quasi-3D resistivity imaging: mapping of 3D structures using two dimensional DC resistivity techniques. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Environmental and Engineering Geophysics Meeting*, Aarhus, Denmark, Expanded Abstracts, 143-146.
- Dahlin T. y Loke M.H. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics* 38, 237-249.
- Dahlin T. y Zhou B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging using ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379-398.
- Davis J. L. y Annan A. P. 1989. *Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy*. *Geophysics* 37, 531-551.
- De Beer J. H. 2015. *The history of geophysics in Southern Africa*. Stellenbosch, South Africa, Sun Press.
- De Terra H., Romero J., Stewart T. 1949. *The Tepexpan Man*. Viking Fund Publications in Archaeology 11. New York, Werner-Grenn Foundation.
- deGroot-Hedlin C. y Constable S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Delacour J. 2003. Une technique de prospection minière et pétrolière née en Pays d'Auge, *Bulletin de la Sabix*, 34 | 2003. <https://journals.openedition.org/sabix/423>
- Dey A. y Morrison H.F. 1979a. Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* 27, 1020-1036.
- Dey A. y Morrison H.F. 1979b. Resistivity modelling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures. *Geophysics* 44, 753-780.
- Doolittle J. A. 1982. Characterizing Soil Map Units with the Ground-Penetrating Radar. *Soil Survey Horizons* 23, 3-10.
- Edwards L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42 (5), 1020-1036.
- Fischer P. M., Follin S. G. W., Ulriksen P. 1980. Subsurface Interface Radar Survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. En: Fischer P. M (ed.) *Applications of Technical Devices in Archaeology*. *Studies in Mediterranean Archaeology*, 63, 48-51.

- Florsch N., Llubes M., Téreygeol F., Ghorbani A., Roblet P. 2011. Quantification of slag heap volumes and masses through the use of induced polarization: application to the Castel-Minier site. *Journal of Archaeological Science*, 38(2), 438-451.
- Fox R. W. 1830. On the electro-magnetic properties of the metalliferous veins in the mines of Cornwall. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 120, 399-414.
- Grupo Espeleológico Edelweiss 1986. Monografía sobre Ojo Guareña. Kaite, 4-5.
- Gharibi M. y Bentley L. R. 2005. Resolution of 3-D Electrical Resistivity Images from Inversions of 2-D Orthogonal Lines. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10(4), 339-349.
- Gibson P. J., Lyle P., George D. M. 2004. Application of resistivity and magnetometry geophysical techniques for near-surface investigations in karst terranes in Ireland. *Journal of Cave and Karst Studies* 66 (2), 35-38.
- Goodman D. 1994 Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics* 59, 224-232.
- Goodman D. 1996. Comparison of GPR Time Slices and Archaeological Excavations. En: *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Tohoku University, Sendai, Japon, pp. 77-82.
- Goodman D. y Nishimura Y. 1993. A ground-radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity* 67, 349-354.
- Greenfield R. J. 1979. Review of geophysical approaches to the detection of karst. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 16(3), 393-408.
- Hesse A. 2009. Short history, strategies and practical aspects of electromagnetic detection based on the description of field. En: Campana S. y Piro S. (eds.), *Seeing the unseen – Geophysics and landscape archaeology*. Taylor y Francis Group, London, pp. 207-215.
- Holub P. y Dumitresku T. 1994. Détection des cavités à l'aide de mesures électriques et du géoradar dans une galerie d'amenée d'eau [Detection of cavities by using electrical methods and the georadar inside a water gallery]. *Journal of Applied Geophysics* 31, 185-195.
- Imai T., Saskayama T., Kanemori T. 1987. Use of Ground-Probing Radar and Resistivity Surveys for Archaeological Investigations. *Geophysics* 52, 137-150.
- Jougnot D., Ghorbani A., Revil A., Leroy P., Cosenza P. 2010. Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: A mechanistic approach. *Geophysical Journal International*, 180, 210-224.
- Kaufmann O. y Deceuster J. 2014. Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournaisis area through geophysical methods: an overview. *Geologica Belgica* 17(1), 17–26.
- Kenyon J. 1977. Ground-Penetrating Radar and its Application to a Historical Archaeological Site. *Historical Archaeology* 11, 48-55.
- Klein J. D. y Sill, W. R., 1982. Electrical Properties of Artificial Clay-bearing Sandstone. *Geophysics*, 47(11), 1593-1605.
- Knödel K., Lange G., Voigt H. J. 2007. *Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies*, Bundesanstalt für Geowissenschaften ed., Springer.



- Lanzarone P., Seidel M., Brandt S., Garrison E., Fisher E. C. 2019. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography reveal a deep stratigraphic sequence at Mochena Borago Rockshelter, southwestern Ethiopia. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, 101915.
- Loke M. H. y Barker R. D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152
- Loke M. H. y Barker R. D. 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44, 499-523.
- Loke M. H., Acworth I., Dahlin T. 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics* 34, 182-187.
- Loke M. H. 2011. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Maineult A., Jougnot D., Revil A. 2018. Variations of petrophysical properties and spectral induced polarization in response to drainage and imbibition: a study on a correlated random tube network. *Geophysical Journal International* 212(2), 1398-1411.
- Marescot L., Loke M. H., Chapellier D., Delaloye R., Lambiel C., Reynard E. 2003. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method. *Near Surface Geophysics* 1, 57-67.
- Martín M. A., Domingo S., Antón T. 1981. Estudio de las cavidades de la zona BU-IV-A (Sierra de Atapuerca). *Kaite, Estudios de Espeleología Burgalesa* 2, 41-76. Caja de Ahorros Municipal de Burgos.
- Martínez-Moreno F. J., Pedrera A., Ruano P., Galindo-Zaldívar J., Martos-Rosillo S., González-Castillo L., Sánchez-Úbeda J.P., Marín-Lechado C. 2013. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology* 162, 67-78.
- McMechan G. A., Loucks R. G., Zeng X., Mescher P. 1998. Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas. *Journal of Applied Geophysics* 39, 1-10.
- Milsom J. y Eriksen A. 2011. *Field Geophysics*, 4rd edition. John Wiley y Sons Ltd, Chichester, UK.
- Militzer H., Rösler R., Lösch W. 1979. Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. *Geophysical Prospecting* 27, 640-652.
- Mochales T., Casas A. M., Pueyo E. L., Pueyo O., Román M. T., Pocoví A., Soriano M. A., Ansón D. 2008. Detection of underground cavities by combining gravity, magnetic and ground penetrating radar surveys: a case study from the Zaragoza area, NE Spain. *Environmental Geology*, 53, 1067-1077.
- Nabighian M. N., Grauch V. J. S., Hansen R. O., LaFehr T. R., Li Y., Pearson W.C., Peirce J. W., Phillips J.D., Ruder M. E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND–61ND.
- Nuñez J. R., Anderton C. R., Renslow R. S. 2018. Optimizing colormaps with consideration for color vision deficiency to enable accurate interpretation of scientific data. *PLoS one*, 13(7), e0199239.
- Oldenburg D. W. y Li Y. 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64, 403-416.

- Olhoeft G. 1985. Low-frequency electrical properties. *Geophysics*, 50, 2492-2503.
- Orellana E. 1982. *Prospección geoelectrica en corriente continua*, Biblioteca técnica Phillips, Madrid.
- Ortega A. I. 2009. Evolución geomorfológica del Karst de la Sierra de Atapuerca (Burgos) y su relación con los yacimientos pleistocenos que contiene. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.
- Ortega A. I., Benito-Calvo A., Pérez-González A., Porres A., Martín M. A. 2010. Applying electrical resistivity tomography to the identification of endokarst geometries in the Pleistocene sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection* 17, 233-245.
- Ortega A. I., Martín Merino M. A., Grupo Espeleológico Edelweiss 2012. *Cuevas de Atapuerca. Una visión de la mano del Grupo Espeleológico Edelweiss*. Diputación Provincial de Burgos.
- Ortega A. I., Martín M. A., Grupo Espeleológico Edelweiss 2013. *Cuevas de Ojo Guareña. Una visión de la mano del Grupo Espeleológico Edelweiss*. Diputación Provincial de Burgos.
- Panissod C., Dabas M., Florsch N., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh A., Tabbagh J. 1998. Archaeological prospecting using electric and electrostatic mobile arrays. *Archaeological Prospection*, 5, 239-251.
- Papadopoulos N. G., Tsourlos P., Tsokas G. N., Sarris A. 2006. Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13, 163-181.
- Piro S., Tsourlos P., Tsokas G. N. 2001. Cavity detection employing advanced geophysical techniques: a case study. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 6, 3-31.
- Piro S. 2009. Introduction to geophysics for archaeology. En: Campana S. y Piro S. (eds.), *Seeing the unseen – Geophysics and landscape archaeology*. Taylor y Francis Group, London, pp. 27-64.
- Piscitelli S., Rizzo E., Cristallo F., Lapenna V., Crocco L., Persico R., Soldovieri F. 2007. GPR and microwave tomography for detecting shallow cavities in the historical area of “Sassi of Matera (southern Italy)”. *Near Surface Geophysics* 5(4), 275-284.
- Revil A., Karaoulis M., Johnson T., Kemna A. 2012. Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeology Journal* 20(4), 617-658.
- Reynolds J.M. 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd edition. John Wiley y Sons Ltd, Chichester, UK.
- Ritz M., Robain H., Pervago E., Albouy Y., Camerlynck C., Descloitres M., Mariko A. 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting* 47 (2), 85-101.
- Robain H. y Bobachev A. 2017. *X2IPI Toolbox for 2D Electrical Resistivity Tomography and IP measurements*. User manual.
- Robert T., Dassargues A., Brouyere S., Kaufmann O., Hallet V., Nguyen F. 2011. Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and selfpotential (SP) methods for a water well drilling program in fractured/karstified limestones. *Journal of Applied Geophysics* 75(1), 42-53.

- Rudis B., Ross N., Garnier S. "The viridis color palettes." 2018-03-29 <https://cran.r-project.org/web/packages/viridis/vignettes/intro-to-viridis.html>
- Sala R., Garcia E., Tamba R. 2012. Archaeological Geophysics – From Basics to New Perspectives. In: Ollich-Castanyer I. (ed.), *Archaeology, New Approaches in Theory and Techniques*, pp. 133-166.
- Seigel H. O. 1959. Mathematical formulation and type curves for induced polarization, *Geophysics*, 24, 547-565.
- Scantech Geosciences. About GPR. Acceso 2020-20-23 <http://scantech.ie/scantech-about-gpr.html>
- Schlumberger C. 1920. Étude sur la prospection électrique du sous-sol. Chap. VIII, Gauthier-Villars et Cie, Paris.
- Schollar I., Tabbagh A., Hesse A., Herzog I. 1990. *Archaeological Prospecting and Remote Sensing: Topics in Remote Sensing*, 2, Cambridge University Press.
- Schrott L. y Sass O. 2008. Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology* 93(1), 55-73.
- Sheets P. D., Loker W. M., Spetzler H. A. W., Ware R. W. 1985. Geophysical Exploration for Ancient Maya Housing at Ceren, El Salvador. *National Geographic Research Reports* 20, 645-656.
- Silvester P.P. y Ferrari R. L. 1990. *Finite elements for electrical engineers* (2nd. ed.). Cambridge University Press.
- Slater L. D. 2007. Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries - a review. *Surveys in Geophysics*, 28, 169-197.
- Smith D. L. 1986. Application of the pole-dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways. *Geophysics* 51, 833-837.
- Stern W. 1929. Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis. *Beitrage zur Geophysik* 23, 292-333.
- Swithinbank C. S. M. 1968. Radio echosounding of Antarctic glaciers from light aircraft. *International Association of Hydrological Sciences*, 79, 405-414.
- Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. 1990. *Applied Geophysics*, 2nd edition. Cambridge University Press.
- Turrero M. J., Garralón A., Sánchez L., Ortega A. I., Martín-Chivelet J., Gómez P., Escribano A. 2015. Variations in trace elements of drip waters in Kaite Cave (N Spain): significance in terms of present and past processes in the Karst system. En: Andreo B., Carrasco F., Durán J. J., Jiménez P., LaMoreaux J. W. (eds.), *Hydrogeological and environmental investigations in Karst systems*. *Environmental Earth Sciences* 1, Springer, Berlin, pp. 579-586.
- Valois R., Bermejo L., Guérin R., Hinguant S., Pigaud R., Rodet J. 2010. Karst morphologies identified with geophysics around Saulges caves (Mayenne, France). *Archaeological Prospection* 17(3), 151-160.
- Van der Walt S. y Smith N. "mpl colormaps." Acceso 2020-02-10. <http://bids.github.io/colormap/>
- Van der Walt S. y Smith N. "A Better Default Color Map for Matplotlib." 2015-07-08. <https://youtu.be/xAoljeRJ3IU>

Vaquier V., Holmes C. R., Kintzinger P. R., Lavergne, M. 1957. Prospecting for ground water by induced polarization. *Geophysics*, 22, 660-687.

Vaughan C. J. 1986. Ground-Penetrating Radar Surveys Used in Archaeological Investigations. *Geophysics*, 51(3), 595-604.

Vickers R. y Dolphin L. 1975. A Communication on an Archaeological Radar Experiment at Chaco Canyon, New Mexico. *MASCA Newsletter* 11(1), 6-8.

Vickers R., Dolphin L., Johnson. D. 1976. Archaeological Investigations at Chaco Canyon Using a Subsurface Radar. En: Lyons T. R. (ed.). *Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies*. Chaco Center: USDI-NPS and University of Mexico, pp. 81-101.

Watters M. 2009. The complementary nature of geophysical survey methods. En: Campana S. y Piro S. (eds.), *Seeing the unseen – Geophysics and landscape archaeology*. Taylor y Francis Group, London, pp. 183-199.

Watts R. D., England A. W., Vickers R. S., Meier M. F. 1975. Radio-echo sounding on South Cascade Glacier, Washington, using a long-wavelength, mono-pulse source. *Journal of Glaciology*, 15, 459-461.

Weinstein-Evron M., Beck A., Ezersky M. 2003. Geophysical investigations in the service of Mount Carmel (Israel). *Journal of Archaeological Science* 30(10), 1331-1341.

Weller A., Brune S., Hennig T., Kansy A. 2000. Spectral induced polarisation at a medieval smelting site. 6th Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section), Bochum 2000.

Wenner F. 1915. A method of measuring earth resistivity. Bureau of Standards Scientific Paper 258. Washington, DC: United States Department of Commerce.

Wenner F. 1916. A method of measuring earth resistivity. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 12(3), 469-482.

Zhou B. y Dahlin T. 2003. Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics* 1, 105-117.

## **ANEXO I**

### **Publicaciones**





Contents lists available at ScienceDirect

# Quaternary International

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/quaint](http://www.elsevier.com/locate/quaint)

## 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain)



Lucía Bermejo <sup>a, b, h, \*</sup>, Ana Isabel Ortega <sup>a, c</sup>, Roger Guérin <sup>d</sup>, Alfonso Benito-Calvo <sup>a</sup>, Alfredo Pérez-González <sup>a</sup>, Josep M. Parés <sup>a</sup>, Enrique Aracil <sup>e</sup>, José María Bermúdez de Castro <sup>a</sup>, Eudald Carbonell <sup>f, g, h</sup>

<sup>a</sup> Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain

<sup>b</sup> Escuela Interuniversitaria de Posgrado en Evolución Humana, C/ Don Juan de Austria, n° 1, 09001 Burgos, Spain

<sup>c</sup> Grupo Espeleológico Edelweiss, Excma. Diputación Provincial de Burgos, C/Paseo del Espolón s/n, 09071 Burgos, Spain

<sup>d</sup> Sorbonne universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7619, METIS, F-75005 Paris, France

<sup>e</sup> Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. c/ Luxemburgo, 4, portal 1, oficina 3, 28224, Pozuelo de Alarcón, Madrid, Spain

<sup>f</sup> IPHES, Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social. Unitat associad al CSIC, C/ Escorxador s/n, 43003 Tarragona, Spain

<sup>g</sup> Universitat Rovira i Virgili (URV), Campus Catalunya, Avinguda de Catalunya 35, 43002 Tarragona, Spain

<sup>h</sup> Equipo de Investigación Primeros Pobladores de Extremadura, Casa de Cultura Antonio Rodríguez Moñino, Avda. Cervantes s/n, 10003 Cáceres, Spain

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Available online 16 January 2016

#### Keywords:

Electrical resistivity tomography  
Cave  
Geoarchaeological exploration  
Sierra de Atapuerca sites  
Karst geomorphology

### ABSTRACT

This work focusses on the Sierra de Atapuerca Thinchera karst system, in which Gran Dolina and Galería Complex sites are located. A total of eight ERT profiles were performed over an area that covers both sites, with the aim of identifying the dimensions and continuity of these passages. The interpretation of the 2D and 3D profiles has allowed determining the extension of the conduits as well as the presence of a filled entrance that might be common to both sites. With the aid of 2D modelling experiments it was also possible to resolve some of the hypothesis raised from the interpretation of the 2D pseudosections. All these data have ultimately lead to a better understanding of the karst and sites' formation process.

© 2015 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

### 1. Introduction

Karst systems are complex environments for geophysical exploration due to the high variability of their morphologies (Chalikakis et al., 2011). Among the geophysical prospecting methods ERT (Electrical Resistivity Tomography) has proved to be an effective and non-destructive tool to determine with accuracy the size, location and characterization of the different karst features (Piro et al., 2001; Zhou et al., 2002; Cardarelli et al., 2006; Guérin et al., 2009; Bermejo et al., 2014b) based on the contrast of the different resistivity values as, particularly, between the limestone host rock and the detrital sediments.

The results provided by the geophysical surveys carried out in karst Paleolithic sites (Bermejo et al., 2010; Valois et al., 2010;

Martínez-Moreno et al., 2014), have highlighted the importance of such studies for both a better understanding of the sites' geometry and formation processes, as for excavation planning strategies. The previous geophysical work developed at the Sierra de Atapuerca archaeo-palaeoanthropological sites (Ortega et al., 2010; Bermejo et al., 2014a) showed the existence of different endokarst morphologies that supported the execution of new profiles. In this paper we report the results of eight profiles performed over Gran Dolina and Galería Complex sites, whose dimensions and proximity predict the presence of a complex geology. The principal aim of this research was to find the entrances to these filled conduits and to understand their development.

The archaeological complex of Sierra de Atapuerca is one of the most important spots for understanding human evolution in Europe as it hosts one of the largest collections of human fossils and cultural remains from the Early and Middle Pleistocene (Bermúdez de Castro et al., 1997; Carbonell et al., 2008; Rodríguez et al., 2011; Martín-Torres et al., 2012; Ollé et al., 2013; Arsuaga et al., 2014). Therefore, a better understanding of the cave features and site

\* Corresponding author. Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain.

E-mail address: [lucia.bermejo@fa.cenieh.es](mailto:lucia.bermejo@fa.cenieh.es) (L. Bermejo).

formation is critical for stratigraphic, taphonomic and environmental reconstructions, as for planning different kinds of archaeological sampling procedures.

## 2. Regional setting

The Sierra de Atapuerca is situated in the NE area of the Duero Depression. It is a positive relief that geologically corresponds to a NW–SE trending anticline, composed mainly of Upper Cretaceous limestones and dolostones and constitutes the NW extreme of the Iberian Chain (Fig. 1). It is connected to the NE with the Cenozoic Ebro Basin through the Bureba Corridor and to the W with the Cenozoic Duero Basin, whose upper part is made by alluvial and lacustrine conglomerates and clays deposited under endorheic conditions (Benito-Calvo and Pérez-González, 2007; Benito-Calvo et al., 2008).

From the end of the Neogene, when the Duero Basin was opened to the Atlantic Ocean, these sediments started to be eroded by the drainage network represented by the Arlanzón River and its tributaries, the Vena and Pico Rivers (Benito-Calvo, 2004; Benito-Calvo and Pérez-González, 2015) (Fig. 1). This fluvial network generated a stepped sequence of terraces (Benito-Calvo et al., 2008, 2015) and a multilevel cave system related to the incision of the rivers' base level (Ortega, 2009).

### 2.1. The multilevel cave system

The Sierra de Atapuerca caves are developed in the San Vicente Hill (1085 m a.s.l.), over a thickness between 40 and 70 m, and organized in three subhorizontal levels. The conduits are orientated parallel to the hill's slope and their development is strongly controlled by the tectonic structure and the rock's stratification (Ortega et al., 2013). The different karst levels are connected by pits and chambers in several spots of the karst system.

This multilevel karst is separated by the Propiedad Valley in two different cave systems: the Cueva Mayor-Cueva del Silo system, which has 4.7 km of explored passages, and the Trinchera system. The latter was discovered at the end of the 19th century by a railway trench (Trinchera) that cut the southwestern flank of the hill, uncovering the cave entrances completely filled with sediments (Ortega et al., 2014). Among them, there are the archaeo-palaeoanthropological sites of Gran Dolina and Galería Complex, on which this work is focused (Figs. 2 and 3).

These sites correspond to the intermediate level of the karst, whose conduits show vadose entrenchments and keyhole cross

sections (Ortega et al., 2013). These conduits were abandoned hydrologically in the Lower Pleistocene (Parés and Pérez-González, 1995; Pérez-González et al., 2001; Ortega et al., 2013; Benito-Calvo et al., 2015) and their entrance sectors completely filled with clastic sediments that block the entry to the passages (Fig. 3).

The lower level of the karst in this sector (Cueva del Compressor) shows scallops in the walls indicating an upward flow, which reveals the connection between the intermediate and the lower level. Other passages of the lower level (Silo and Peluda Caves) have been partially filled with fluvial deposits from the Arlanzón River consisting of metamorphic pebbles, sand and silt facies (Ortega et al., 2014).

### 2.2. The sites

#### 2.2.1. Gran Dolina

Gran Dolina is an Early and Middle Pleistocene site of the intermediate level. Its 25 m thick sequence is divided into 11 units (Campaña et al., 2015) that cover a range of about 1 million years, this is, from the  $1.25 \pm 0.13$  Ma of unit TD1 (Moreno et al., 2015) to the 0.2–0.24 Ma of unit TD11 (Berger et al., 2008).

Units TD1 and TD2 are autochthonous facies that indicate a closed cave environment and are archaeologically sterile. The remaining units (TD3–TD11) represent, for the most part, allochthonous facies, typical for areas close to cave entrances and consist mainly of mud, breccias, laminated silts and some layers of speleothems (Campaña et al., 2015) (Fig. 3). The last process of infilling is a *terra rossa* soil formation, currently visible in the chimneys (Pérez-González et al., 2001). The most remarkable unit from an archaeological point of view is TD6, worldwide known for the human remains that it preserves and that were proposed as a new species, *Homo antecessor* (Bermúdez de Castro et al., 1997).

#### 2.2.2. Galería Complex

Galería Complex is a Middle Pleistocene site located in the intermediate level of the karst. Its sedimentary infill is made up by five lithostratigraphic units, GI to GV. The oldest unit, GI, corresponds to autochthonous facies consisting of laminated silts and limestone breccias (Pérez-González et al., 2001), while units GII to GIV are allochthonous and composed of calcareous fluvial gravels and laminated sandy clay-loams (Ortega et al., 2014) (Fig. 3).

A large assemblage of Mode 2 lithic artefacts in association with a rich Middle Pleistocene fauna record and two fossil human remains (Carbonell et al., 1999; Ollé et al., 2013) have been found in units GII and GIII, which have been dated around 500 ka–250 ka

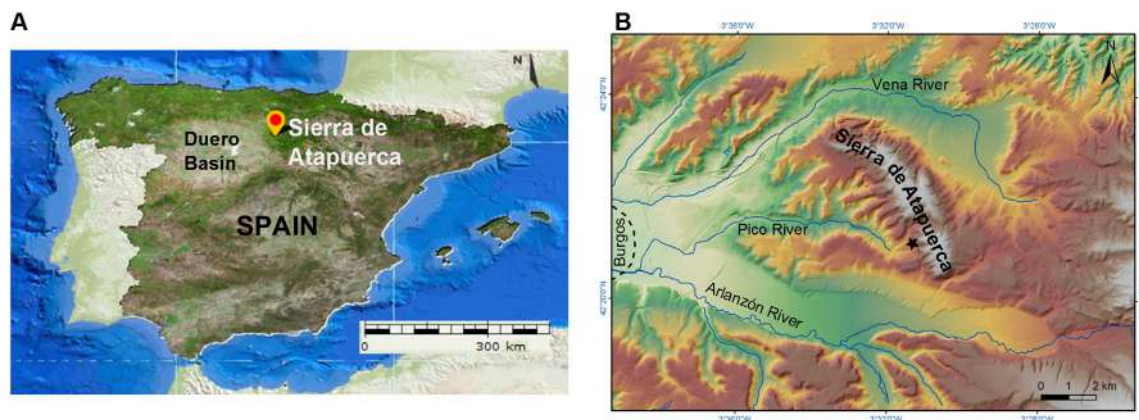


Fig. 1. A. Location of the Sierra de Atapuerca in the Iberian Peninsula. B. Detail of the Sierra de Atapuerca Asterisk marks the location of the sites (LiDAR DEM of the study area (CNIG, Spanish Geographical Institute).

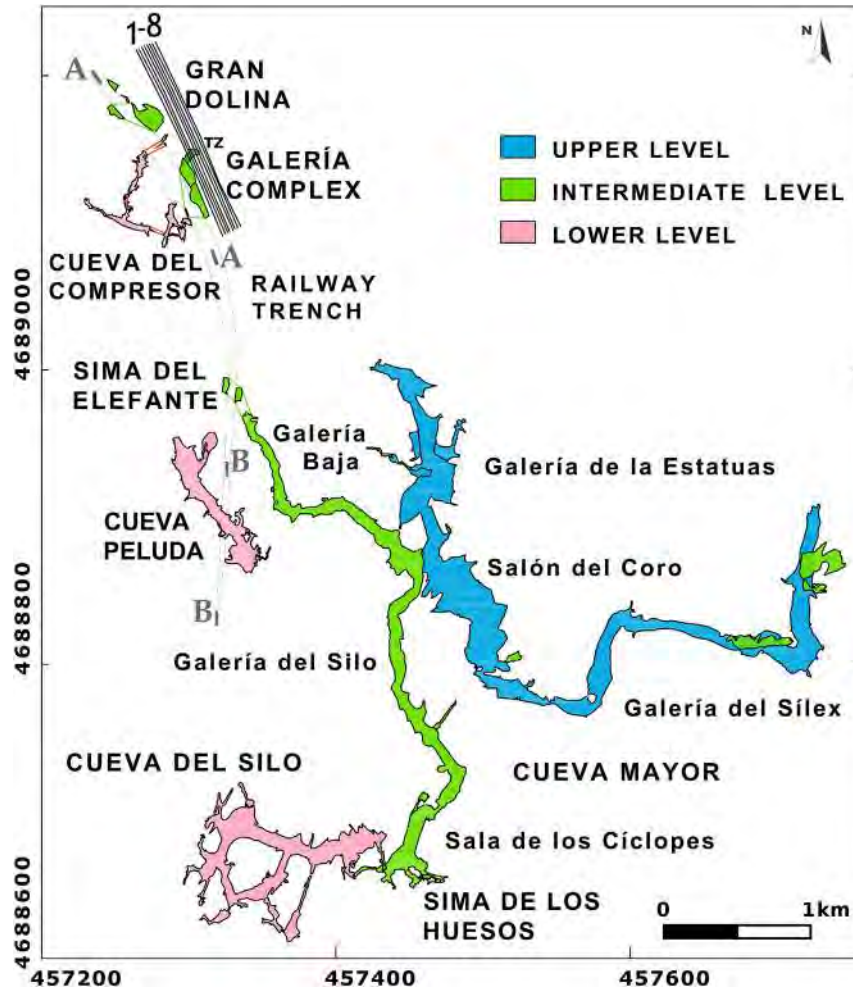


Fig. 2. Map of the Atapuerca multilevel cave system with the location of the eight ERT profiles indicated. A shows the limits of the longitudinal profile represented in Fig. 3 and B the ones from Fig. 4 (modified from Ortega et al., 2013).

(Berger et al., 2008; Falguères et al., 2013; Demuro et al., 2014). This site has been interpreted as a natural trap for animals (especially herbivores), that carnivores and humans used to access their carcasses (Ollé et al., 2005; Cáceres et al., 2010). The natural trap, according to the inclination of the layers, matches the vertical entrances of Tres Simas (Fig. 3) (Pérez-González et al., 2001), whereas the entrance used by humans and carnivores is expected to be the one nearer to Zarpazos (TZ) (Figs. 2 and 3).

3. Materials and methods

3.1. ERT methodology

Geophysical electrical methods calculate the electrical resistivity of the subsurface. This is achieved by injecting an electrical current into the ground through two electrodes and measuring the electrical potential difference at two other electrodes.

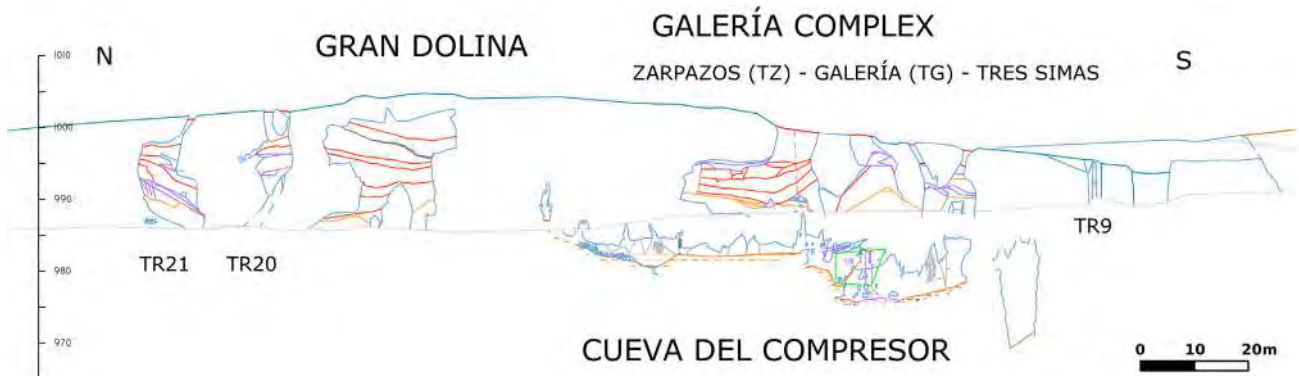


Fig. 3. Detail of the longitudinal profile of the Trincheras system where Gran Dolina and Galería Complex sites are located (A in Fig. 2). The base of railway trench is indicated in light grey (simplified from Ortega, 2009).



2D ERT imaging consists in a combination of multiple electrodes along a rectilinear profile with increasing inter-electrode spacing, so that it allows different apparent resistivity values to be recorded at various depths.

Depending on the array geometry, this is, on the display of the aforementioned four electrodes, different depth penetration and resolution can be obtained. In this work, the Wenner-Schlumberger (WS) array type was chosen, as it has deeper penetration and better depth determination (Dahlin and Zhou, 2004) than Dipole–Dipole (the other common array used for archaeological and karst surveys), since the desired targets are not necessarily close to the surface. Nevertheless, it is important to keep in mind that the resolution of the acquired data decreases exponentially with depth.

The ERT acquisition was performed using a Syscal Pro resistivity meter (IRIS Instruments), which was connected to a linear array of 72 electrodes evenly spaced every 2 m. In total, we acquired eight parallel profiles 142 m long, separated among them by 2 m, over an area that covers Gran Dolina and Galería Complex sites.

### 3.2. 2D and 3D imaging processing

Data were first processed with the Prosys II software (IRIS Instruments) and then effects C and P were filtered with the X2ipi software (© Alexei A. Bobachev).

Res2Dinv software (version 3.59.119, Geotomo Software) was used to transform the apparent electrical resistivity values into a 2D model of the subsurface represented in model blocks (Loke and Barker, 1996). Inversions were performed using the robust data constraint option, which tends to produce models with a much sharper and straighter boundary between different regions with different resistivity values (Loke et al., 2003, 2014), as it is expected in karst environments. Topographic adjustments were carried out during the inversion procedure.

Res3Dinv software (version 3.10.02) was used to combine the data of the eight 2D survey lines from Gran Dolina and Galería Complex into a 3D data set and create depth slices. This allows locating the different anomalies in space and depth, providing a better relationship with the already known endokarst morphologies. For 3D inversions we also chose the robust option.

The ranges of the logarithmic color scale were established taking into account the ERT profile made over Cueva Peluda (Fig. 4),

where, thanks to the topographic maps elaborated by the Speleological Group Edelweiss, it was possible to determine the exact location of the cave in the profile. This allowed assigning resistivity values higher than 6575  $\Omega$  m to the aerial part of the cave and lower than 500  $\Omega$  m to the detrital infillings. However, as the sediments of Dolina and Galería Complex sites are expected to be located under the high resistive limestone host rock (<3000  $\Omega$  m), the limit attributed to the infillings was raised up to 655  $\Omega$  m for these profiles. Both boundaries (655  $\Omega$  m and 6575  $\Omega$  m) are indicated in each profile by a thick black line.

The depth of investigation index (DOI) defined by Oldenburg and Li (1999) and modified by Marescot et al. (2003) was calculated with the Res2Dinv software. The isocurves of the recommended cut-off value of 0.1 is shown over the profiles by a thick white line. The DOI index is used for assessing the reliability of the data and its calculation has been employed in karst environments which require investigations at large depth (Robert et al., 2011; Martínez-Moreno et al., 2013).

### 3.3. 2D imaging experiments

The Res2Dmod software was used for the designing of two different simplified models of the site. This program calculates the apparent resistivity pseudosection for a user defined 2D subsurface model (Loke, 2014), which is then exported to a Res2Dinv format and treated as it was real data. This method has been largely used in methodical papers to display the effects of different array types (Dahlin and Loke, 1998; Loke et al., 2003; Gharibi and Bentley, 2005; Athanasiou et al., 2007; Candansayar, 2008; Orlando, 2013; Tsourlos et al., 2014; Loke et al., 2015). In this work it has been applied to discard or maintain some of the hypothesis developed from the profiles.

### 3.4. Drillings

A mechanical test drilling with core recovery was performed over the most interesting area in order to check results and assess the quality of data. This test is situated in coordinates X: 457200.735, Y: 4688942.957 and Z: 1005.36 m a.s.l (ETRS89/UTM zone 30N) and reached a depth of 18 m.

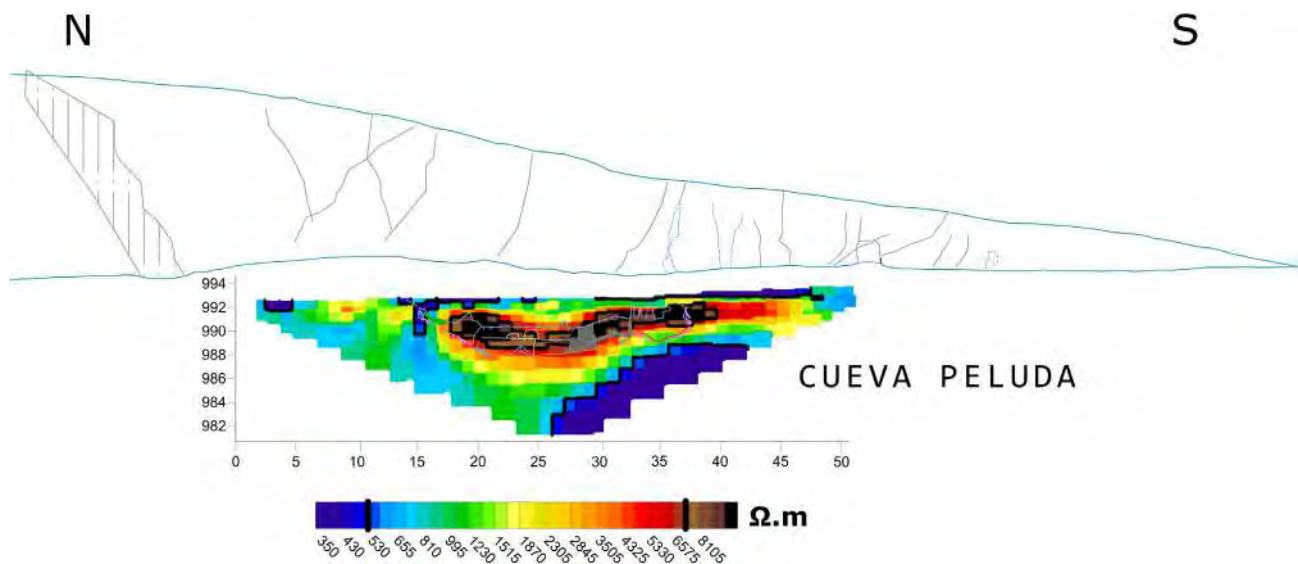


Fig. 4. 2D ERT profile that detected Cueva Peluda, displayed over the longitudinal profile of the Trinchera system (B in Fig. 2) (modified from Ortega et al., 2010).

## 4. Results and discussion

### 4.1. 2D profiles

The first two parallel profiles (Fig. 5) show two conductive anomalies (A and B) that can be clearly related, due to the dimension and location, to Gran Dolina and Galería Complex sites respectively. There is a third conductive anomaly (C) found just over Gran Dolina's ceiling that can be associated to a higher filled hole unknown to present. On the contrary, it is not possible to determine the morphology of the low resistive body (D), from profile 2, as it is found on the edge of the profile (Fig. 5). There is not clear evidence of significant void spaces or of a connection between the two sites, as they appear to be divided by high resistivity values (<2000  $\Omega$  m) attributed to the limestone host rock.

In profiles 3 and 4 (Fig. 5) there is a sudden loss of the separation of conductive anomalies A and B, and a smaller and more resistive anomaly appears instead. As this body is closer to anomaly A and there is a much higher resistive body almost on the same spot and with the same geometry than anomaly B, it is not possible to determine whether this is the junction point of both conduits or just the continuity towards the SE of Gran Dolina conduit. In the latter case, resistivity values <1000  $\Omega$  m should be taken into account and explained by more resistive sediments such as autochthonous sandy facies or the presence of abundant blocks (e.g., from ceiling collapse). Anomaly C is still located in the same spot in both profiles and something similar as what has been described for B happens with anomaly D.

Profiles 5–7 (Fig. 5) show a 10 m wide conductive anomaly associated to a sharp boundary and clearly connected to the surface. Again, this can be the connection point of anomalies A and B or the

continuity of just one of them, but, as it is located in the middle of both A and B (from profiles 1 and 2), it has been named AB. Anyhow, it is possible that this anomaly represents a much larger conduit filled by sediments, and that the values around 1000  $\Omega$  m indicate infills, as it has been pointed out for B in profiles 3 and 4. In that case, the conduit could become wider at profile 6. Anomaly C is still visible in profile 5 and there is another small body of low resistivity values (E) in profiles 5 and 6. Anomaly D continues to appear on the same spot and with the same dimensions.

Last, the size of anomaly AB decreases in profile 8 (Fig. 5) and, if the resistivity values around 800  $\Omega$  m (F and G) are considered as sediments, this can represent a split of the conduit. The high resistive anomaly (a), which resistivity values are the same than the void space of Cueva Peluda, has a significant size to be taken into account. Moreover, the fact that it is located right beside the filled entrance AB can indicate that this is an aerial part of a cave.

In summary, there is clear evidence for the presence of infilled conduits associated to both Gran Dolina (A) and Galería Complex (B) sites. In the case of Gran Dolina, it is possible to determine that the conduit evolves into an ESE direction, a fact that has already been suggested by Ortega (2009) based on the orientation of the cave walls (Fig. 2). There is also clear evidence for a connection of the infillings with the surface, as anomaly AB is present, with the same dimensions, in at least four profiles (Fig. 5). Indeed, AB can indicate a common entrance area for both sites, which, taken into account its vertical orientation, could correspond to a ceiling collapse doline, a process common in this area of the karst (Ortega et al., 2013). Three additional small closed infillings (C, D and E), located at a higher level than the ceilings of Gran Dolina and Galería Complex caves, can be related to the upper level of the karst. This fact makes them susceptible of containing deposits with older

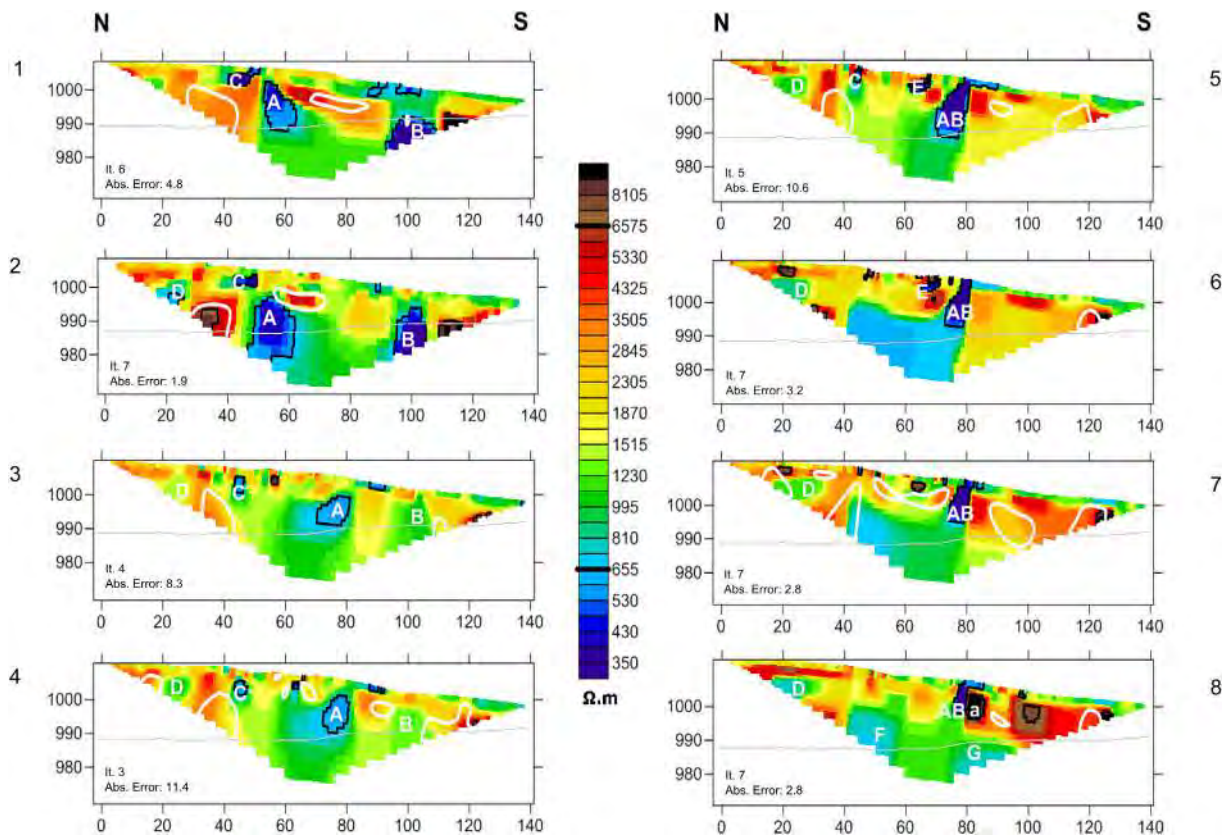


Fig. 5. 2D ERT profiles. The base of railway trench is indicated in light grey.



remains, as they must have been hydrologically abandoned before and presumably filled earlier in time too. Finally, there is only a high resistive anomaly (a) that may suggest the presence of an empty space, possibly connected to the ceiling from Cueva de los Zorros quarry (Ortega, 2009) (Fig. 7).

4.2. 2D modelling

In order to confirm the hypothesis from the interpretation of the 2D profiles, two simplified different scenarios were considered (Fig. 6). One with two separated infillings of 400 Ω m under a 1000 Ω m ground in a host rock of 4000 Ω m (Fig. 6(1)) and a second model where the two conductive anomalies are connected at the bottom and surrounded by 6500 Ω m resistivity values, as if they were aerial parts of a cave (Fig. 6(2)).

Results show that, for the first case, both bodies (A and B) appear clearly separated, although resistivity values decrease towards the bottom. It is to be noticed the 15 m wide high resistive anomaly (b) that appears over B (Fig. 6(1)). This has to be a consequence of the inversion routine, as there is nothing in the model to explain it.

As far as model 2 (Fig. 6(2)), where A and B are connected, the resistivity values connecting both bodies do not show any significant difference compared to model 1. With regard to the 6500 Ω m resistivity bodies designed on model 2, only the left one (b) is visible, although it is noticeable that it appears just in the same place as the anomaly of profile 1 (Fig. 6(2)). Moreover, there is an extra 10 m wide <6500 Ω m anomaly (c) located next to it that, as in profile 1, must be a result of the inversion method. On the contrary, the 6500 Ω m body located in the model on the right side of B, has left no print in the processed profile (Fig. 6(2)).

According to these results, the resistivity values around 800 Ω m may be considered as infills. If that is the case, A could represent Gran Dolina's filled conduit from profile 1 to 4 and the AB anomaly of profile 5, a common entrance area to both Gran Dolina and Galería Complex sites. Then, this entrance would lead to a wider conduit (AB in profile 6 and 7) that is eventually divided into two again in profile 8. The high resistive anomaly (a) in profile 8 is the only one susceptible of corresponding to a large void, as, according

to model 2, it has to have a considerable dimension so that the conductive values of anomaly AB do not mask it.

4.3. 3D profiles

3D profiles are arranged in deep horizontal slices to a depth of 20 m (Fig. 7). The deeper slices were discarded from the interpretation as the inversion algorithm may become unstable at that depth. These results complement the 2D ones, as the inversion process takes into account the real 3D nature of the subsoil. However, as the interpolation equation is different from the 2D profiles, some results may vary a little.

For instance, in slice 1 it is possible to recognize anomalies C and AB, but there is a 10 m wide conductive body (H) which was overlooked in the 2D slices. Nonetheless, as in the next slice it is no longer observed, we can determine that this body is a very shallow exokarst morphology. Anyhow, this interpretation must be taken with caution, as this area is close to Cueva de los Zorros quarry and anomalies may be the result of human activity.

The most interesting slice is number 3, where the continuity towards the ESE of Gran Dolina (anomaly A) is clearly visible. It is also remarkable the position of AB right beside TZ, which is thought to be one of the entrance areas of the sediments in Galería Complex. Anomalies B and C are also visible at the edge of the slice. In regards to B, and according not only to this slice but to the rest of them, it does not penetrate inside the hill.

In slice 4 there are two anomalies related to 800 Ω m. On the one hand, there is a 7 m wide circular anomaly (D) that can indicate a small filled conduit or chimney, such as the ones visible in Trincheras's profile (Fig. 3). On the other, anomaly A seems to turn to the NE at the end on this slice. AB stays in the same location and with the same dimensions until slice number 9 (Fig. 7).

From slice 9, around 15 m deep, there is a much broader body (I), with resistivity values that have been attributed to sedimentary infillings. This body occupies the same space than Gran Dolina and Galería Complex together, although at a lower depth. The fact that the Gran Dolina conduit has disappeared from the slices for almost 10 m, indicates that this new infilling must belong to a conduit related to Galería Complex (B), which is deeper and has not disappear since slice 3.

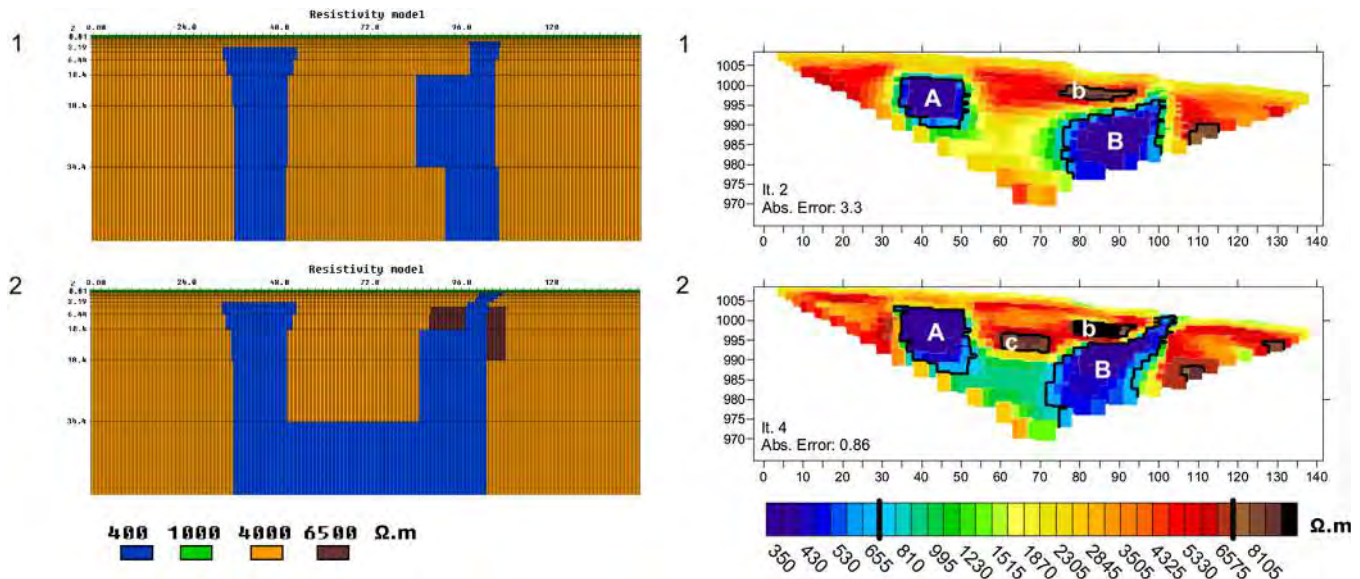


Fig. 6. Experimental 2D imaging models and results.

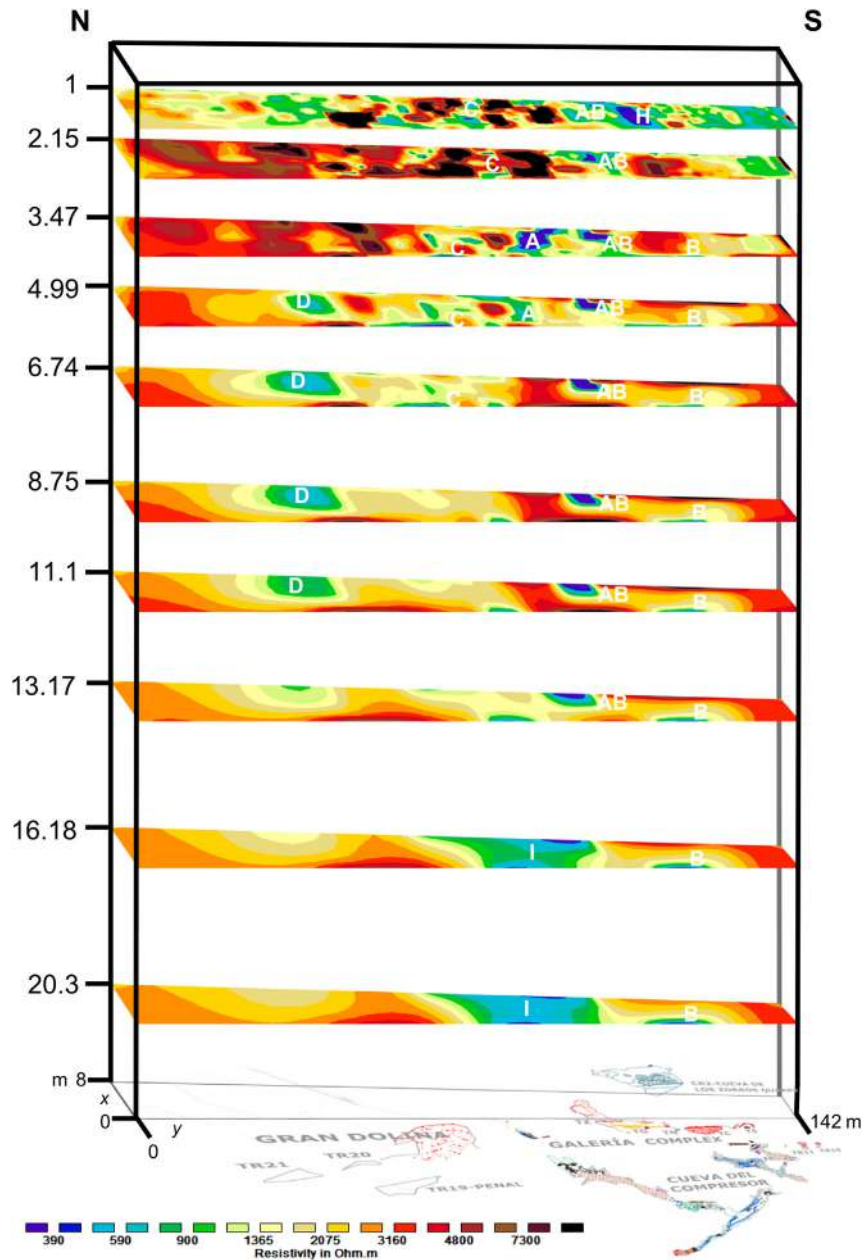


Fig. 7. 3D ERT slices over the corresponding plan of the Sierra de Atapuerca sector.

#### 4.4. Drilling results

The mechanical test drilling with core recovery was performed over anomaly AB, in the place where it connects to the surface, at about 2 m from the end of TZ. Results showed a 1.2 m soil over some weathered limestone that reached  $-2.6$  m. Then, a series of clayey breccia alternating with gravel layers that indicate allocthonous facies, appeared over some sandy sediments consistent with autoctonous facies, at a depth of  $-11.40$  m. This is similar to the stratigraphy described for Galería Complex site, confirming that the point detected by the ERT profiles is the entrance to TZ. Limestone host rock was found at  $-15.90$  m although the drilling continued until  $-17,90$  m to check this fact.

#### 4.5. Final considerations

The results of the geophysical survey show that Gran Dolina and Galería Complex passages are easy to identify in both 2D and 3D, at least in the profiles that are closer to the railroad trench and in the slices nearer to the surface. Results for Gran Dolina suggest that the 30 m long body with an ESE direction is only the phreatic part of the conduit, this is, the upper body of the keyhole morphology. In this sense, the large dimension of Gran Dolina would be the result of the discharge of the converging groundwater from a maze network passages, as it happens in the nearby Cueva del Compressor (Ortega, 2009) (Figs. 2 and 3). On its behalf, the lower sedimentary infills (I) can be part of a broader conduit related to Galería Complex.

Although the lower parts of the profile should always be taken cautiously as resolution is always much lower, the DOI index indicates that most of the data are reliable, except for some high resistive isolated areas.

It is possible that there is a common entrance, ceiling collapse type, related to the limestone fractures, connecting both the phreatic conduit of Gran Dolina and the passage of Galería Complex. Nevertheless, considering the proximity of this entrance to TZ and the age of the deposits and remains found in Galería Complex, this collapse could not have occurred and consequently the entrance was not opened until the Middle Pleistocene (Pérez-González et al., 2001).

## 5. Conclusions

2D and 3D imagining allow determining that at least the phreatic part Gran Dolina cavity, continues with an ESE direction for 30 m, and that Galería Complex extends only through the TZ sector. An unknown conduit 10 m under Gran Dolina and as wide as Gran Dolina and Galería Complex together (I, Fig. 7), is plausible too, although because this data come from the bottom part of the profile it should be taken with caution. There is a clear vertical entrance (AB) connected to Galería Complex through TZ, that may also be common for the phreatic part of Gran Dolina. Such opening must correspond to a ceiling collapse that may not have occurred until the Middle Pleistocene, considering the age of the sedimentary infillings of the closest site, TZ.

In terms of archaeology, anomaly AB is the most remarkable area, as it is most likely the entrance used by Middle Pleistocene humans and carnivores to enter Galería Complex site. In addition, anomalies C, D and E are of high interest as well, as its high elevation suggests they may have opened before the caves of the intermediate level and contain older archaeo-paleontological remains. All these conduits are very close to the surface and therefore, very accessible to archaeological survey. Finally, there seems to be little evidence of void karst structures.

This work shows the suitability of the ERT technique for prospecting karst environments, as it has allowed identifying the morphology of caves as well as the presence of infilled conduits susceptible of bearing archaeological sequences.

## Acknowledgments

The corresponding author is beneficiary of a Fundación Atapuerca Pre-doctoral Grant. A.I.O. has been supported by a post-doctoral grant from Juan de la Cierva Subprogram (JCI-2010-06792) and a 2014 MINECO CGL2009-1273-C03-01 contract. Research at the Sierra de Atapuerca sites are supported by the MINECO project CGL2012-38434-C03-02 and archaeological fieldwork is also supported by the Consejería de Cultura y Turismo of the Junta de Castilla y León. This manuscript has improved thanks to the help of Dr. M. H. Loke and the comments of two anonymous reviewers who contributed with their comments and ideas. It has also benefited from discussions with Isidoro Campaña Lozano. Authors are grateful to the multidisciplinary Research Team of the Sierra de Atapuerca (EIA), among which a special memory for Jaume Guiu, and the Grupo Espeleológico Edelweiss for its constant scientific and logistic support.

## References

Arsuaga, J.L., Martínez, I., Arnold, L.J., Aranburu, A., Gracia-Téllez, A., Sharp, W.D., Quam, R.M., Falguères, C., Pantoja-Pérez, A., Bischoff, J., Poza-Rey, E., Parés, J.M., Carretero, J.M., Demuro, M., Lorenzo, C., Sala, N., Martínón-Torres, M., García, N., Alcázar de Velasco, A., Cuenca-Bescós, G., Gómez-Olivencia, A., Moreno, D., Pablos, A., Shen, C.-C., Rodríguez, L., Ortega, A.I., García, R., Bonmatí, A.,

Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2014. Neandertal roots: cranial and chronological evidence from Sima de los Huesos. *Science* 344, 1358–1363.

Athanasios, E.N., Tsourlos, P.I., Papazachos, C.B., Tsokas, G.N., 2007. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Journal of Applied Geophysics* 62, 124–140.

Benito-Calvo, A., 2004. Análisis Geomorfológico y Reconstrucción de Paleopaisajes Neógenos y Cuaternarios en la Sierra de Atapuerca y El Valle Medio del Río Arlanzón. Ph.D. Thesis. Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Geodinámica, Madrid, Spain.

Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Parés, J.M., 2008. Quantitative reconstruction of Late Cenozoic landscapes: a case study in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (2), 196–208.

Benito-Calvo, A., Ortega, A.I., Pérez-González, A., Campaña, I., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2015. Palaeogeographical reconstruction of the Sierra de Atapuerca Pleistocene sites (Burgos, Spain). *Quaternary International*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.034>.

Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., 2007. Erosion surfaces and neogene landscape evolution in the NE Duero Basin (north-Central Spain). *Geomorphology* 88 (3–4), 226–241.

Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., 2015. Geomorphology of the Sierra de Atapuerca and the Middle Arlanzón Valley (Burgos, Spain). *Journal of Maps* 11, 535–544. <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2014.909339>.

Bermejo, L., Guérin, R., Canals, A., 2010. Subsoil Characterization by Electrical Resistivity Tomography around Rosières-la-Terre-des-Sablons site (Lunery, Region Centre, France). *Annali dell'Università di Ferrara Museologica Scientifica e Naturalistica* 6.

Bermejo, L., Ortega, A.I., Aracil, E., Guérin, R., Pérez-González, A., Benito-Calvo, A., Huguet, R., Maruri, U., Pérez, R., Vallverdú, J., Campaña, I., Porres, J.A., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2014a. Aplicación de ERT (electrical resistivity tomography) para la identificación de la morfología sub-superficial del yacimiento de Elefante – Sierra de Atapuerca (Burgos, España). In: *Actas del X Congreso Ibérico de Arqueometría*, pp. 352–363.

Bermejo, L., Ortega, A.I., Guérin, R., Parés, J.M., Benito-Calvo, A., Martín, M.A., Aracil, E., Marauri, U., Porres, J.A., 2014b. Técnicas de prospección geofísica aplicadas a yacimientos kársticos: Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) en el karst de Ojo Guareña (Ojo Guareña, Merindad de Sotoscueva, Burgos). *Cubía* 18, 48–55.

Berger, G.W., Pérez-González, A., Carbonell, E., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Ku, T.L., 2008. Luminescence chronology of cave sediments at the Atapuerca paleoanthropological site, Spain. *Journal of Human Evolution* 55, 300–311.

Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., Carbonell, E., Rosas, A., Martínez, I., Mosquera, M., 1997. A hominid from the Lower Pleistocene of Atapuerca, Spain: possible ancestor to Neandertals and modern human. *Science* 276, 1392–1395.

Cáceres, I., Huguet, R., Rosell, J., Esteban Nadal, M., Saladié, P., Díez, J.C., Ollé, A., Vallverdú, J., García, P., Carbonell, E., 2010. El yacimiento de Galería (Sierra de Atapuerca, Burgos, España): un enclave para la obtención de recursos cárnicos en el Pleistoceno Medio. In: *1a Reunión de científicos sobre cubiles de hiena (y otros grandes carnívoros) en los yacimientos arqueológicos de la Península Ibérica. Zona Arqueológica, Alcalá de Henares*, pp. 157–165.

Campaña, I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Ortega, A.I., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2015. Pleistocene sedimentary facies of the Gran Dolina archaeo-paleoanthropological site (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *Quaternary International*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.04.023>.

Candansayar, M.E., 2008. Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. *Journal of Geophysical Engineering* 5, 290–300.

Carbonell, E., Rosas, A., Díez, J.C. (Eds.), 1999. Atapuerca: Ocupaciones humanas y paleoecología del yacimiento de Galería, 7, pp. 1–390. *Arqueología en Castilla y León*.

Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Parés, J.M., Pérez-González, A., Cuenca-Bescós, G., Ollé, A., Mosquera, M., Huguet, R., van der Made, J., Rosas, A., Sala, R., Vallverdú, J., García, N., Granger, D.E., Martínón-Torres, M., Rodríguez, X.P., Stock, G.M., Vergés, J.M., Allué, E., Burjachs, F., Cáceres, I., Canals, A., Benito-Clavo, A., Díez, C., Lozano, M., Mateos, A., Navazo, M., Rodríguez, J., Rosell, J., Asuaga, J.L., 2008. The first hominin of Europe. *Nature* 425, 465–470.

Cardarelli, E., Di Filippo, G., Tuccinardi, E., 2006. Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study. *Near Surface Geophysics* 4, 387–392.

Chalikakis, K., Plagnes, V., Guérin, R., Valois, R., Bosch, F., 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal* 19, 1169–1180.

Dahlin, T., Loke, M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics* 38, 237–249.

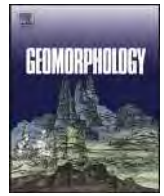
Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379–398.

Demuro, M., Arnold, L.J., Parés, J.M., Pérez-González, A., Ortega, A.I., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2014. New luminescence ages for the Galería complex archaeological site: resolving chronological uncertainties on the acheulean record of the Sierra de Atapuerca, Northern Spain. *Plos One* 9 (10), e110169.

Falguères, C., Bahain, J.-J., Bischoff, J.L., Pérez-González, A., Ortega, A.I., Ollé, A., Quiles, A., Ghaleb, B., Moreno, D., Dolo, J.-M., Shao, Q., Vallverdú, J., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., 2013. Combined ESR/U-series



- chronology of Acheulian hominid-bearing layers at Trincheras Galería site, Atapuerca, Spain. *Journal of Human Evolution* 65, 168–184.
- Gharibi, M., Bentley, L.R., 2005. Resolution of 3-D electrical resistivity Images from inversions of 2-D Orthogonal lines. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 10 (4), 339–349.
- Guérin, R., Baltassat, J.M., Boucher, M., Chalikakis, K., Galibert, P.Y., Girard, J.F., Plagnes, V., Valois, R., 2009. Geophysical characterisation of karst networks application to the Ouyse system (Poumeysen, France). *Comptes Rendus Geoscience* 341, 810–817.
- Loke, M.H., 2014. Rapid 2D Resistivity Forward Modeling Using the Finite-difference and Finite-element Methods. RES2DMOD Ver. 3.01. Geotomo software.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least – square inversion of apparent resistivity pseudo – sections by a quasi – newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152.
- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics* 34, 182–187.
- Loke, M.H., Dahlin, T., Rucker, D.F., 2014. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3-D resistivity surveys. *Near Surface Geophysics* 12, 5–24.
- Loke, M.H., Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Uhlemann, S.S., Sorensen, J.P.R., 2015. Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with a large number of electrodes. *Journal of Applied Geophysics* 112, 136–146.
- Marescot, L., Loke, M.H., Chapellier, D., Delaloye, R., Lambiel, C., Reynard, E., 2003. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method. *Near Surface Geophysics* 1, 57–67.
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., Martos-Rosillo, S., González-Castillo, L., Sánchez-Úbeda, J.P., Marín-Lechado, C., 2013. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology* 162, 67–78.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J.A., González-Castillo, L., Ruiz-Constán, A., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W., 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics* 107, 149–162.
- Martinón-Torres, M., Bermúdez de Castro, J.M., Gómez-Robles, A., Pardo-Simón, L., Arsuaga, J.L., 2012. Morphological description and comparison of the dental remains from Atapuerca-Sima de los Huesos site (Spain). *Journal of Human Evolution* 62, 7–58.
- Moreno, D., Falguères, C., Pérez-González, A., Voinchet, P., Ghaleb, B., Despriée, J., Bahain, J.-J., Sala, R., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., 2015. New radiometric dates on the lowest stratigraphical section (TD1 to TD6) of Gran Dolina site (Atapuerca, Spain). *Quaternary Geochronology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quageo.2015.05.007>.
- Oldenburg, D.W., Li, Y., 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64, 403–416.
- Ollé, A., Cáceres, I., Vergès, J.M., 2005. Human occupations at Galería site (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain) after the technological and taphonomical data. In: Molines, N., Moncel, M.-H., Monnier, J.-L. (Eds.), *Les premiers peuplements en Europe. Colloque international: Données récentes sur les modalités de peuplement et sur le cadre chronostratigraphique, géologique et paléogéographique des industries du Paléolithique ancien et moyen en Europe* British Archaeological Series, International Series, S1364. John and Erika Hedges Ltd, Oxford, 269e280.
- Ollé, A., Mosquera, M., Rodríguez, X.P., de Lombera-Hermida, A., García-Antón, M.D., García-Medrano, P., Peña, L., Menéndez, L., Navazo, M., Terradillos, M., Bargalló, A., Márquez, B., Sala, R., Carbonell, E., 2013. The early and Middle Pleistocene technological record from Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Quaternary International* 295, 138–167.
- Orlando, L., 2013. GPR to constrain ERT data inversion in cavity searching: theoretical and practical applications in archeology. *Journal of Applied Geophysics* 89, 35–47.
- Ortega, A.I., 2009. La Evolución Geomorfológica Del Karst de La Sierra de Atapuerca (Burgos) y Su Relación Con Los Yacimientos Pleistocenos Que Contiene. Ph.D. Thesis. Universidad de Burgos, Facultad de Humanidades y Educación, Departamento de ciencias históricas y geografía, Burgos, Spain.
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Porres, A., Martín, M.A., 2010. Applying electrical resistivity tomography to the identification of endokarst geometries in the Pleistocene sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection* 17, 233–245.
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Martín-Merino, M.A., Pérez-Martínez, R., Parés, J.M., Aramburu, A., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2013. Evolution of multilevel caves in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain) and its relation to human occupation. *Geomorphology* 196, 122–133.
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., 2014. Atapuerca Karst and its palaeoanthropological sites. In: Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (Eds.), *Landscapes and Landforms of Spain, World Geomorphological Landscapes*. Springer Science+Business Media Dordrecht, pp. 101–110.
- Parés, J.M., Pérez-González, A., 1995. Paleomagnetic age for hominid fossils at Atapuerca archaeological site, Spain. *Science* 269 (5225), 830–832.
- Pérez-González, A., Parés, J.M., Carbonell, E., Aleixandre, T., Ortega, A.I., Benito, A., Martín Merino, M.A., 2001. Géologie de la Sierra de Atapuerca et stratigraphie des remplissages karstiques de Galería et Dolina (Burgos, Espagne). *L'Anthropologie* 105, 27–43.
- Piro, S., Tsourlos, P., Tsokas, G.N., 2001. Cavity detection employing advanced geophysical techniques: a case study. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 6, 3–31.
- Robert, T., Dassargues, A., Brouyère, S., Kaufmann, O., Hallet, V., Nguyen, F., 2011. Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods for a water well drilling program in fractured/karstified limestones. *Journal of Applied Geophysics* 75 (1), 42–53.
- Rodríguez, J., Burjachs, F., Cuenca-Bescós, G., García, N., Van der Made, J., Pérez González, A., Blain, H.-A., Expósito, I., López-García, J.M., García Antón, M., Allué, E., Cáceres, I., Huguet, R., Mosquera, M., Ollé, A., Rosell, J., Parés, J.M., Rodríguez, X.P., Díez, C., Rofes, J., Sala, R., Saladié, P., Vallverdú, J., Bennisar, M.L., Blasco, R., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2011. One million years of cultural evolution in a stable environment at Atapuerca (Burgos, Spain). *Quaternary Science Reviews* 30 (11–12), 1396–1412.
- Tsourlos, P., Papadopoulos, N., Papazachos, C., Yi, M.-J., Kim, J.-H., 2014. Efficient 2D inversion of long ERT sections. *Journal of Applied Geophysics* 105, 213–224.
- Valois, R., Bermejo, L., Guérin, R., Hinguant, S., Pigaud, R., Rodet, J., 2010. Karst morphologies identified with geophysics around Saulges caves (Mayenne, France). *Archaeological Prospection* 17, 151–160.
- Zhou, W., Beck, B.F., Adams, A.L., 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology* 42, 922–928.



# Karst features interpretation using ground-penetrating radar: A case study from the Sierra de Atapuerca, Spain

Lucía Bermejo <sup>a,b,\*</sup>, Ana Isabel Ortega <sup>a,c,d</sup>, Josep M. Parés <sup>a</sup>, Isidoro Campaña <sup>a</sup>, José María Bermúdez de Castro <sup>a</sup>, Eudald Carbonell <sup>e,f</sup>, Lawrence B. Conyers <sup>g</sup>

<sup>a</sup> Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain

<sup>b</sup> Doctorado en Evolución Humana, Universidad de Burgos, C/ Don Juan de Austria, 1, 09001 Burgos, Spain

<sup>c</sup> Fundación Atapuerca, Carretera de Logroño, 44, 09198 Ibeas de Juarros, Burgos, Spain

<sup>d</sup> Grupo Espeleológico Edelweiss, Excma. Diputación Provincial de Burgos, C/Paseo del Espolón s/n, 09071 Burgos, Spain

<sup>e</sup> IPHES, Institut Català de Paleoeologia Humana i Evolució Social, Unidad asociada al CSIC, C/Escurador s/n, 43003 Tarragona, Spain

<sup>f</sup> Universitat Rovira i Virgili (URV), Campus Catalunya, Avinguda de Catalunya 35, 43002 Tarragona, Spain

<sup>g</sup> Department of Anthropology, University of Denver, 2000 E. Asbury Ave., Denver, CO 80208, USA

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 10 January 2020

Received in revised form 16 June 2020

Accepted 16 June 2020

Available online 19 June 2020

### Keywords:

Geophysics

Karst sediments

Trinchera del ferrocarril

Pleistocene

Radar waves

## ABSTRACT

We used ground-penetrating radar (GPR) to identify a variety of karstic features in the archaeo-paleontological sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). The aim of this study was to discover the structure of the caves exposed in the 19th century by a railroad trench, specifically their bottom part, which remains covered under the railroad current surface. For this purpose, three GPR grids were made in the Trinchera area, next to the sites of the Sima del Elefante, the Galería Complex and the Gran Dolina. The analysis of both the radar wave signatures and the radar amplitude reflections, together with the existing data on the caves, allowed for the definition of the location and geometry of different karstic features, including air-filled caves, sediment-filled caves and bedrock structures. Two mechanical boreholes drilled next to the sites also added the information on the stratigraphy of the bottom part of the caves and helped with the interpretations of the GPR survey. We could distinguish between the intact geological features and the areas that were altered by the railroad construction and the later quarrying activity.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

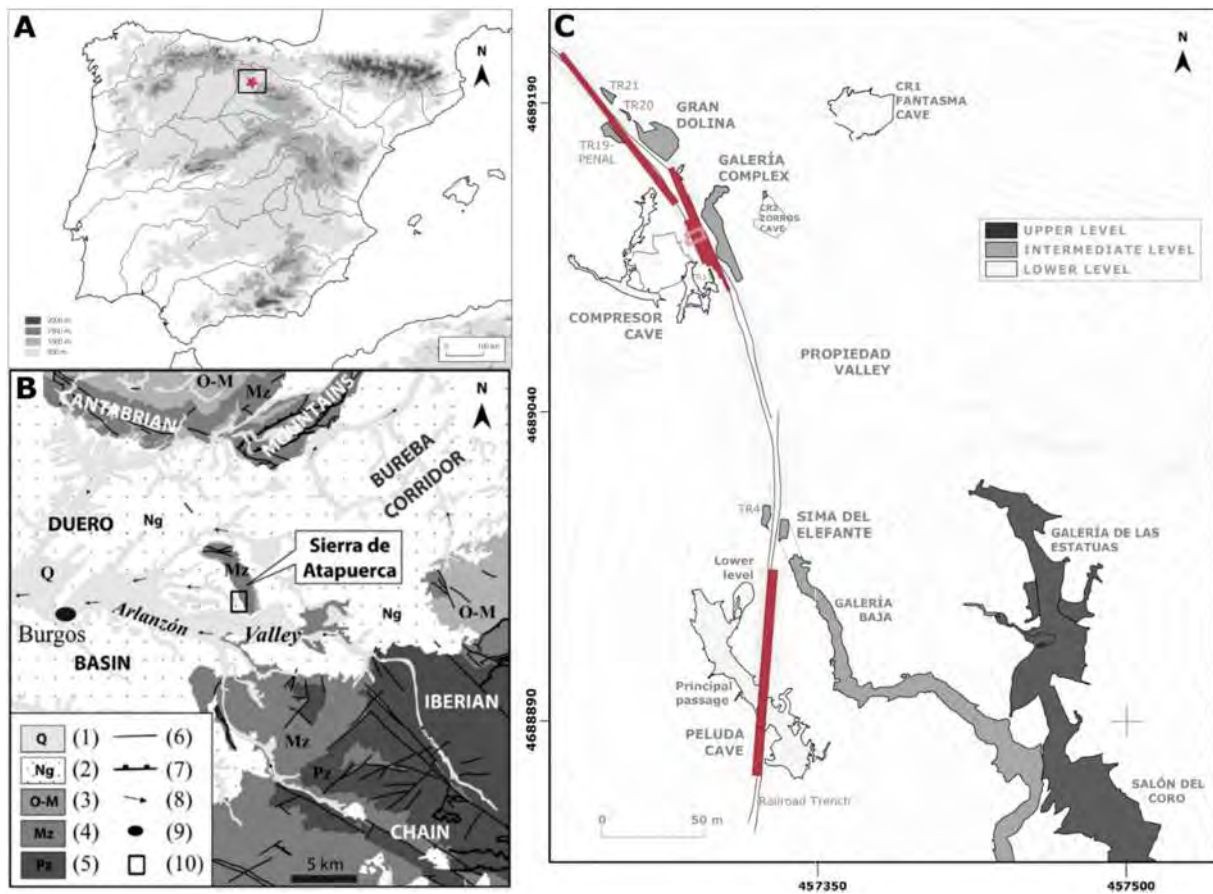
Geophysical surveys have been widely applied in the study of archaeological sites for several decades (Hesse, 2002; Gaffney, 2008; Deiana et al., 2018). They have also been widely used for karst exploration, mainly for hydrogeological purposes. In this sense, electrical resistivity tomography (ERT), microgravity, seismic and electromagnetic methods such as very low frequency (VLF) and ground-penetrating radar (GPR), have been frequently employed to detect either air-filled or water-filled caves (Chalikakis et al., 2011; Revil et al., 2012). However, identifying caves filled with sediments using these geophysical techniques has been lacking (Weinstein-Evron et al., 2003; Valois et al., 2010; Martínez-Moreno et al., 2014). This is especially true for GPR, which has traditionally been believed to be ineffective in clayey sediments as these materials have been considered to attenuate the radar waves, limiting the depth of investigation (Doolittle et al., 2007; Piscitelli et al., 2007; Schrott and Sass, 2008; Kaufmann and Deceuster, 2014).

The Sierra de Atapuerca sites (Burgos, Spain) in the Trinchera area consist of ancient caves filled with sediments that were sectioned by a 19th century railroad trench (Figs. 1 and 2A). This trench exposed numerous cave entrances and other karst features that have been investigated over many decades and have provided outstanding Early and Middle Pleistocene archaeo-palaeoanthropological remains (Bermúdez de Castro et al., 1997; Carbonell et al., 2008; Ortega et al., 2014).

Identifying the development of this karstic system is crucial for understanding the formation processes of the sites and for planning future excavation strategies. For this purpose, the sites have been the target of ERT surveys, which were combined with information from boreholes and a variety of information about the location, dimension and direction of some karstic features (Ortega et al., 2010; Bermejo et al., 2017). GPR has been recently applied in the Sierra de Atapuerca to solve some problems related to the interpretation of ERT profiles with high resistivity values (Bermejo et al., 2016) and to obtain valuable three-dimensional analyses (Bermejo et al., 2018), which provided more detailed information than the ERT method. The two methods can be integrated, but the GPR was used in this study as stand-alone method to survey unexplored areas, otherwise extremely difficult for the ERT method.

\* Corresponding author at: Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain.  
E-mail address: [l.bermejo.albarran@gmail.com](mailto:l.bermejo.albarran@gmail.com) (L. Bermejo).





**Fig. 1.** Location of the sites studied in this work. A) General location in Spain. B) Geological map of the Duero Basin area indicated in panel A. Legend: (1) Quaternary; (2) Neogene; (3) Oligocene-Lower Miocene; (4) Mesozoic; (5) Palaeozoic; (6) fault; (7) thrust; (8) drainage direction; (9) city; (10) area of study (modified from Benito-Calvo et al., 2008). C) Detail of the Sierra de Atapuerca multilevel cave system. The coloured polygons represent the GPR grids made over the caves. The red ones are made of longitudinal profiles and the rose polygon defines the grid of transversal profiles. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

In the work presented here we have studied a variety of cave features that remain covered below the railroad surface with the aim of identifying their geometry and distinguishing the areas that have been altered by the railroad and the limestone quarries. Some of these areas can be currently accessed from the surface, and have therefore been studied in detail, providing models for what can be interpreted geophysically. Here we present results from three GPR grids that were collected over the caves of Peluda-Sima del Elefante, the Galería Complex and the Gran Dolina (Fig. 1). The interpretations from these GPR surveys are then compared and complemented with stratigraphic information from two boreholes and the detailed work that has been done inside the caves that are accessible.

## 2. Background

### 2.1. Geological and geomorphological settings

The Sierra de Atapuerca is a NNW-SSE gentle mountain range, composed mainly of Upper Cretaceous carbonates (Pineda and Arce, 1997), located northwest of the Iberian Chain and connected to the northeast with the Ebro Basin through the Bureba Corridor (Fig. 1B).

The Duero Basin is surficial sediments are alluvial and lacustrine deposits of Neogene and Quaternary age (Armenteros et al., 2002) that were eroded through the Plio-Pleistocene by a drainage network including the Arlanzón River and its tributaries (the Vena and the Pico Rivers), when the basin opened to the Atlantic Ocean (Benito-Calvo and

Pérez-González, 2007). This generated a stepped sequence of fluvial terraces, traditionally labelled T1 to T14, from old to young (Benito-Calvo et al., 2008), which correspond in elevation to the different passages within the Sierra de Atapuerca Cretaceous limestones (Ortega, 2009; Ortega et al., 2013). The relatively long periods of stability of the base levels produced a multilevel cave system (Ford and Williams, 1989; Anthony, 2004), which are the focus of this work.

The Sierra de Atapuerca caves are divided in three main subhorizontal levels (upper, intermediate and lower), which show a progressive migration to the west (Fig. 1C). They are strongly controlled by the structure of the host rock (Ortega et al., 2013) and encompass a total thickness of 40–70 m. The karst is split by the Propiedad Valley in two general cave systems termed the Cueva Mayor-Cueva del Silo system, which has 4.7 km of explored passages, and other caves discovered to the north of the Trincheras area by a railroad trench (from where the name *trincheras* is derived) at the end of the 19th century (Figs. 1C and 2A). The bottom part of these discovered caves is preserved below the railroad surface and therefore available for study.

Through the 20th century the Trincheras area was also used for limestone quarrying, which widened the railroad trench at some points. These operations destroyed part of some caves, but also unveiled new void spaces such as Compressor Cave (Fig. 1C) (Ortega, 2009).

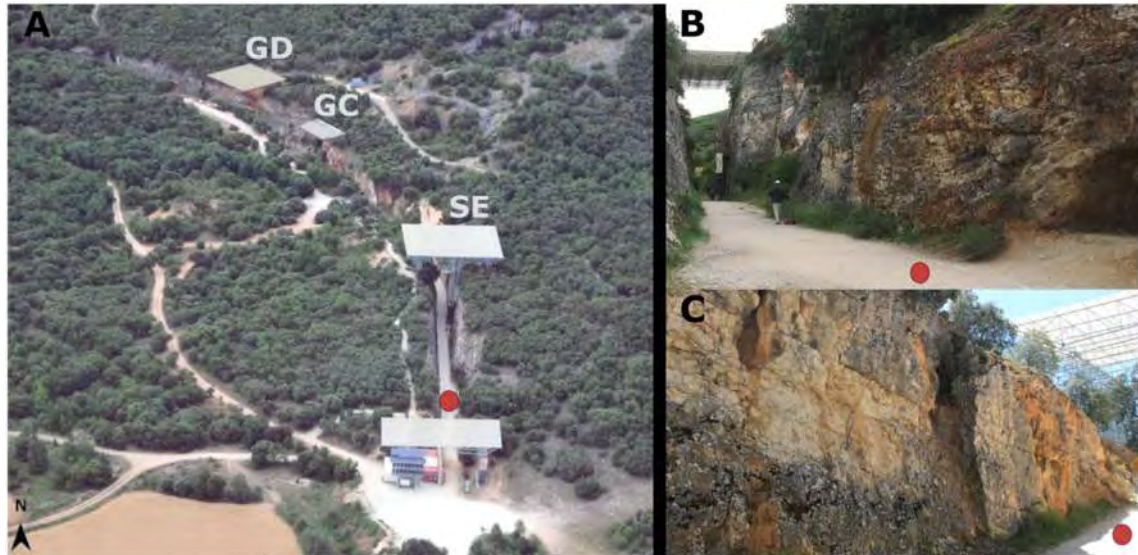
### 2.2. The sites

In this work, we studied the bottom part of the three cave sites that are currently under archaeological excavation in the Trincheras area: the

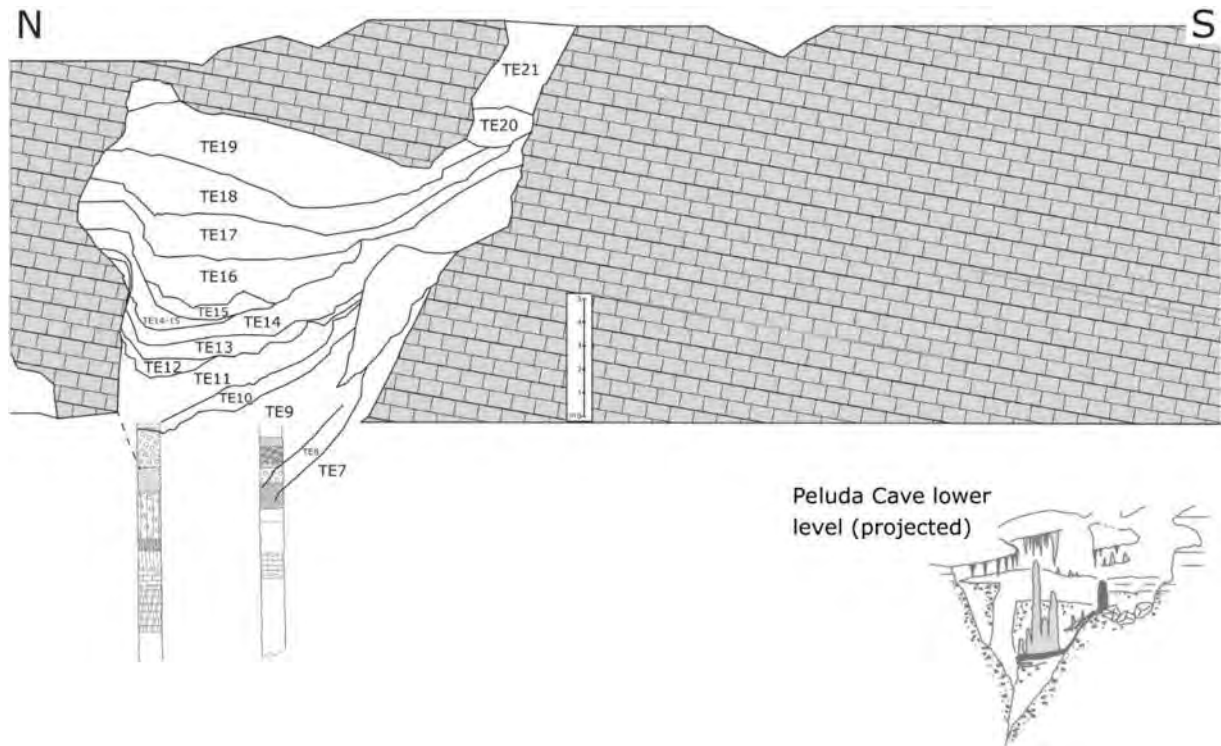
Sima del Elefante, which is the only site of the Cueva Mayor–Cueva del Silo system sectioned by the railroad trench; the Galería Complex and the Gran Dolina (Figs. 1C and 2A). All three caves, which are filled with terrigenous sediments, are part of the intermediate level of the karst system and exhibit keyhole cross sections. The shape of these conduits results from the combination of (1) the phreatic conditions produced during a period of stability (when the adjacent rivers were neither aggrading nor

degrading, and therefore the water tables were relatively stable), also expressed at the surface by the fluvial terrace T3 of the Arlazón River, and (2) the vadose entrenchments created during the subsequent base level drop that corresponds to terrace T4 (Ortega et al., 2013).

The Sima del Elefante site contains a 25 m thick cave fill divided into 16 litho-stratigraphic units (Huguet et al., 2017) (Fig. 3). These units were deposited in open cave conditions and consist of both gravity



**Fig. 2.** A) Aerial view of the railroad trench area (photo by J. Mestre-IPHES archive) with the location of the sites studied in this work: SE: Sima del Elefante; GC: Galería Complex; GD: Gran Dolina. B) GPR survey over Peluda Cave (notice the cave's actual entrance on the right). Sima del Elefante site is located at the end of the picture. C) Dipping bedrock layers visible around Peluda Cave in the walls of the railroad trench. The red dot indicates the same point in all the pictures. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)



**Fig. 3.** Schematic stratigraphical section of the Sima del Elefante Cave (modified from Huguet et al., 2017), together with the boreholes drilled in 2001, the lower unit of which is composed of rounded quartzite pebbles (Rosas et al., 2006), and its relation with the lower level of Peluda Cave (Ortega, 2009). Notice the bedding attitude of the limestone to the south, as seen in the walls of the railroad trench (see Fig. 2C). The lower boundary of the limestone corresponds to the railroad current surface.



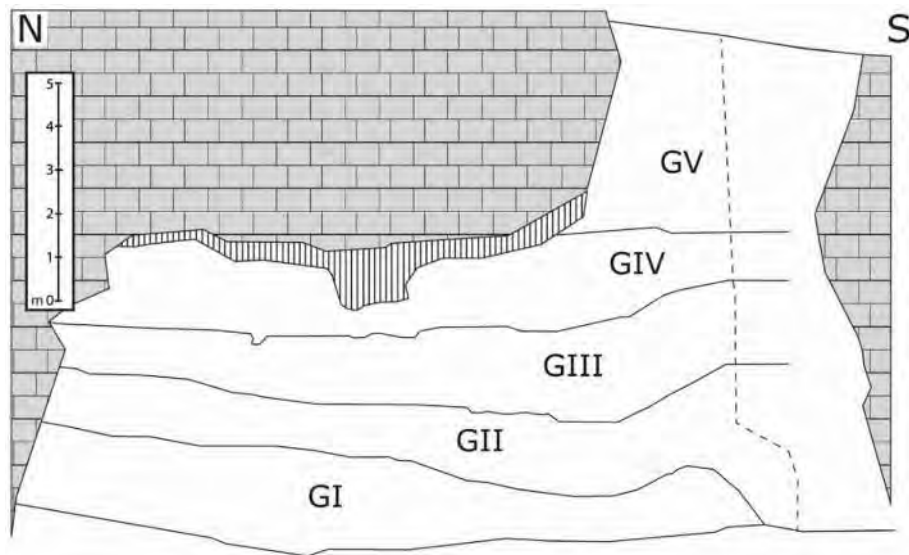


Fig. 4. Schematic stratigraphical section of the Galería Cave (modified from Ortega, 2009). The lower limit of the figure corresponds to the railroad current surface.



Fig. 5. Photographs of the eastern flank of the railroad trench: A) Galería Complex site (photo by M. A. Martín-G.E.E archive) with the identification of its principal conduits. **TZ**: Covacha de los Zarpazos; **TG**: Galería; **TN**: Northern shaft; **TC**: Central shaft; **TS**: Southern shaft. B) The railroad trench at the level of Galería Complex in 1963 (photo by J. L. Uribarri-G.E.E archive). Notice the uneven floor of the railroad trench and the artificial mound of sediments (pointed to with an arrow) located at that time in the Propiedad Valley. C) Gran Dolina site (photo by M. A. Martín-G.E.E archive). Notice the boundary between the sediments filling the cave and the limestone host rock on the right, which was sawed during the open cut quarrying.

and water flow deposits composed of gravels and laminated clays (Rosas et al., 2006; Ortega, 2009; Ortega et al., 2014). Sediments below unit TE17 are Early Pleistocene in age (Rosas et al., 2001; Parés et al., 2006), including unit TE9, which bears the oldest European hominin fossil, dated to 1.3–1.1 Ma (Carbonell et al., 2008). These units exhibit some internal disruption, most likely because of a collapse of the lower units into a lower cave level (probably Peluda Cave) (Figs. 1C and 3) (Ortega, 2009; Ortega et al., 2018). This was a product of the adjacent river system degradation where the water table and the limestone dissolution zone were lowered during the transition from the T4 to T5 fluvial river terrace (Benito-Calvo et al., 2017).

Over time, the archaeological excavations have continued several metres below the railroad surface (Huguet et al., 2017) creating an insurmountable gap for the GPR survey. Therefore, we could only collect GPR data to the south of this cave (Figs. 2B and 3) and not directly over it.

The Galería Complex corresponds to a large and elongated chamber that received different sediment inputs. These cave entrances are, from south to north, the southern and central shafts (TS and TC) together with section TR17; the northern shaft (TN), which is the main entrance to the sub-horizontal passage of Galería (TG); and Covacha de los Zarpazos (TZ) (Figs. 4, 5A and B) (Gil et al., 1987; Ortega et al., 2013). The stratigraphic sequence of TZ, TG and TN, which reaches 13 m in thickness, is formed by five lithostratigraphic units named GI to GV, from bottom to top (Fig. 4). Unit GI is an archaeologically sterile endokarstic sedimentary deposit dated to the Early Pleistocene consisting of laminated silts and limestone breccias (Pérez-González et al., 2001). Units GII, GIII and GIV are allochthonous and composed of calcareous fluvial gravels and gravity flow deposits (Pérez-González et al., 1999). Units GII and GIII date between 500 and 250 ka (Berger et al., 2008; Falguères et al., 2013; Demuro et al., 2014) and contain a rich palaeontological and archaeological Middle Pleistocene assemblage, including two fossil hominin remains (Carbonell et al., 1999; Ollé et al., 2013), while Unit GIV is sterile.

The Gran Dolina sedimentary infill is about 25 metre thick, 19 of which are found above the railroad surface and 6 below it. It is divided

into 12 lithostratigraphic units (Pérez-González et al., 2001; Campaña et al., 2016) (Figs. 5C and 6). The Early Pleistocene units (TD1 to TD7), date from about 1.2 Ma to 0.8 Ma (Moreno et al., 2015; Arnold et al., 2015; Parés et al., 2018) and are mainly composed of fluvial facies probably coeval with the deposit of the T3 and T4 fluvial terraces (Moreno et al., 2015). The Middle Pleistocene units (TD8 to TD11), date to around 0.2 Ma (Berger et al., 2008) and are dominated by gravity flow facies. The lowermost units, TD1 and TD2, are autochthonous facies deposited in close cave conditions made of clayey and sandy silts, which are archaeologically sterile. Units TD3 to TD11 are mainly allochthonous facies of mud, gravels, breccias and some layers of speleothems (Campaña et al., 2017). Units TD6 and TD10 are archaeologically exceptional. TD6 bears hominin remains of a new species, *Homo antecessor*, associated with primitive Mode 1 stone tools (Bermúdez de Castro et al., 1997). Unit TD10 contains two layers of abundant stone tools and fauna interpreted as having been part of a human base camp (TD10.1) and a kill site (TD10.2) (Ollé et al., 2013; Rodríguez-Hidalgo et al., 2017) respectively. The ensemble Gran Dolina-Penal, together with the nearby cave sections TR20 and TR21, were most likely part of a single cave (Ortega, 2009) (Fig. 1C).

The Penal section (Figs. 1C and 6) fill displays only a 7 metre-thick stratigraphic sequence of allochthonous facies that, according to its palaeontological remains, are correlative to the sediments of units TD4 to TD6 (Fernández-Jalvo, 1995). The lower part shows two small air-filled ascending chimneys that can be related to the lower cave level (Ortega et al., 2013). The ascending palaeocurrents inferred from the scallops visible in these chimneys suggest that this point constituted one of the main resurgences of the lower cave level (Eraso et al., 1998).

The formation of the lower cave level corresponds in time with the development of terrace T5 and T6 of the Arlanzón River (Ortega et al., 2013; Moreno et al., 2015). Terrace T7 is probably coeval with a small cave sublevel represented by the lower passages of the Silo, Compresor and Peluda caves (Ortega et al., 2014).

With regard to its sediments infills, the principal passage of the Peluda Cave shows clayey sediments with Early and Middle

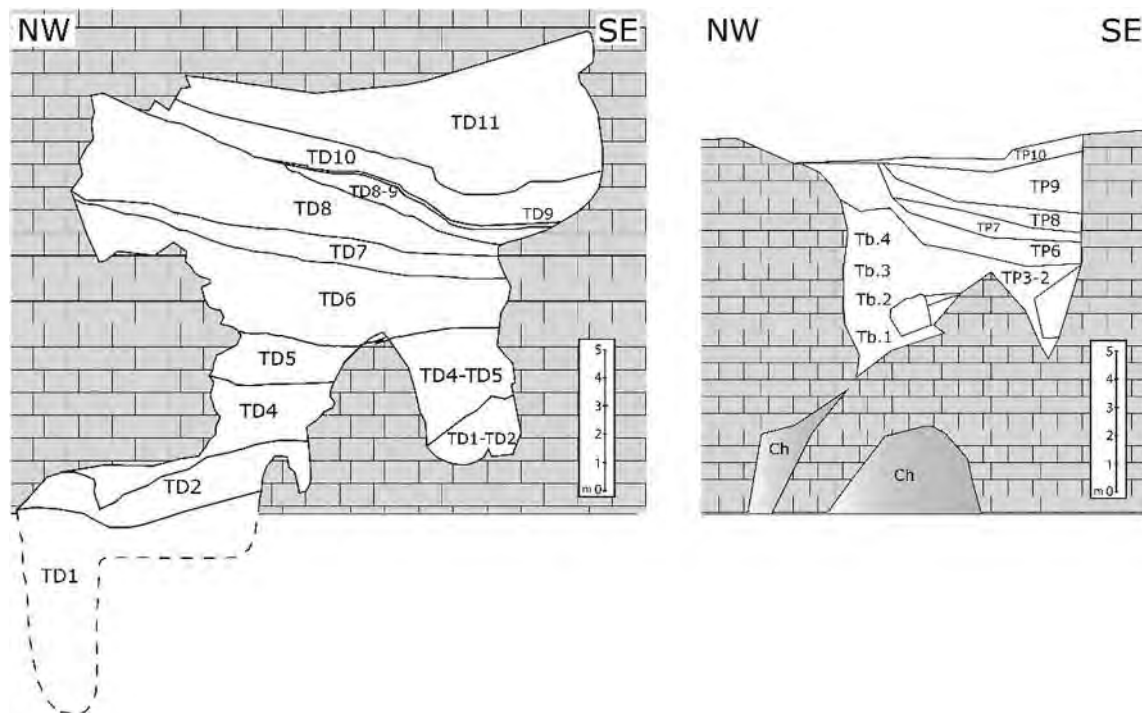


Fig. 6. Left: Schematic stratigraphical section of the Gran Dolina Cave (modified from Campaña, 2018). Right: Schematic stratigraphical section of the Penal section (modified from Fernández-Jalvo, 1995 and Ortega, 2009). Ch: air-filled ascending chimneys. The lower limit of the limestone corresponds to the railroad current surface in both images.



Pleistocene fauna and lithic remains (Ortega, 2009). The lower level of the cave contains, like the rest of the conduits of the Cueva Mayor-Cueva del Silo system, fluvial deposits that include decimetric size quartzite pebbles, sands and silts (Ortega et al., 2018) (Fig. 3). The Compresor Cave, in contrast, shows a larger void space with many chimneys (more than 10 m high). No metamorphic pebbles are found in this cave, or in the rest of the caves to the north of Trinchera (Ortega et al., 2013).

### 3. Materials and methods

#### 3.1. Data acquisition and processing

Ground-penetrating radar profiles were collected with 270 MHz antennas using a GSSI SIR-300 system. Gains were manually adjusted prior to collection. The frequencies were filtered between 100 and 500 MHz and reflections were collected within a time window of 300 nanoseconds (ns).

In this work, we present the result of three GPR grids (Fig. 1C):

1. A grid of nine profiles, 100 m long each, made above the Peluda Cave and adjacent to the Sima del Elefante Cave.
2. A grid 65 × 7 m in maximum dimension consisting of fifteen profiles near the Galería Complex and the Compresor Cave. Six additional transversal profiles up to 9 m long cross this grid.
3. A grid of seven profiles with a maximum profile length of 90 m, between the sites of Gran Dolina and Penal.

All grids were georeferenced using a centimetric GPS/GNSS LEICA GS15 (Laboratory of Digital Mapping and 3D Analysis, CENIEH) and placed into a site-wide GIS mapping system.

Reflection data were processed using the GPR Viewer software (<http://www.gpr-archaeology.com/software/>) to remove the background noise, amplify reflections with gaining and calculate the relative dielectric permittivity (RDP) that serves as a proxy measurement for radar wave velocity (Conyers, 2013). All reflection profiles were then displayed in depth as opposed to time. In this work, we present the most representative profiles of each grid, which display the principal interpretations (Figs. 7, 11, 12B and 13).

The amplitude of reflections were also processed into depth-slices using the GPR Process software (<http://www.gpr-archaeology.com/software/>) that re-samples reflection amplitudes, gridding those values and interpolating between transects. The resulting reflection amplitude values were displayed in map view using Surfer 12 software (Golden Software, Golden Colorado USA). Each depth slice covered an acquisition time window of 10 ns (TWTT), which corresponds to approximately 40 cm of depth.

Amplitude maps produced in the Surfer software were exported as images and combined with the overall site karst system plan (Figs. 8 and 10) using AutoCAD (Autodesk, Inc.).

#### 3.2. Reversed Polarity

An additional type of GPR processing used to determine void spaces was the analysis of the polarity of the radar wave reflections. This method searches for the reversed polarity (Conyers, 2012, 2013) of reflected waves that are generated when radar energy increases in velocity as it enters a void space and is then reflected back to the surface. The reflected waves generated at the cave ceiling-void space interface are different than those normally generated by bed interfaces, where velocities usually decrease as waves travel deeper in the ground. Reverse polarity waves are visible in individual wave traces as deflected in the opposite direction from the direct wave (Fig. 7).

#### 3.3. Borehole data

To complete the information on the stratigraphy of the bottom part of the caves and to confirm the GPR profiles interpretation, two mechanical boreholes 10 cm in diameter were drilled next to the sites of the Galería Complex and the Gran Dolina (Figs. 10 and 14), with total depths of 22 and 12 m, respectively. In both cases, the boreholes encountered cave sediment infills underlain by limestone. To ensure that this limestone was the floor of the cave, the drilling continued for two more metres. The boreholes' stratigraphy is displayed in Fig. 14 and discussed in Section 4.2.3 below.

### 4. Results and interpretation

There are four main features that we could identify in the GPR interpretation: air-filled caves, sediment-filled caves, bedrock layers and structures of anthropic origin. To produce images of these features GPR profile analysis was performed accompanied by amplitude mapping. Each of the cave systems will be discussed with respect to their features, and how those were analysed.

#### 4.1. Cueva Mayor-Cueva del Silo system: Peluda Cave and Sima del Elefante

##### 4.1.1. Air-filled caves

The high amplitude reflections visible around distances 23 to 44 (Figs. 7 and 8) correspond to the 2–2.4 m high void space of the Peluda Cave found under the railroad trench. The most significant reflection in the GPR profiles was produced at the cave ceiling-void interface, where there is a contrast between the limestone bedrock and the air. This ceiling-void reflection interface is confirmed by the reversed polarity of those waves (Fig. 7). There is also a high amplitude reflection produced from the floor of the cave, which displays a “velocity pull-up”, common when radar waves move in air at the speed of light within the void, and therefore the cave floor reflections are recorded in less elapsed time than surrounding bedrock layers (Conyers, 2013). For this reason, the void space appears in the GPR profile to have only a height of 1.5 m, where the actual height is 2.4 m (Figs. 7 and 9). Because of this velocity pull-up, the floors of the caves are sometimes visible as reflections that arch upward, which is the case of the one found around distances 23 to 26 (Fig. 7). On the contrary, both the reflections of the floor and the ceiling of the cave that are visible around distances 27 to 43 dip to the south. This is consistent with the observations of these features within the cave (Fig. 9).

There is an interesting area within the Peluda Cave void that has no visible radar reflections (Fig. 8). This corresponds to an area in the cave with vertical columns (Fig. 9) that do not reflect radar energy back to the surface, as the downward propagating radar waves move parallel to the columns walls and are not reflected.

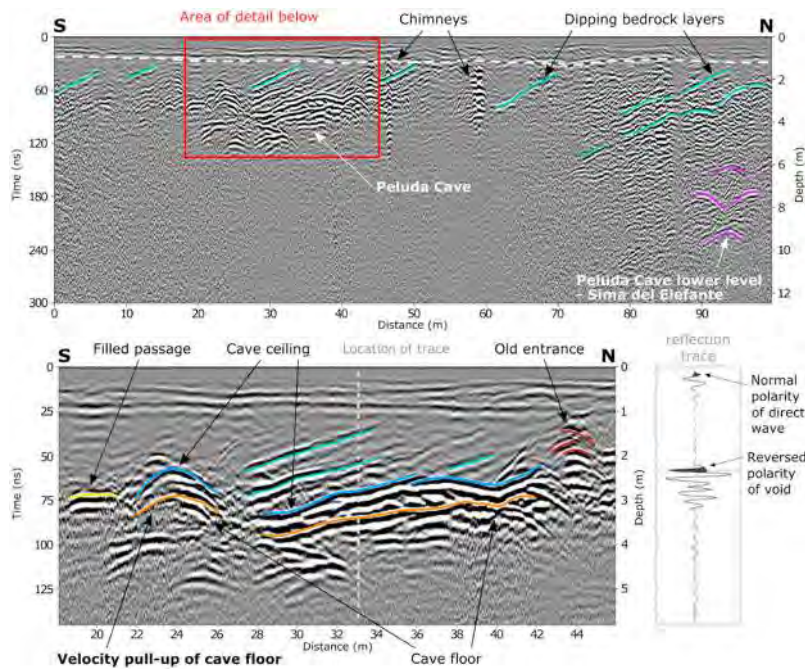
The high amplitude reflections at distances 47 and 59 (Figs. 7 and 8) probably correspond to additional void spaces such as chimneys, which are unknown at the present.

##### 4.1.2. Sediment-filled caves

A reflection between distances 18 to 20 shows a passage filled with sediments in the Peluda Cave, which displays a high amplitude ceiling reflection. However, no floor reflection (Fig. 7) is visible here, which suggests that the radar energy has been attenuated by cave fill. This sediment-filled conduit is likely an un-explored branch of the Peluda Cave (Fig. 8), whose entrance has not yet been discovered.

There are also high amplitude reflections between distances 42–45 (Figs. 7 and 8) at a depth of 1.8 m that may correspond to the entrance opened during the construction of the railroad, which was documented by the locals in the early 20th century. That entrance was a former chimney of the Peluda Cave, which was subsequently filled by the debris of the railroad trench. The radar reflections are likely generated from that fill, which is still visible in the cave (Ortega, 2009).





**Fig. 7.** Interpretation of the GPR profile 4. This profile is located in the middle of the grid collected over Peluda Cave (Figs. 1C and 8). The white dashed line marks the extent of the railroad debris fill. The cyan lines display dipping bedrock layers. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Reflections visible between distances 88 and 100, as deep as 6 m (Fig. 7), correspond to the lower level of the Peluda Cave (Fig. 8). Here, both the ceiling and the floor of the cave generated radar reflections, unlike other sediment-filled caves where no floor reflections are visible. This is probably because the conduit is filled with some type of sediment that allows the passage of radar waves more readily. One possibility is that this fill is composed of quartzite pebbles in a sandy-clay matrix (Fig. 3), a deposit that has also been found in the lower level of the Cueva Mayor-Cueva del Silo system (Ortega et al., 2013). These types of sediments have been noted elsewhere to be an excellent medium for radar wave penetration with little energy attenuation (Conyers, 2013).

**4.1.3. Bedrock layers**

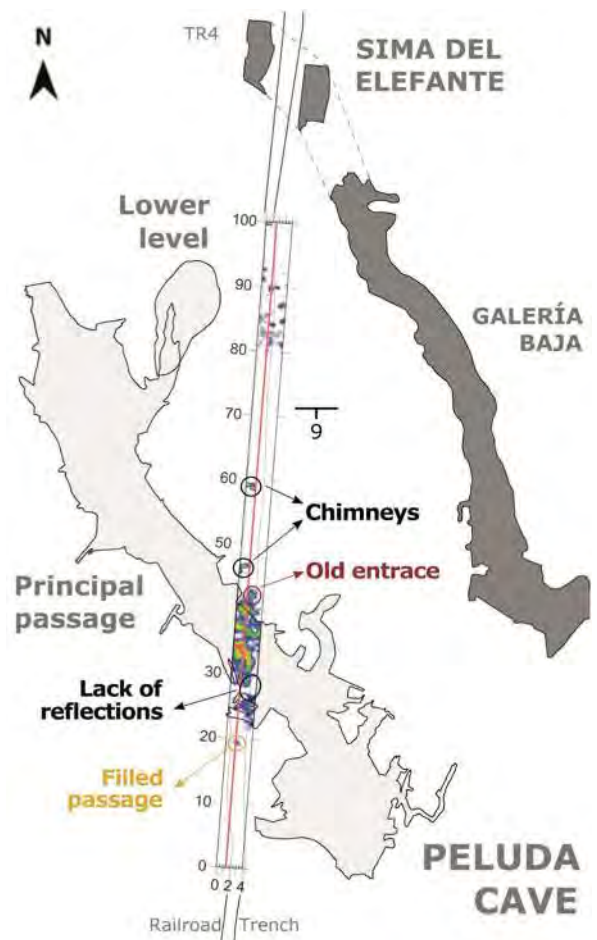
The dipping reflections that are visible in all GPR profiles (Fig. 7) were generated at the bed contacts in the limestone host rock. They all exhibit an apparent dip of 9° to the south, which is consistent with the bedding visible in the walls of the railroad trench (Fig. 2C). The fact that the caves preferentially developed along bedding planes is visible in the GPR profiles, where they show the same dip than the ceiling of the cave (Fig. 7), as well as within the Peluda Cave (Fig. 9).

**4.1.4. Anthropic structures**

The horizontal reflections visible in the top metre of all GPR profiles correspond to the anthropic fill produced during the railroad construction in the trench (Fig. 7). These layers were excavated at the Sima del Elefante (Fig. 3) showing about 1 m of debris fill, which included the wooden sleepers of the tracks and the stone ballast of the railroad. Identifying this railroad debris is important because its undisturbed presence indicates that there has not been any post railroad activity in the area.

**4.2. Northern caves of Trincheras: Galería Complex and Gran Dolina**

The main characteristic of the sediments that fill the caves located to the north of Trincheras is that they do not generate radar reflections. However, the location of these no reflections areas is indicative of cave sediments infills.



**Fig. 8.** Slice map (2.60–3 m deep) of the GPR grid made over Peluda Cave and its interpretation. The red line indicates the location of the GPR profile 4, shown in Fig. 7.



Fig. 9. View of Peluda Cave (photo by M. A. Martín-G.E.E archive). Notice the columns as well as the bedding of the host rock, visible on the ceiling.

#### 4.2.1. Galería Complex

**4.2.1.1. Sediment-filled caves.** At the Galería Complex, the area of no-reflection visible in the first 20 m of the amplitude map corresponds to the cave sediments of the southern (TS) and the central (TC) karst shafts (Figs. 5A and 10). As there is no record of the southern wall of TS in the GPR profiles (Fig. 11), this sediment-filled conduit must continue to the south.

A wall of bedrock separates this infill area from the one of the northern shaft (TN), Galería (TG) and Zarpazos (TZ) (Figs. 5A, B, 10 and 11). To determine the depth of the cave floor, a borehole was drilled in this area (Fig. 10), which revealed 17 m of cave fill sediments overlying the bedrock. These sediments are composed of fine-grained sands and clays (see a more detailed description in Section 4.2.3), which is consistent with unit GI.

The gap where there are no high amplitude reflections around metre 60 in the amplitude map is related to an air-filled vertical chimney exposed on the eastern side of the trench (CE) (Fig. 10). According to the direction of the walls of both the chimney and the northern gallery of Compressor Cave, this infill area could be a sediment-filled passage of the same cavity (Figs. 10 and 11).

**4.2.1.2. Bedrock layers.** Two different groups of reflections generated by the narrow conduits developed along bedding planes of the limestone can be distinguished in the GPR profiles of the Galería Complex (Figs. 10 and 11). The reflections from the bedding planes of group A appear to be almost flat (Figs. 11 and 12B). In contrast, the bedding planes of group B (Fig. 11) show an apparent dip of 6° to the SSE, while considering all the GPR profiles the true dip is of 19° to the southwest. Therefore, these reflection profiles cross at least two different bedding attitudes of the limestone host rock, which are not visible in the walls of the trench at simple sight.

There are distinct discontinuities between the highly reflective limestone bedding planes and the cave fill sediments. Those boundaries (marked by a red line in Fig. 11) are the shape of the cave walls prior to sediment filling and mimic the typical sinuous outlines of the cave walls known in this area.

**4.2.1.3. Anthropogenic structures.** The historical quarrying activity was especially intense on the west flank of the trench, towards the Compressor Cave, where there was an underground mine (Fig. 10). The ramp used to extract the blocks from this mine is visible in some of the transversal GPR profiles (Fig. 12B). Therefore, we assume that everything on top of

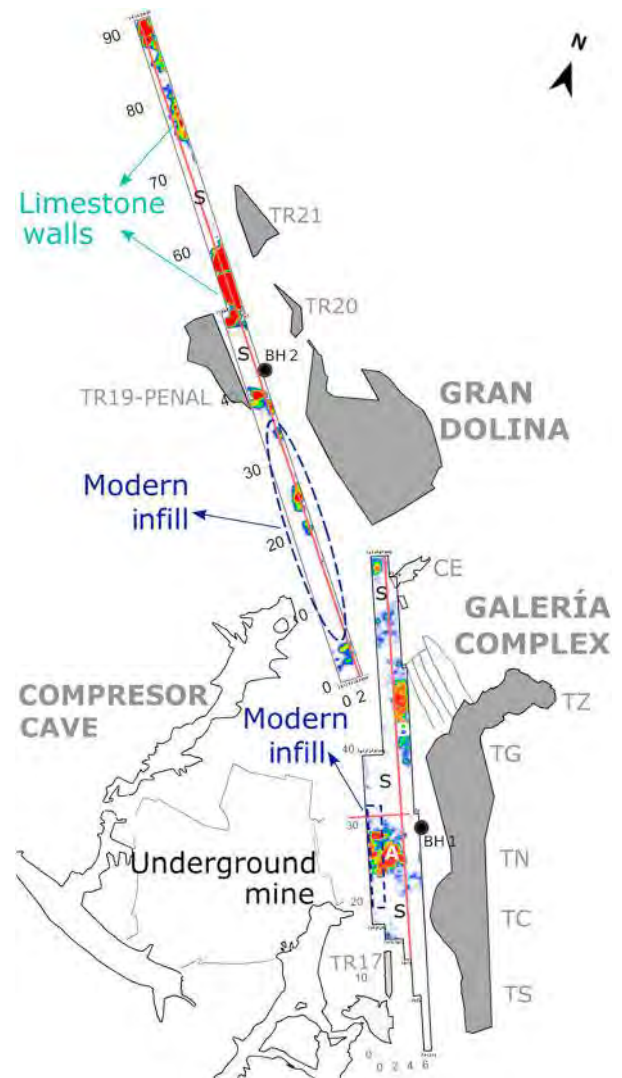
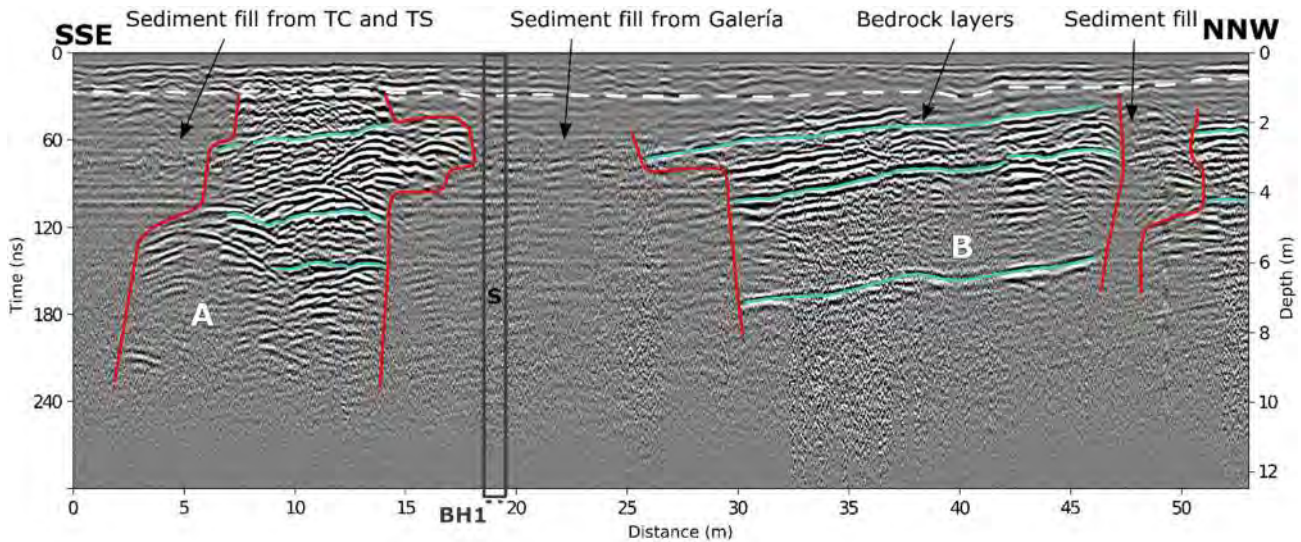
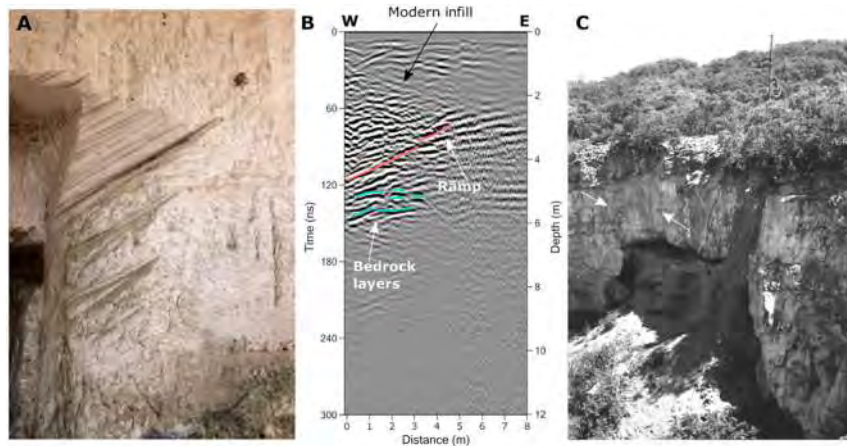


Fig. 10. Slice maps of the GPR grids made over Galería Complex and Gran Dolina corresponding to a depth of 3.20–3.60 m. The letter S indicates the areas interpreted as karstic sediment fills. The red lines indicate the location of the GPR profiles shown in Figs. 11, 12B and 13. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)





**Fig. 11.** Interpretation of the GPR profile 19. This profile is located in the middle of the grid made in Galería Complex (Figs. 1C and 10). The white dashed line marks the extent of the railroad debris fill. Notice that the metre 0 of this profile is not at the same point than the one of Fig. 10. The letter S indicates cave fill sediments in the borehole BH1, as shown in Fig. 14.



**Fig. 12.** A) Grooves left by the pulling wire in the wall of the Compressor Cave mine (photo by L. Bermejo). B) Interpretations of the GPR profile 27. This profile is located in the middle of the transversal smaller grid made in Galería Complex (Figs. 1C and 10). C) Galería Complex site in 1964 (photo from the F. Jordá archive). Notice the pulley on top of the trench and the wires (pointed to with arrows) used to pull the blocks from the underground mine up to the railroad trench floor.

it (up to 4 m) corresponds to a recent debris fill and the reflections east and under the ramp, to original geological features. Examining both the longitudinal and transversal profiles, we have estimated the extent of this altered area, which is shown in Fig. 10.

#### 4.2.2. Gran Dolina

**4.2.2.1. Sediment-filled caves.** In the profiles collected at the Gran Dolina, an area of no radar wave reflection about distance 45 corresponds to the sediment fill of this cave (Figs. 5C, 6, 10 and 13). The borehole drilled in this area (Fig. 10) revealed that this sediment fill is composed of 10 m of silts and clays (see a more detailed description in Section 4.2.3), as seen in unit TD1 (Campaña, 2018; Parés et al., 2018). This stratigraphy confirms what can be seen in all GPR profiles where cave infill produces no reflections and radar energy is attenuated. In these areas the cave floor is invisible as all radar waves were attenuated before reaching that depth (Fig. 13).

In contrast, the cave floor of TR21 is visible in the GPR reflection profiles at a depth of 6 m, indicating that the sediment fill of this cave is sedimentologically different from that in Gran Dolina. While no sediment analysis was done, it is possible that these sediments contain less

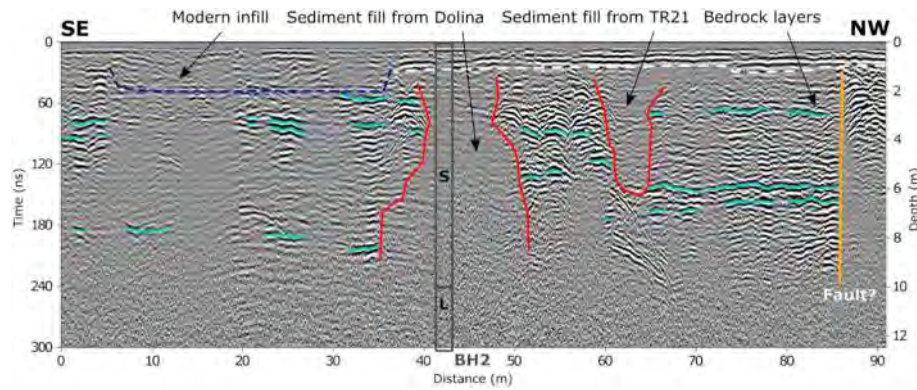
attenuating clay than other cave fills. Therefore, these sediments could be similar to the cemented sands found at the railroad surface level in the cavity TR21 (Ortega, 2009).

**4.2.2.2. Bedrock layers.** The high amplitude reflections of these profiles correspond to the limestone bedding planes, the edges of which show sinuous outlines consistent with cave walls (Fig. 13).

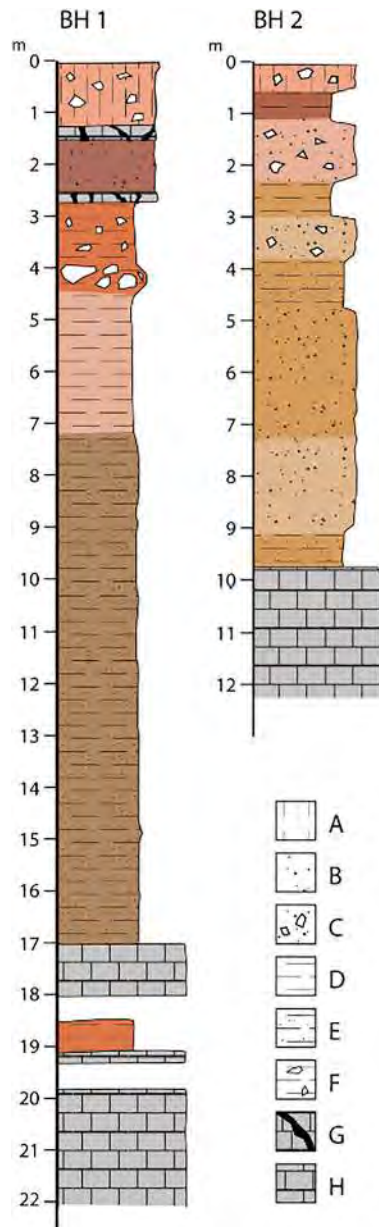
**4.2.2.3. Anthropic structures.** From distances 6 to 35 there is a 2 m deep no-reflection area (Figs. 10 and 13) that corresponds to the irregular terrain left by the extensive limestone open cut quarry (Fig. 5C). This area was filled with the sediments from an artificial mound located until the 1990s in the Propiedad Valley (Fig. 5B), which could explain the lack of reflections. This altered area is defined by the lack of railroad debris fillings, which are distinguishable again at about distance 37 (Fig. 13), indicating the extent of post railroad activity.

#### 4.2.3. Boreholes description

Both boreholes 1 (BH1) and 2 (BH2) encountered about 1 m of recently deposited sediments at the top, associated mainly with the railroad debris fill (Fig. 14). Below that layer, in the Galería Complex borehole



**Fig. 13.** Interpretations of the GPR profile 35. This profile is located in the middle of the grid made in Gran Dolina (Figs. 1C and 10). The white dashed line marks the extent of the railroad debris fill. The letter S indicates cave fill sediments in the borehole BH2 and the letter L the limestone floor of the Gran Dolina cave, as shown in Fig. 14.



**Fig. 14.** Lithological description of borehole BH1 (Galería Complex) and borehole BH2 (Gran Dolina). Legend: A: railroad debris fill; B: fine sands; C: fine sands with limestone clast fragments; D: fine clays; E: clayed sands; F: fine clays with limestone clast fragments; G: limestone fragments; H: limestone host rock.

(BH1) there is a layer of fine sands, which is found between two fragments of limestone, followed by more than 1 m of fine clays with centimetric limestone clast fragments, more than 2 m of fine clays, and 10 m of clayed sands. At the bottom of this borehole there are 2 m of limestone (possibly a block), underlain by a 30 centimetre-deep void space, a 50 centimetre-thick layer of fine clays, another limestone block 20 centimetre-thick, and another 50 centimetre-deep void, before reaching the limestone host rock (Fig. 14). These sediments are similar to the autochthonous facies visible in unit G1, described as a succession of laminated and massive sand and clay layers (Pérez-González et al., 2001).

The Gran Dolina borehole (BH2) shows an alternation of 4 layers of fine clays and fine sands with centimetric limestone clast fragments, thinner than 1 m each. Then, there is a layer of about 1 m of clayed sands, 4 m of fine sands, and a 80 centimetre-thick layer of clayed sands (Fig. 14). This matches the 6.5 m deep stratigraphy of the sediments of unit TD1 found under the railroad surface, which are described by Campaña (2018) as a succession of millimetric layered sandy silt and clay facies with a thickness that ranges between 1.5 m and 20 cm.

Even though the limitations of the mechanical drilling, the available information on the sediment types and depths corresponds well with our GPR reflection profiles and geomorphological interpretations.

## 5. Discussion

### 5.1. Karstic features

The GPR surveys conducted at the Trinchera caves allowed us to identify a variety of karst features, such as air-filled caves, sediment-filled caves and bedrock layers, depending on the characteristics, orientation and reflectivity of the recorded radar reflections. The depth-slices (Figs. 8 and 10) show that the boundaries between all these features are well defined by GPR, as the amplitude reflections match accurately the cave maps.

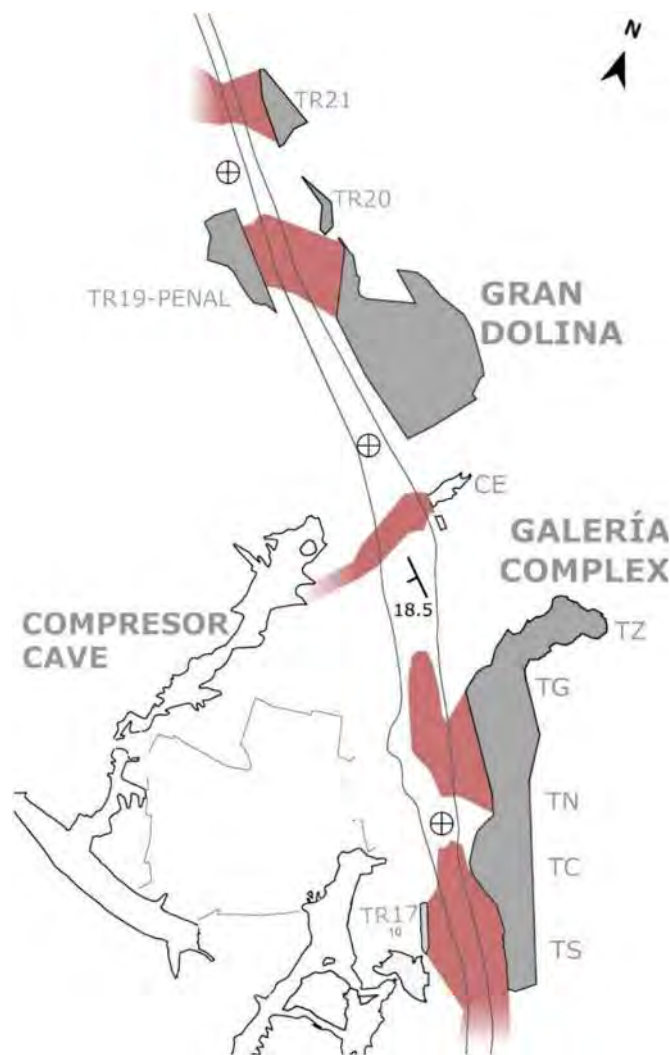
However, not all these features visible in GPR profiles are located at accurate depths. One example is the case of the Peluda Cave, where the change in radar wave velocity when entering the void space created a velocity “pull up” (Fig. 7) of the cave floor. As shown by Bermejo et al. (2018), the difference between the real depth of the floor and its location on the GPR profile is greater in the tallest part of the cave. In those areas radar waves travelled a greater distance in air at the speed of light, creating a larger velocity pull-up.

Another example are the sediments that fill the caves, which in most cases are composed of electrically conductive clays (as shown by ERT) (Bermejo et al., 2017) and have attenuated the radar waves so that the cave floors below these sediment infills are invisible with GPR, usually below about 5–6 m depth. This is particularly the case in the Gran Dolina, where the radar wave did not reach the floor of the cave (Fig. 13), which is found within the survey time-window according to the borehole made in this area (Fig. 14). It could be argued that the



invisibility of these cave-fill sediments may also be a product of the thin layers described in Campaña (2018), as 270 MHz antennas cannot resolve bedding thinner than about 30 cm (Conyers, 2013). However, the sediments recovered from the borehole BH2 (Fig. 14) showed that there are major sedimentary changes that could have generated reflections if the radar wave had not been attenuated.

The sediment fill of TR21 is the only cave to the north of the Trincheras that recorded a reflection from the floor of the cave. This suggests that these sediments contain less clay and are therefore less electrically conductive than the rest of the cave fills, indicating that they could be more like the cemented sands visible at the railroad surface level in TR21 (Ortega, 2009). In addition to the identification of different sediment types, the fact that both caves have the same orientation (Fig. 15) indicates that the Gran Dolina Cave and the TR21 cavity are not connected under the railroad surface, even though their exposed morphologies suggest that they correspond to different sections of the same cavity (Ortega, 2009). Perhaps they were connected only during their phreatic formation, before changing into vadose conditions.



**Fig. 15.** Map of the underground unaltered karstic features interpreted in this study according to the GPR profiles and slice maps. The different karstic infills are represented in red (gradients mean an unknown limit) and the limestone host rock bedding planes are indicated for each area. The previously known cave fillings are represented in grey. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Another type of radar reflections recorded from cave sediments without such an attenuation is found at the Peluda Cave (Fig. 7). Here there was good radar energy penetration, with reflections produced at depths between 6 and 10 m. These reflections may correspond to the ceiling and the floor of the lower passage of the Peluda Cave, which shows fluvial deposits composed of quartzite pebbles in a sandy matrix at this depth (Ortega, 2009) (Fig. 3). The same deposits were found 6 m below the railroad surface in the boreholes made in 2001 in the Sima del Elefante (Rosas et al., 2006) (Fig. 3). This supports the hypothesis that the Peluda Cave and the Sima del Elefante Cave are connected at this depth (Rosas et al., 2001 and 2006; Ortega, 2009; Huguet et al., 2017; Ortega et al., 2018), as the passage identified in the GPR profiles is found halfway between both caves. According to this data, the caves could be linked by a 4 m tall passage, probably filled by this quartzite pebble fluvial terrace, which would also not have attenuated the radar waves as much as other cave sediment infills. Future GPR surveys might be able to identify in detail such a connection, which has not yet been discovered by cave explorers.

The GPR survey has also provided significant information on the three-dimensional structure of the bedrock layers. We have identified 4 dissimilar bedrock areas according to bedding attitude: the area of Peluda, whose horizons dip 9° to the south (Figs. 2C and 7) and which is the only one visible at simple sight in the walls of the trench; the area related to the wall that separates TC and TN, which shows subhorizontal bedding (Figs. 11 and 15); the one of Galería, where beds dip 19° to the southwest according to our calculations (see Section 4.2.1) (Figs. 11 and 15); and the one in Gran Dolina and TR21, which shows also subhorizontal bedding (Figs. 13 and 15). At a large scale, however, we could consider that there are actually two areas, as far as bedding attitude, south and north of the Propiedad Valley. Bedding to the southwest in Galería could be related to an E-W fracture, which is a common fault direction in the Sierra de Atapuerca and has determined to large extent the course of the Propiedad and Arlanzón Valleys (Benito-Calvo and Pérez-González, 2015).

Finally, there is important geomorphological information concerning the caves' formation processes that can be determined from our results. GPR profiles show that there is a deep incision at the bottom of all the caves of the Trincheras area, as deep as 17 m in some cases (Fig. 14). Moreover, all visible cave infills found along the railroad trench extent well below the railroad surface (Fig. 15), even though sections of the western flank do not suggest this (Fig. 6). Recent excavations of the Sima del Elefante Cave have already shown this to be the case for this site (Huguet et al., 2017).

Our observations highlight the intense vadose entrenchment incision at the Trincheras area, which is possibly related to time interval between fluvial terraces T3-T4 (Ortega et al., 2013; Benito-Calvo et al., 2017), and suggest that this area continued to be active during the formation of the lower level of the karst. In some cases, like in Galería Complex, the GPR survey has identified the lateral limits of the caves, but their continuation to the west of the trench is unknown for others (Fig. 15).

## 5.2. Anthropogenic structures

Three main anthropic activities have left their imprint in the Trincheras area: the construction of the railroad trench, the limestone quarries and recent infills.

Different archaeological works have recovered remains of the railroad ballast, sleepers and nails (notably during the expansion of the excavation of the Sima del Elefante) under the railroad current surface, which correspond to the horizontal reflections visible from the surface to 1–1.5 m deep in the GPR profiles (Figs. 7, 11 and 13). The preservation of this debris fill is a good indicator that there was no further anthropic activity in these areas and that the stratigraphy recorded below the trace of the railroad has not been altered.

Among the quarry activities that took place in the Trincheras area from the 1950s to the 1970s, the underground mine developed in the



Compresor Cave was the most intense exploitation. The blocks of this mine were pulled, through a ramp, to the trench floor by a pair of wires (Fig. 12C). These have left grooves at an angle of 30° on the walls of the mine (Fig. 12A), which suggests that the reflections with a similar inclination found in some of the transversal profiles (Figs. 1C, 10 and 12B) correspond to the ramp used for extracting the blocks. This altered area is limited to the western flank of the trench and to a section that matches the walls of the mine (Fig. 10), meaning that the rest of the karstic features should be preserved unaltered under the railroad debris fill, which can be identified in the rest of the profiles (e.g. Fig. 11). As for the open-air quarries, the extractions mostly took place over the walls of the trench, principally in the area between the Galería and the Gran Dolina, where a sawed wall is still visible today (Fig. 5C). In the GPR profiles the trace of this activity is recorded to the south of the Gran Dolina, according to the 2 m no-reflection area where the railroad debris fill is missing (Fig. 13). The cave infills of the Gran Dolina and TR21 should be found undisturbed under the railroad fillings, as these are visible again on top of these caves.

The recent anthropic fillings are related to the artificial mound of sediments that existed in the railroad trench at the level of the Propiedad Valley, which facilitated the passage across the railroad and also marked the limit of two different villages (Ibeas de Juarros and Atapuerca) (Fig. 5B). This mound was dismantled in 1998 and the debris used to create a homogeneous flat surface all along the trench, which according to the GPR profiles and to historic photographs, raised the level of the surface up to 4 m in some areas (Figs. 5B and 12B).

### 5.3. Final remarks

A complete and thorough interpretation of the karstic and anthropic structures of the Trinchera area has only been possible because we considered the information of both the GPR profiles and the amplitude maps in horizontal grids. In this sense, we could not have obtained information about the host rock layers if we had not analysed the changes visible in the reflection profiles, and it would also have been difficult to define the distribution of the different cave and anthropic features without projecting the amplitude reflection slice maps over the karstic features map. Such comparison, although always necessary when interpreting the results of a GPR survey, has proven to be crucial in an environment such as a karstic system, where the geometry of dissolution features and their infilling units change dramatically in short distances. Moreover, this work provides a new approach for interpreting other karstic features located outside the railroad trench, in the unexplored areas of the Sierra de Atapuerca where there is no evidence for the underlying structure.

## 6. Conclusion

GPR surveys at the Trinchera caves in Atapuerca have helped identifying a variety of karst features of archaeological and geological interest. We were able to distinguish between these features depending on their origin as well as to determine the extent of the areas altered by recent anthropic activity.

With regard to the karstic features, we have identified: a) the air-filled passage of the Peluda Cave, based on the radar wave polarity changes, and two unknown void chimneys; b) the distribution and bedding attitude of the limestone host rock, including true dip; c) sediment-filled caves, including known and unknown conduits, most of which are filled by clay sediments that attenuated the radar waves. Caves that do not show such attenuation are interpreted as containing other types of sediments, like sands or fluvial gravels.

Identifying different types of cave-fill sediments with GPR furnishes invaluable information for the study of the Sierra de Atapuerca karstic system. In combination with the data provided by other methods, it

could help determine the chronology of a cave infill by the type of sediments. It also constitutes practical information for excavation strategies, as it facilitates locating the more susceptible sites of containing archaeological remains for future studies. In this sense, further GPR surveys with different frequency antennas could gain more information on the stratigraphy.

Additionally, the study of the cave infills has exposed an intense vadose entrenchment incision for all the caves of the intermediate level of the Trinchera area and a strong relationship with the lower level of the karst, as all the caves studied in this work extend towards the west under the railroad surface (Fig. 15).

This work has shown that GPR analysis should be conducted even in areas that contain electrically conductive materials, which could attenuate radar waves. Here we found that the radar wave attenuating cave fill sediments could be easily identified, especially when bounded by the highly reflective limestone bedrock. In the Trinchera area this has been especially useful for “filling in the gaps” of the extant cave maps, as most of the unexplored and/or unknown parts of the caves remain invisible as they are filled with sediments. In this sense, GPR is an effective tool for obtaining rapid three-dimensional information on complex structures of this sort.

As for the recent anthropic alterations, we have distinguished between: a) the debris fills produced during the construction of the railroad trench, which can be seen in the first metre of all profiles except in further altered areas; b) the traces of two limestone quarries: one open-air cut and one underground mine, which extraction process was documented thanks to historic photographs and to the recognition, in the GPR profiles, of the ramp used to extract the blocks; c) recent infills, mostly visible in the areas where the quarries left irregular surfaces.

Given the significance of the remains found in the sites of Trinchera, it is important that the original cave infillings, where the geological and archaeological context remains intact, were distinguished from modern fillings of anthropic origin. Defining the limits of these anthropic structures constitutes another tool for planning future excavations in the area.

Finally, we hope that this thorough analysis of GPR data could be of use not only for the Sierra de Atapuerca sites, but also for encouraging other researchers to use this method in karst areas. Although interpreting GPR data can sometimes be complicated, previous information on the site can be enough for interpreting small scale details that may not be appreciated using other geophysical methods, as shown in this work. An iterative interpretation using both standard types of cave mapping and GPR can produce very accurate three-dimensional analysis not possible in any other way.

### Data availability

Datasets related to this article can be found at: <https://mega.nz/#F!8A4yhYBb!ihOiSk8aNTqz8y16yy9nqA>

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### Acknowledgements

The corresponding author is beneficiary of a predoctoral grant of the Junta de Castilla y León (EDU/310/2015) financed with European funds. The authors wish to thank the multidisciplinary Research Team of the Sierra de Atapuerca (EIA) for its constant scientific and logistic support. Research at the Sierra de Atapuerca sites is supported by the Spanish ministry of Science and Innovation, Spain (MICINN) grants PGC2018-093925-B-C31 (to JMBDC) and CGL2017-89603-R (to JMP) and

archaeological fieldwork is maintained by the Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León. The stay of AIO in DU was financed by a Visiting Fulbright Scholar grant. We thank the Edelweiss Speleological Group for letting use the cartographic base of the Sierra de Atapuerca karst. We also want to thank Isabel Hernando for her description of the boreholes stratigraphy and Roger Guérin, Salvatore Piro, Miguel Ángel Martín, Julius James Ogutu and Adrián Martínez for their help in the fieldwork.

## References

- Anthony, D.M., 2004. Multilevel caves and landscape evolution. In: Culver, D., White, W. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*. Academia Press, pp. 397–400.
- Armenteros, I., Corrochano, A., Alonso-Gavilán, G., Carballeira, J., Rodríguez, J.M., 2002. Duero Basin (northern Spain). In: Gibbons, W., Moreno, T. (Eds.), *Geology of Spain*. Geol. Soc., London, pp. 309–315.
- Arnold, L.J., Demuro, M., Parés, J.M., Pérez-González, A., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2015. Evaluating the suitability of extended-range luminescence dating techniques over early and Middle Pleistocene timescales: published datasets and case studies from Atapuerca. *Spain. Quat. Int.* 389, 167–190. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.010>.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., 2007. Erosion surfaces and Neogene landscape evolution in the NE Duero Basin (north-central Spain). *Geomorphology* 88 (3–4), 226–241. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.11.005>.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., 2015. Geomorphology of the Sierra de Atapuerca and the Middle Arlanzón Valley (Burgos, Spain). *Journal of Maps* 11 (4), 535–544. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.909339>.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Parés, J.M., 2008. Quantitative reconstruction of Late Cenozoic landscapes: a case study in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Earth Surf. Process. Landforms* 33, 196–208. <https://doi.org/10.1002/esp.1534>.
- Benito-Calvo, A., Ortega, A.I., Pérez-González, A., Campaña, I., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2017. Palaeogeographical reconstruction of the Sierra de Atapuerca Pleistocene sites (Burgos, Spain). *Quat. Int.* 433 (PA), 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.034>.
- Berger, G.W., Pérez-González, A., Carbonell, E., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Ku, T.-L., 2008. Luminescence chronology of cave sediments at the Atapuerca paleoanthropological site, Spain. *J. Hum. Evol.* 55 (2), 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.02.012>.
- Bermejo, L., Ortega, A.I., Piro, S., Guérin, R., Conyers, L.B., Parés, J.M., Benito-Calvo, A., Campaña, I., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2016. GPR data to constrain ERT interpretations in the archaeological karstic test site of Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). 6th Annual Meeting of the European Society for the study of Human Evolution (ESHE). *Book of Abstracts*, p. 50.
- Bermejo, L., Ortega, A.I., Guérin, R., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Parés, J.M., Aracil, E., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2017. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *Quat. Int.* 433 (PA), 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.031>.
- Bermejo, L., Ortega, A.I., Conyers, L.B., Benito-Calvo, A., Parés, J.M., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2018. Assessing the accuracy of 3D GPR results by comparing them to 3D laser scanner models: the case study of the archaeological site of Peluda Cave (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). EGU General Assembly Conference Abstracts 20, p. 1293. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..20.1293B>.
- Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., Carbonell, E., Rosas, A., Martínez, I., Mosquera, M., 1997. A hominid from the Lower Pleistocene of Atapuerca, Spain: possible ancestor to Neandertals and modern human. *Science* 276 (5317), 1392–1395. <https://doi.org/10.1126/science.276.5317.1392>.
- Campaña, I., 2018. *Estratigrafía y sedimentología del yacimiento de Gran Dolina (Sierra de Atapuerca, Burgos)*. (Ph.D. Dissertation). Universidad de Burgos. CENIEH.
- Campaña, I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2016. Assessing automated image analysis of sand grain shape to identify sedimentary facies, Gran Dolina archaeological site (Burgos, Spain). *Sedimentary Geology* 346, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.09.010>.
- Campaña, I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Ortega, A.I., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2017. Pleistocene sedimentary facies of the Gran Dolina archaeological site (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *Quat. Int.* 433 (PA), 68–84. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.04.023>.
- Carbonell, E., Rosas, A., Díez, J.C. (Eds.), 1999. *Atapuerca: Ocupaciones Humanas y Paleoeología del Yacimiento de Galería*. Arqueología en Castilla y León, Memorias 7. Junta de Castilla y León, Valladolid.
- Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Parés, J.M., Pérez-González, A., Cuenca-Bescós, G., Ollé, A., Mosquera, M., Huguet, R., van der Made, J., Rosas, A., Sala, R., Vallverdú, J., García, N., Granger, D.E., Martínón-Torres, M., Rodríguez, X.P., Stock, G.M., Vergés, J.M., Allué, E., Burjachs, F., Cáceres, I., Canals, A., Benito-Calvo, A., Díez, C., Lozano, M., Mateos, A., Navazo, M., Rodríguez, J., Rosell, J., Arsuaga, J.L., 2008. The first hominin of Europe. *Nature* 425, 465–470. <https://doi.org/10.1038/nature06815>.
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guérin, R., Valois, R., Bosch, F.P., 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeol. J.* 19, 1169–1180. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>.
- Conyers, L.B., 2012. *Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology*. Routledge, Taylor and Francis Group, New York.
- Conyers, L.B., 2013. *Ground-penetrating Radar for Archaeology*. 3rd edn. Rowman and Littlefield, Lanham, MD, USA.
- Deiana, R., Leucci, G., Martorana, R., 2018. New perspectives on geophysics for archaeology: a special issue. *Surv. Geophys.* 39, 1035–1038. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9500-4>.
- Demuro, M., Arnold, L.J., Parés, J.M., Pérez-González, A., Ortega, A.I., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2014. New luminescence ages for the Galería Complex archaeological site: resolving chronological uncertainties on the acheulean record of the Sierra de Atapuerca, northern Spain. *Plos One* 9 (10), e110169. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110169>.
- Doolittle, J.A., Minzenmayer, F.E., Waltman, S.W., Benham, E.C., Tuttle, J.W., Peaslee, S.D., 2007. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. *Geoderma* 141 (3–4), 416–421. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.015>.
- Eraso, A., Domínguez, M.C., Pérez-González, A., Martín, M.A., Ortega, A.I., 1998. Estimación de las paleovehicularidades y sentidos de circulación del agua en el karst donde se emplaza el yacimiento arqueológico de la Sierra de Atapuerca (Burgos). *Geogaceta*. 23, pp. 39–42.
- Falguères, C., Bahain, J.-J., Bischoff, J.L., Pérez-González, A., Ortega, A.I., Ollé, A., Quiles, A., Galeb, B., Moreno, D., Dolo, J.-M., Shao, Q., Vallverdú, J., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., 2013. Combined ESR/U-series chronology of Acheulean hominid-bearing layers at Trinchera Galería site, Atapuerca, Spain. *J. Hum. Evol.* 65 (2), 168–184. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2013.05.005>.
- Fernández-Jalvo, Y., 1995. Small mammal taphonomy at La Trinchera de Atapuerca (Burgos, Spain). A remarkable example of taphonomic criteria used for stratigraphic correlations and palaeoenvironment interpretations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 114, 167–195.
- Ford, D.C., Williams, P., 1989. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Unwin Hyman Ltd., London.
- Gaffney, C., 2008. Detecting trends in the prediction of the buried past: a review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry* 50 (2), 313–336. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00388.x>.
- Gil, E., Aguirre, E., Hoyos, M., 1987. Contexto estratigráfico. In: Aguirre, E., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M. (Eds.), *El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la Sierra de Atapuerca*. Junta de Castilla y León, Consejería de Cultura y Bienestar Social, Valladolid, pp. 45–47.
- Hesse, A., 2002. Méthodes géophysiques de la prospection. In: Miskovsky, J.C. (Ed.), *Géologie de la Préhistoire*, 2nd edn. Association pour l'étude de l'environnement géologique de la Préhistoire, Paris, GéoPré, pp. 393–406.
- Huguet, R., Vallverdú, J., Rodríguez-Álvarez, X.P., Terradillos-Bernal, M., Bargalló, A., Lombra-Hermida, A., Menéndez, L., Modesto-Mata, M., Van der Made, J., Soto, M., Blain, H.-A., García, N., Cuenca-Bescós, G., Gómez-Merino, G., Pérez-Martínez, R., Expósito, I., Allué, E., Rofes, J., Burjachs, F., Canals, A., Bennàsar, M., Nuñez-Lahuerta, C., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2017. Level TE9c of Sima del Elefante (Sierra de Atapuerca, Spain): a comprehensive approach. *Quat. Int.* 433 (PA), 278–295. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.030>.
- Kaufmann, O., Deceuster, J., 2014. Detection and mapping of ghost-rock features in the Tournaisis area through geophysical methods: an overview. *Geol. Belg.* 17 (1), 17–26.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J.A., González-Castillo, L., Ruiz-Constán, A., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W., 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics* 107, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>.
- Moreno, D., Falguères, C., Pérez-González, A., Voinchet, P., Galeb, B., Despriée, J., Bahain, J.-J., Sala, R., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., 2015. New radiometric dates on the lowest stratigraphical section (TD1 to TD6) of Gran Dolina site (Atapuerca, Spain). *Quaternary Geochronology* 30 (PB), 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.05.007>.
- Ollé, A., Mosquera, M., Rodríguez, X.P., Lombra-Hermida, A., García-Antón, M.D., García-Medrano, P., Peña, L., Menéndez, L., Navazo, M., Terradillos, M., Bargalló, A., Márquez, B., Sala, R., Carbonell, E., 2013. The Early Middle Pleistocene technological record from Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Quat. Int.* 295, 138–167. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.11.009>.
- Ortega, A.I., 2009. *La evolución geomorfológica del karst de la Sierra de Atapuerca (Burgos) y su relación con los yacimientos pleistocenos que contiene*. (Ph.D. Dissertation). Universidad de Burgos.
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Porres, A., Martín, M.A., 2010. Applying electrical resistivity tomography to the identification of endokarst geometries in the Pleistocene sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection* 17, 233–245. <https://doi.org/10.1002/arp.392>.
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Martín-Merino, M.A., Pérez-Martínez, R., Parés, J.M., Aramburu, A., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2013. Evolution of multilevel caves in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain) and its relation to human occupation. *Geomorphology* 196, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.031>.
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., 2014. Atapuerca karst and its palaeoanthropological sites. In: Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (Eds.), *Landscapes and Landforms of Spain*. World Geomorphological Landscapes. Springer, Dordrecht, pp. 101–110. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8628-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8628-7_8).
- Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Martín, M.A., Pérez-González, A., Parés, J.M., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L., Carbonell, E., 2018. Las cuevas de la Sierra de Atapuerca y el uso humano del paisaje kárstico durante el Pleistoceno (Burgos, España). *Boletín Geológico y Minero* 129 (1/2), 83–105. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.004>.
- Parés, J.M., Pérez González, A., Rosas, A., Benito-Calvo, A., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., Huguet, R., 2006. Matuyama-age lithic tools from the Sima del Elefante site, Atapuerca (northern Spain). *J. Hum. Evol.* 50 (2), 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2005.08.011>.
- Parés, J.M., Álvarez-Posada, C., Sier, M., Moreno, D., Duval, M., Woodhead, J., Ortega, A.I., Campaña, I., Rosell, J., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2018. Chronology of

- the cave interior sediments at Gran Dolina archaeological site, Atapuerca (Spain). *Quat. Sci. Rev.* 186, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.02.004>.
- Pérez-González, A., Parés, J.M., Gallardo, J., Aleixandre, T., Ortega, A.I., Pinilla, A., 1999. Geología y estratigrafía del relleno de Galería de la Sierra de Atapuerca (Burgos). In: Carbonell, E., Rosas, A., Díez, J.C. (Eds.), *Atapuerca: Ocupaciones humanas y paleoecología del yacimiento de Galería*. Junta de Castilla y León, Consejería de Educación y Cultura, Valladolid, pp. 31–42.
- Pérez-González, A., Parés, J.M., Carbonell, E., Aleixandre, T., Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Martín, M.A., 2001. Géologie de la Sierra de Atapuerca et stratigraphie des remplissages karstiques de Galería et Dolina (Burgos, Espagne). *L'Anthropologie* 105 (1), 27–43. [https://doi.org/10.1016/S0003-5521\(01\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0003-5521(01)80004-2).
- Pineda, A., Arce, J.M., 1997. Mapa Geológico de España, E 1:50.000, Hoja n°200 (Burgos), Serie Magna. IGME, Madrid.
- Piscitelli, S., Rizzo, E., Cristallo, F., Lapenna, V., Crocco, L., Persico, R., Soldovieri, F., 2007. GPR and microwave tomography for detecting shallow cavities in the historical area of "Sassi of Matera (southern Italy)". *Near Surface Geophysics* 5 (4), 275–284. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007009>.
- Revil, A., Karaoulis, M., Johnson, T., Kemna, A., 2012. Review: some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeol. J.* 20 (4), 617–658. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0819-x>.
- Rodríguez-Hidalgo, A., Saladié, P., Ollé, A., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2017. Human predatory behaviour and the social implications of communal hunting based on evidence from the TD10.2 bison bone bed at Gran Dolina (Atapuerca, Spain). *J. Hum. Evol.* 105, 89–122. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.01.007>.
- Rosas, A., Pérez-González, A., Carbonell, E., Van der Made, J., Sánchez-Marco, A., Laplana, C., Cuenca-Bescós, G., Parés, J.M., Huguet, R., 2001. Le gisement pléistocène de la Sima del Elefante (Sierra de Atapuerca, Espagne). *L'Anthropologie* 105 (2), 301–312. [https://doi.org/10.1016/S0003-5521\(01\)80018-2](https://doi.org/10.1016/S0003-5521(01)80018-2).
- Rosas, A., Huguet, R., Pérez González, A., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Vallverdú, J., Van der Made, J., Allué, E., García, N., Pérez-Martínez, R., Rodríguez, J., Sala, R., Saladié, P., Benito-Calvo, A., Martínez-Maza, C., Bastir, M., Sanchez, A., Parés, J.M., 2006. The Sima del Elefante cave site at Atapuerca (Spain). *Estudios Geológicos* 62 (1), 327–348. <https://doi.org/10.3989/egeol.0662129>.
- Schrott, L., Sass, O., 2008. Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology* 93 (1), 55–73. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.024>.
- Valois, R., Bermejo, L., Guérin, R., Hinguant, S., Pigaud, R., Rodet, J., 2010. Karst morphologies identified with geophysics around Saulges caves (Mayenne, France). *Archaeological Prospection* 17 (3), 151–160. <https://doi.org/10.1002/arp.385>.
- Weinstein-Evron, M., Beck, A., Ezersky, M., 2003. Geophysical investigations in the service of Mount Carmel (Israel). *Journal of Archaeological Science* 30 (10), 1331–1341. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(03\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(03)00023-2).





# THE THREE DIMENSIONS OF ARCHAEOLOGY

PROCEEDINGS OF THE XVII UISPP WORLD  
CONGRESS (1-7 SEPTEMBER 2014, BURGOS, SPAIN)

Volume 7/Sessions A4b and A12

Edited by

Hans Kamermans, Wieke de Neef, Chiara Piccoli,  
Axel G. Posluschny and Roberto Scopigno





# THE THREE DIMENSIONS OF ARCHAEOLOGY

PROCEEDINGS OF THE XVII UISPP WORLD  
CONGRESS (1–7 SEPTEMBER 2014, BURGOS, SPAIN)

**Volume 7/Sessions A4b and A12**

**Edited by**

**Hans Kamermans, Wieke de Neef,  
Chiara Piccoli, Axel G. Posluschny  
and Roberto Scopigno**

ARCHAEOPRESS ARCHAEOLOGY

# ARCHAEOPRESS PUBLISHING LTD

Gordon House  
276 Banbury Road  
Oxford OX2 7ED

[www.archaeopress.com](http://www.archaeopress.com)

ISBN 978 1 78491 293 2  
ISBN 978 1 78491 294 9 (e-Pdf)

© Archaeopress, UISPP and authors 2016

VOLUME EDITORS: Hans Kamermans, Wieke de Neef, Chiara Piccoli, Axel G. Posluschny  
and Roberto Scopigno

SERIES EDITOR: The board of UISPP

CO-EDITORS – Faculty of Archaeology, Leiden University

SERIES PROPERTY: UISPP – International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences

KEY-WORDS IN THIS VOLUME: Archaeological methodology, 3D Archaeology, remote sensing,  
spatial analysis, heritage management

UISPP PROCEEDINGS SERIES is a printed on demand and an open access publication,  
edited by UISPP through Archaeopress

BOARD OF UISPP: Jean Bourgeois (President), Luiz Oosterbeek (Secretary-General),  
François Djindjian (Treasurer), Ya-Mei Hou (Vice President), Marta Arzarello (Deputy Secretary-General).  
The Executive Committee of UISPP also includes the Presidents of all the international scientific  
commissions ([www.uispp.org](http://www.uispp.org))

BOARD OF THE XVII WORLD CONGRESS OF UISPP: Eudald Carbonell (Secretary-General),  
Robert Sala I Ramos, Jose Maria Rodriguez Ponga (Deputy Secretary-Generals)

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, or transmitted, in any form or by any  
means, electronic, mechanical, photocopying or otherwise, without the prior written permission  
of the copyright owners.

This book is available direct from Archaeopress or from our website [www.archaeopress.com](http://www.archaeopress.com)

# Contents

List of Figures and Tables.....	iii
Foreword to the XVII UISPP Congress Proceedings Series Edition ..... Luiz OOSTERBEEK	vi
The Three Dimensions of Archaeology – Introduction..... Hans KAMERMANS, Chiara PICCOLI, Wieke DE NEEF, Axel G. POSLUSCHNY & Roberto SCOPIGNO	vii
<b>Discussing the obvious or defending the contested: why are we still discussing the ‘scientific value’ of 3D applications in archaeology?.....</b> Tijm LANJOUW	<b>1</b>
<b>3Di – enhancing the record, extending the returns, 3D imaging from free range photography and its application during excavation .....</b> Dominic POWLESLAND	<b>13</b>
<b>Towards 3D GIS. Notes from the 2012 CAA-NL/DE chapter session ‘from 2.5 to 3 spatial dimensions’ .....</b> Martijn VAN LEUSEN & Serge VAN GESSEL	<b>33</b>
<b>Are we there yet? 3D GIS in archaeological research, the case of Tell Sabi Abyad, Syria .....</b> Victor KLINKENBERG	<b>39</b>
<b>Three-dimensional simulation of a fire in a simplified gallery of the Chauvet-Pont-d’Arc cave (Ardèche, France).....</b> Delphine LACANETTE, Jean-Christophe MINDEGUIA, Catherine FERRIER, Evelyne DEBARD & Bertrand KERVAZO	<b>49</b>
<b>Using digital photogrammetry to produce 3D models at prehistoric ditched enclosures: Perdigões as a case study .....</b> José L. CARO, Víctor JIMÉNEZ-JÁIMEZ & José Enrique MÁRQUEZ-ROMERO	<b>61</b>
<b>3D modeling by digital photogrammetry applied to the Palaeolithic mammoth bone dwelling settlement of Gontsy (Ukraine).....</b> Lioudmila IAKOVLEVA, François DJINDJIAN & Yves EGELS	<b>73</b>
<b>Archaeology and coastal erosion: monitoring change through 3D digital techniques .....</b> Elias LÓPEZ-ROMERO, Patricia MAÑANA-BORRAZÁS, Alejandro GÜMIL-FARIÑA & Marie Yvane DAIRE	<b>89</b>
<b>Fast 3D recording techniques: a low-cost method for the documentation and analysis of scattered architectural elements as a part of the EMCHAHE project .....</b> Patricia MAÑANA-BORRAZÁS, Rebeca BLANCO-ROTEA & José Carlos SÁNCHEZ-PARDO	<b>99</b>



<b>Using airborne laser scanning and historical aerial photos to identify modern age fortifications in the Minho Valley, Northwest Iberian Peninsula .....</b>	<b>111</b>
Rebeca BLANCO-ROTEA, João FONTE, Alejandro GÜMIL-FARIÑA & Patricia MAÑANA-BORRAZÁS	
<b>Devilish details – fine-tuning survey techniques for ephemeral sites.....</b>	<b>121</b>
Wieke DE NEEF & Martijn VAN LEUSEN	
<b>Geophysical survey on “El Mazo de la Castañera” (Cantabria, Spain): looking for open-air domestic remains.....</b>	<b>133</b>
Eduardo CARMONA BALLESTERO, Cristina VEGA MAESO, Oscar LÓPEZ JIMÉNEZ & Victoria MARTÍNEZ CALVO	
<b>Electrical resistivity imaging survey around the caves of the Ojo Guareña Karst complex (Merindad de Sotoscueva, Burgos, Spain) .....</b>	<b>141</b>
L. BERMEJO, A. I. ORTEGA, R. GUÉRIN, A. BENITO-CALVO, J. M. PARÉS, M. A. MARTÍN, E. ARACIL, U. MARURI & J. A. PORRES	

## List of Figures and Tables

### *D. POWLESLAND: 3Di – enhancing the record, extending the returns, 3D imaging from free range photography and its application during excavation*

FIGURE 1. DIGITISED FIELD DRAWING FROM WEST HESLERTON, NORTH YORKSHIRE.....	16
FIGURE 2. FOUR RENDERINGS OF THE PLAN OF THE POST SETTINGS OF A TIMBER BUILDING.....	17
FIGURE 3. 3D LASER SCAN MADE USING A LEICA HD LASER SCANNER SHOWING INTERNAL FEATURES .....	19
FIGURE 4. POINT CLOUD FROM 3D LASER SCAN SHOWING THE EAST FACING WALL AND DOORWAY .....	20
FIGURE 5. AN EARLY SfM EXPERIMENT RECORDING AN EXCAVATED NEOLITHIC PIT.....	22
FIGURE 6. DETAIL VIEW OF PART OF A SECTION THROUGH A BRONZE AGE BARROW .....	24
FIGURE 7. MULTIPLE SECTIONS OF TRENCHES EXCAVATED IN THREE DIFFERENT YEARS.....	25
FIGURE 8. SMALL EXCAVATION EXAMINING THE RAMPART OF A LARGE HILL-FORT AT ROULSTON SCAR.....	26
FIGURE 9. ISOMETRIC VIEW OF THE SAME MODEL WITH CAMERA POSITIONS SHOWN IN FIGURE 8 .....	26
FIGURE 10. TRIANGULATED MESH COVERING THE TRENCH SHOWN IN FIGURES 8 AND 9 .....	27
FIGURE 11. THE COMPLETED AND ANNOTATED 3DI MODEL SHOWING AN EARLIER STAGE IN THE EXCAVATION.....	27
FIGURE 12. CAMERA POSITIONS RECORDED USING A SMALL QUADCOPTER TO MODEL AN EARTHWORK FEATURE .....	30
FIGURE 13. 3DI MODEL GENERATED FROM MORE THAN 150 IMAGES GATHERED USING A DJI QUADCOPTER .....	31

### *M. van LEUSEN & S. van GESSEL: Towards 3D GIS. Notes from the 2012 CAA-NL/DE chapter session ‘from 2.5 to 3 spatial dimensions’*

FIGURE 1. EXAMPLE OF WHAT A TRUE VOLUMETRIC MODEL MIGHT LOOK LIKE .....	34
FIGURE 2. LEGO MODEL USING VOXELS OF DIFFERENT DIMENSIONS TO REPRESENT OBJECTS, CUTS AND FILLS .....	36
FIGURE 3. GOCAD MODEL OF SUPERFICIAL GEOLOGICAL DEPOSITS IN THE GLASGOW AREA .....	36

### *V. KLINKENBERG: Are we there yet? 3D GIS in archaeological research, the case of Tell Sabi Abyad, Syria*

FIGURE 1. THE MAIN SUBSYSTEMS OF A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM .....	40
FIGURE 2. OVERVIEW MAP OF TELL SABI ABYAD WITH THE NEOLITHIC AS WELL AS THE ARCHITECTURE .....	41
FIGURE 3. 3D VIEW OF EXTRUDED ARCHAEOLOGICAL HORIZONS .....	42
FIGURE 4. 3D DISTRIBUTION OF A SELECTION OF THE LATE NEOLITHIC BURIALS FROM TELL SABI ABYAD.....	43
FIGURE 5. 3D DISTRIBUTION OF CUNEIFORM TABLETS IN A HALLWAY OF THE DUNNU .....	44
FIGURE 6. SECTION DRAWINGS AMONGST THE SCHEMATIC ARCHITECTURE.....	45

### *D. LACANETTE, J.-C. MINDEGUIA, C. FERRIER, E. DEBARD & B. KERVAZO: Three-dimensional simulation of a fire in a simplified gallery of the Chauvet-Pont-d’Arc cave (Ardèche, France)*

FIGURE 1. MAP OF THE CHAUVET-PONT-D’ARC CAVE WITH EXAMPLES OF FAMOUS PAINTINGS AND ENGRAVINGS.....	50
FIGURE 2. CHANGE OF COLOUR OF THE LIMESTONE, TO PINK/RED (LEFT), TO GREY (RIGHT).....	50
FIGURE 3. SOOT DEPOSIT AND SPALLING .....	51
FIGURE 4. LOCATION OF THE THERMAL IMPACTS IN THE CHAUVET CAVE IN VIOLET .....	52
FIGURE 5. LOCATION OF THE FIREPLACES IN THE MEGACEROS GALLERY.....	52
FIGURE 6. QUARRY OF LUGASSON. SOOT DEPOSIT AND SPALLING AND RUBIFICATION .....	53
FIGURE 7. PHOTOGRAMMETRY OF THE QUARRY AND RECONSTRUCTION IN FDS .....	54
FIGURE 8. DISTRIBUTION OF MEASURED AND SIMULATED WALL TEMPERATURES.....	54
FIGURE 9. DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AND VELOCITIES.....	55
FIGURE 10. RELEASE AND DISSIPATION OF THE SMOKE AND SOOT DEPOSIT ON THE UPPER PART OF THE WALL.....	55
FIGURE 11. DOMAIN CONCERNED BY THE 3D SIMULATION OF THE FIRE .....	56
FIGURE 12. TEMPERATURE DISTRIBUTION ON A SLICE IN A VOLUME LIKE THE MEGACEROS GALLERY .....	57
FIGURE 13. VISUALISATION ON A SLICE OF THE LOCATION OF THE HIGHEST TEMPERATURES.....	57
FIGURE 14. AIR VELOCITY DISTRIBUTION AND EVACUATION SCHEME OF THE AIR NEAR THE FIRE .....	58
FIGURE 15. SMOKE DISTRIBUTION IN A VOLUME LIKE THE MEGACEROS GALLERY DURING THE FIRE .....	58
FIGURE 16. FRACTIONAL EFFECTIVE DOSE DISTRIBUTION ON A SLICE OF VOLUME .....	59

*J. L. CARO, V. JIMÉNEZ-JÁIMEZ & J. E. MÁRQUEZ-ROMERO: Using digital photogrammetry to produce 3D models at prehistoric ditched enclosures: Perdigões as a case study*

FIGURE 1. AERIAL VIEW AND MAGNETOGRAM OF PERDIGÕES .....	63
FIGURE 2. MICRO-TOPOGRAPHIC SURVEY AT PERDIGÕES .....	64
FIGURE 3. BASIC 3D WORKFLOW AT PERDIGÕES.....	67
FIGURE 4. CREATION OF PHOTOGRAMMETRIC COMPOSED FLOOR PLANS AT PERDIGÕES.....	67
FIGURE 5. SECTOR L AT PERDIGÕES, AREA AROUND THE 'IMBREX' .....	68
FIGURE 6. PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION AND SUBSEQUENT 3D MODELLING AT SECTOR L IN PERDIGÕES .....	68
FIGURE 7. ARTEFACTS FROM SECTOR L AT PERDIGÕES SELECTED FOR THE 3D MODELLING TEST .....	69
FIGURE 8. SYNTHETIC IMAGES REPRESENTING THE IDOL AND THE LOOM WEIGHT FROM SECTOR L AT PERDIGÕES .....	69

*L. IAKOVLEVA, F. DJINDJIAN & Y. EGELS: 3D modeling by digital photogrammetry applied to the Palaeolithic mammoth bone dwelling settlement of Gontsy (Ukraine)*

FIGURE 1. TOPOGRAPHY OF THE SLOPE OF THE UDAĬ RIVER AND LOCATION OF THE SETTLEMENT OF GONTSY .....	74
FIGURE 2. THE SETTLEMENT BEFORE EXCAVATIONS (DURING THE WINTER) AND DURING EXCAVATIONS.....	75
FIGURE 3. THE MAP OF THE EXCAVATIONS SINCE 1871 .....	76
FIGURE 4. A GENERAL VIEW OF THE SETTLEMENT UNDER THE LARGE HANGAR N°1 .....	77
FIGURE 5. THE MAMMOTH BONE BED UNDER THE HANGAR 2 IN THE BOTTOM OF THE EASTERN PALEORAVINE .....	77
FIGURE 6A. THE SMALL MAMMOTH BONE HUT N°2 .....	78
FIGURE 6B. RECONSTITUTION OF THE SMALL MAMMOTH BONE HUT N°2 .....	79
FIGURE 7. THE MAMMOTH BONE HUT N°3 (EXCAVATIONS 2014).....	80
FIGURE 8. THE MAMMOTH BONE HUT N°4 (EXCAVATIONS 2010-2011).....	80
FIGURE 9. THE MAMMOTH BONE HUT N°5 (EXCAVATIONS 2013).....	81
FIGURE 10. THE DATA ACQUISITION BY OBLIQUE PHOTOGRAPHY.....	82
FIGURE 11. GENERAL VIEW OF THE THREE MAMMOTH BONE HUTS BY 3D DIGITAL PHOTOGRAMMETRY .....	84
FIGURE 12. 3D DIGITAL PHOTOGRAMMETRY: THE CONTOUR LINE OF THE MAMMOTH BONE HUT N°5 .....	85
FIGURE 13. 3D DIGITAL PHOTOGRAMMETRY: SQUARE L5 OF THE MAMMOTH BONE HUT N°4.....	86

*E. LÓPEZ-ROMERO, P. MAÑANA-BORRAZÁS, A. GÜMIL-FARIÑA & M. Y. DAIRE: Archaeology and coastal erosion: monitoring change through 3D digital techniques*

FIGURE 1. LOCATION MAP OF STUDY AREAS .....	90
FIGURE 2. DGPS POSITIONING OF REFERENCE STATIONS. PÉNESTIN PENINSULA (BRITTANY, FRANCE) .....	92
FIGURE 3. COASTAL PATH AT LE LOMER (PÉNESTIN, BRITTANY, FRANCE) .....	93
FIGURE 4. GENERAL VIEW OF GUIDOIRO AREOSO (RÍA DE AROUSA, GALICIA, SPAIN) .....	94
FIGURE 5. HALANGY PORTH (SAINT MARY'S, ISLES OF SCILLY, UK) .....	95
TABLE 1. ARCHAEOLOGICAL SITES CONSIDERED FOR THE ANALYSIS. ....	91

*P. MAÑANA-BORRAZÁS, R. BLANCO-ROTEA & J. C. SÁNCHEZ-PARDO: Fast 3D recording techniques: a low-cost method for the documentation and analysis of scattered architectural elements as a part of the EMCHAHE project*

FIGURE 1. EMCHAHE CASE STUDY AREAS IN THE NW IBERIAN PENINSULA.....	100
FIGURE 2. SUMMARY OF THE DIFFERENT TECHNIQUES APPLIED IN THE PROSPECTIVE AND ANALYTICAL PHASES .....	102
FIGURE 3. SUMMARY OF THE WORKFLOW OF THE 3-D RECORDING TECHNIQUE IN EMCHAHE.....	103
FIGURE 4. DIFFERENCES IN THE SOUTHERN ELEVATION OF THE CHAPEL OF SAN MAMEDE DOS MÁRTORES .....	104
FIGURE 5. DIFFERENT VIEWS OF THE 3-D MODEL OF SANTO TOMÉ DE TORDEA CHURCH .....	105
FIGURE 6. EXAMPLE OF THE HIGH LEVEL OF DETAIL THAT CAN BE ACHIEVED USING THIS 3-D RECORDING SYSTEM.....	106
FIGURE 7. WE USE THE RESULTS OF PHOTOGRAMMETRY NOT ONLY TO SHOW THE CHURCHES .....	107

*R. BLANCO-ROTEA, J. FONTE, A.I. GÜMIL-FARIÑA & P. MAÑANA-BORRAZÁS: Using airborne laser scanning and historical aerial photos to identify modern age fortifications in the Minho Valley, Northwest Iberian Peninsula*

FIGURE 1. AREAS STUDIED AS A PART OF THE MODERN AGE FORTIFIED LANDSCAPES PROJECT .....	112
FIGURE 2. SUMMARY OF THE ANALYSIS OF ARCHAEOLOGICAL AND HERITAGE ELEMENTS .....	113
FIGURE 3. APPLICATION OF AIRBORNE LIDAR TO BASTIONED FORTIFICATIONS IN THE BAIXO MINHO .....	115
FIGURE 4. WORKFLOW OF THE PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION OF THE FORTIFICATIONS OF EXTREMO. ....	117

*W. DE NEEF & M. VAN LEUSEN: Devilish details –  
fine-tuning survey techniques for ephemeral sites*

FIGURE 1. THE SIBARITIDE IN NORTHERN CALABRIA (ITALY) .....	122
FIGURE 2. THE CLASSIFICATION OF PROTOHISTORIC SITES .....	124
FIGURE 3. SITES T94 AND T231, CONTRADA DAMALE. RESULTS OF THE MAGNETIC GRADIOMETER SURVEY.....	125
FIGURE 4. SITE T231. RESULTS OF REPEATED MAGNETIC GRADIOMETER SURVEY ON THE EXPOSED SURFACE .....	126
FIGURE 5. TWO COMPLETE LATE BRONZE AGE STORAGE VESSELS OF THE DOLIO CORDONATO O A FASCE TYPE.....	129
FIGURE 6. VIEW OVER THE CONTRADA DAMALE, THE TOWN OF FRANCAVILLA MARITTIMA .....	129

*E. CARMONA BALLESTERO, C. VEGA MAESO, O. LÓPEZ JIMÉNEZ & V. MARTÍNEZ CALVO:*  
**Geophysical survey on “El Mazo de la Castañera” (Cantabria, Spain):  
looking for open-air domestic remains**

FIGURE 1. LOCATION OF EL MAZO DE LA CASTAÑERA .....	134
FIGURE 2. SURVEYED ZONES IN EL MAZO DE LA CASTAÑERA.....	135
FIGURE 3. SURFACE MAPS FROM M1 ZONE: ELECTRIC CONDUCTIVITY (EC) AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY (MS) ....	135
FIGURE 4. READINGS AND INTERPRETATION OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY FROM M2 ZONE.....	136
FIGURE 5. READINGS AND INTERPRETATION OF ELECTRIC CONDUCTIVITY FROM M3 ZONE.....	136
FIGURE 6. READINGS AND INTERPRETATION OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY FROM M4 ZONE.....	137
FIGURE 7. READINGS AND INTERPRETATION OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY FROM M5 ZONE.....	137
FIGURE 8. READINGS AND INTERPRETATION OF ELECTRIC CONDUCTIVITY FROM M6 ZONE.....	138

*L. BERMEJO, A. I. ORTEGA, R. GUÉRIN, A. BENITO-CALVO, J. M. PARÉS, M. A. MARTÍN, E. ARACIL,  
U. MARURI & J. A. PORRES: Electrical resistivity imaging survey around the caves of  
the Ojo Guareña Karst complex (Merindad de Sotoscueva, Burgos, Spain)*

FIGURE 1. DETAIL OF THE OJO GUAREÑA KARST. KAITE AND PALOMERA CAVE ARE HIGHLIGHTED IN DARK GREY.....	142
FIGURE 2. PALOMERA CAVE ENTRANCE AREA PLAN. THE ERT PROFILE LAYOUT IS MARKED IN DARK GREY .....	143
FIGURE 3. KAITE PLAN: A IS THE ANCIENT ENTRANCE; B THE SANCTUARY AREA; C THE CURRENT ACCESS .....	144
FIGURE 4. PALOMERA’S ERT PROFILE WITH BOTH WENNER-SCHLUMBERGER AND DIPOLE-DIPOLE RESULTS.....	146
FIGURE 5. KAITE’S ERT PROFILES.....	147
FIGURE 6. DETAIL OF KAITE’S ANCIENT ENTRANCE .....	148



# Electrical resistivity imaging survey around the caves of the Ojo Guareña Karst complex (Merindad de Sotocueva, Burgos, Spain)

L. BERMEJO

Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH). Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain and Equipo Primeros Pobladores de Extremadura, Casa de la Cultura Rodríguez Moñino. Avda. Cervantes s/n, 10003 Cáceres, Spain  
lucia.bermejo@fa.cenieh.es

A. I. ORTEGA

Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH). Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain and Grupo Espeleológico Edelweiss, Excma. Diputación Provincial de Burgos, C/Paseo del Espolón s/n, 09071, Burgos, Spain

R. GUÉRIN

Sorbonne universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7619, METIS, F-75005, Paris, France

A. BENITO-CALVO & J. M. PARÉS

Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH). Paseo Sierra de Atapuerca 3, 09002 Burgos, Spain

M. A. MARTÍN

Grupo Espeleológico Edelweiss, Excma. Diputación Provincial de Burgos, C/Paseo del Espolón s/n, 09071, Burgos, Spain

E. ARACIL & U. MARURI

Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. c/ Luxemburgo, 4; portal 1, oficina 3; 28224-Pozuelo de Alarcón, Madrid, Spain

J. A. PORRES

Área de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e I.C.T. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos, 09001 Burgos, Spain

## Abstract

*Electrical Resistivity Imaging measurements were carried out around Kaite and Palomera Cave in order to identify their detrital infilling morphologies. These two caves are part of the Ojo Guareña Karst complex and contain different archaeological remains dating from the Upper Paleolithic to the Iron Age. At Palomera Cave, the proposed models show complex geological formations that mark the evolution of Palomera Sinkhole as well as the location of interesting infills where archaeological remains may have been preserved. In Kaite, the results suggest the presence of sediments prior to the ceiling breakdown, which, as this is one of the oldest caves in the karstic system (Ortega et al., 2013), may preserve early prehistoric phases of occupation remains. This information adds to a better understanding of the karst formation processes and may be used in the planning of a future excavation.*

**Keywords:** Ojo Guareña Karst, Electrical Resistivity Imaging, archaeology, speleogenesis

## Résumé

*Des prospections géophysiques ERI (Imagerie de Résistivité Électrique) ont été conduites dans les grottes de Kaite et Cueva Palomera, dans l'intention d'identifier la morphologie de ses remplissages terrigènes. Ces deux grottes font partie du Karst d'Ojo Guareña et préservent des restes archéologiques allant du Paléolithique Moyen à L'Age de Fer Les modèles proposés montrent des formations géologiques complexes qui peuvent avoir*

*identifié, pour Cueva Palomera, l'évolution de la Doline Palomera et aussi la localisation des remplissages susceptibles de garder des restes archéologiques. À Kaité les résultats suggèrent la présence des sédiments qui pourraient appartenir à un moment antérieur à l'effondrement du plafond, or comme c'est l'une des grottes des plus vieilles du système karstique, cela pourrait indiquer l'existence des restes des occupations le plus anciennes. Cette information permet de mieux comprendre les processus de la formation du karst, et peut aider la planification d'une future fouille archéologique.*

**Mots clés:** Karst d'Ojo Guareña, Imagerie de Résistivité Électrique, archéologie, spéléogèness

## Introduction

Geophysical prospection is increasingly being used in archaeological research because it allows recognizing buried structures and features without invasive methods. This facilitates the interpretation of sites, excavation planning and conservation policies (Conyers 2012; Bermejo *et al.* 2010; 2013b; Lowe 2012; Cardarelli & Di Filippo 2009; Benech & Hesse 2007; Hesse 1999; Wynn 1986).

Among the geophysical methods, geo-electric surveys, and in particular ERI, are commonly used in the investigation of archaeological karstic sites (Bermejo *et al.* 2014a; Porres *et al.* 2013; Ortega *et al.* 2010; Valois *et al.* 2010; Piro *et al.* 2001). This is because electrical resistivity surveys can determine the size, location and potential of different karstic features with high accuracy (Chalikakis *et al.* 2011; Guérin *et al.* 2009), based on the contrast of the different resistivity values such as between the limestone host rock and the detrital sediments.

The aim of the electric resistivity surveys at the Ojo Guareña Karst complex was to locate sediments that may contain archaeological remains or fills of ancient cave entrances, as well as to find void passages impassable to speleological exploration, which may help understand the evolution and features of this underground environment.

The Ojo Guareña Karst is located in Northern Spain, in the southern spurs of the Cantabrian Range (Figure 1). The Ojo Guareña Karst complex consists of more than 400 cavities with 14 entrances and a network of underground conduits that reaches a total length of 110 km. These caves are developed in Cretaceous limestone and distributed over six overlapping sub-horizontal levels, constituting one of the longest multilevel cave systems in Europe.

The dimensions and variety of these conduits offer countless possibilities for human occupation, as is reflected by the cultural sequence that dates from the Middle Palaeolithic to the Middle Ages (Ortega

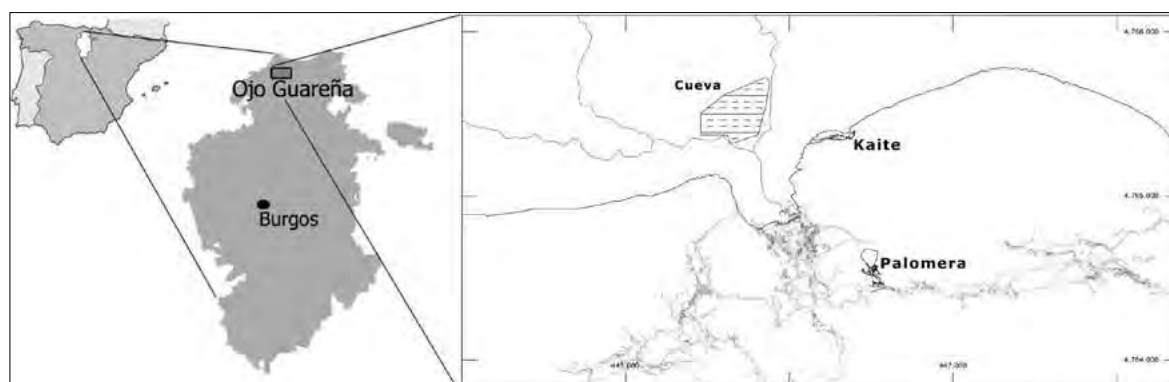


FIGURE 1. DETAIL OF THE OJO GUAREÑA KARST. KAITÉ AND PALOMERA CAVE ARE HIGHLIGHTED IN DARK GREY (BASED ON ORTEGA *ET AL.* 2013).

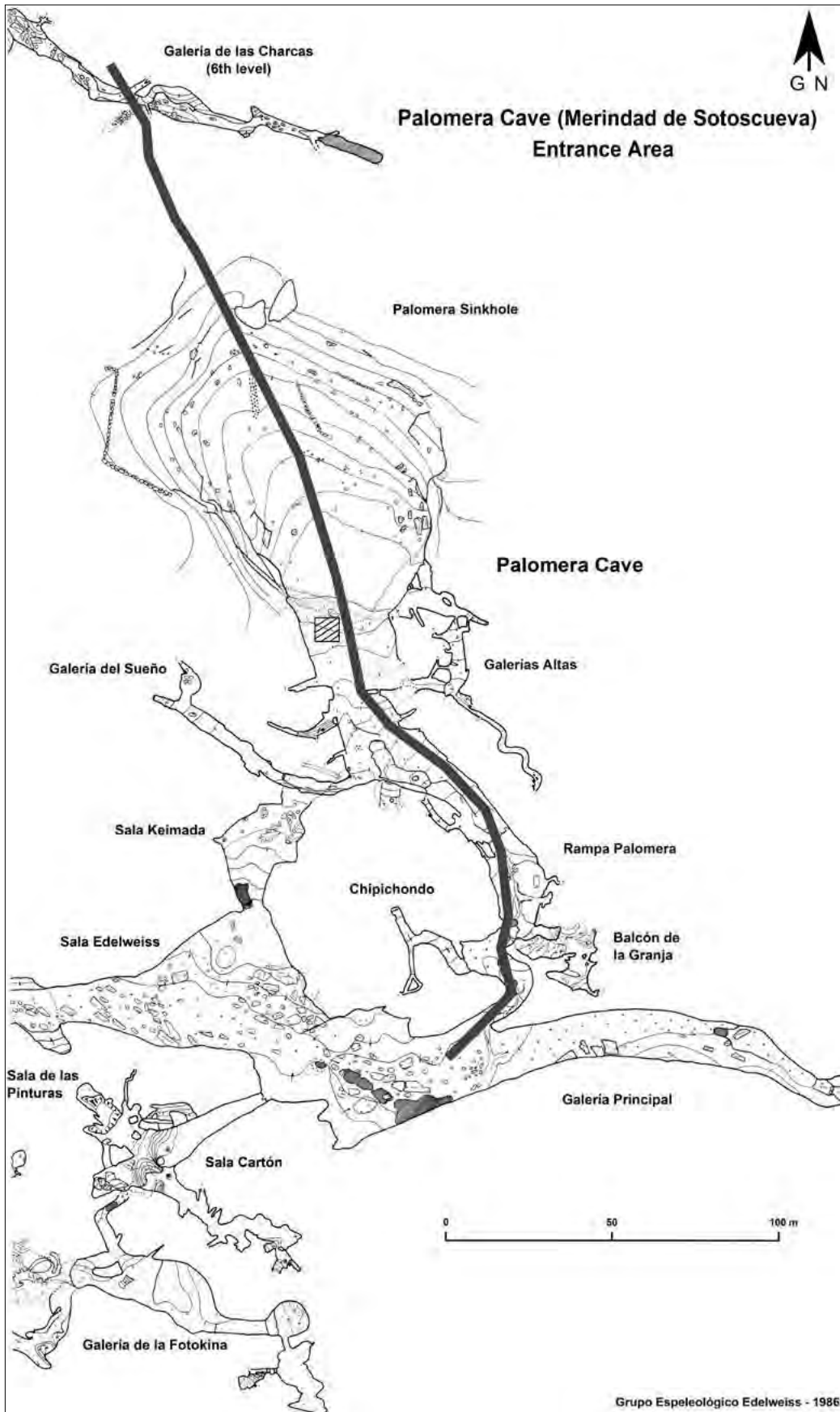


FIGURE 2. PALOMERA CAVE ENTRANCE AREA PLAN. THE ERT PROFILE LAYOUT IS MARKED IN DARK GREY. THE APPROXIMATE LOCATION OF CORCHON'S 1972 EXCAVATION IS MARKED BY A BLACK GRILLE (BASED ON G. E. EDELWEISS, 1986).

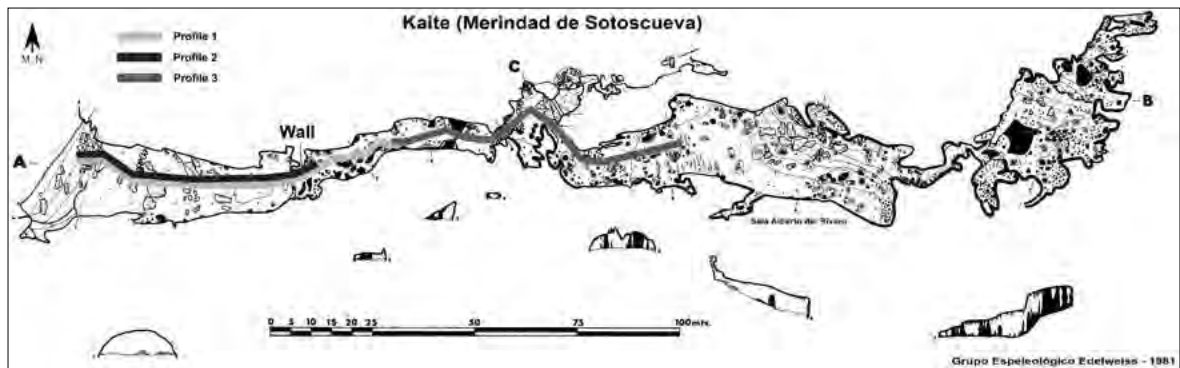


FIGURE 3. KAITE PLAN: A IS THE ANCIENT ENTRANCE; B THE SANCTUARY AREA; C THE CURRENT ACCESS. PROFILE 1 IS MARKED IN BLACK, PROFILE 2 IN LIGHT GREY AND PROFILE 3 IN DARK GREY (BASED ON G. E. EDELWEISS, 1986).

*et al.* 2013; Ortega & Martín 2011). Kaite and the entrance area of Palomera Cave are among the best-known caves in the complex because of their archaeological records (Ortega & Martín 1986).

Palomera Cave, the main cave of the karstic complex, contains numerous sites dating from the Upper Palaeolithic to the Iron Age. Soledad Corchón's 1972 excavation in the cave entrance uncovered a 5 m deep stratigraphy related to Chalcolithic and Bronze Ages, but did not reach the sedimentary sequence bottom. Therefore, unknown Palaeolithic deposits may still be buried in the lower stratigraphical levels (Ortega & Martín 1986) (Figure 2).

Kaite is a horizontal passage which constitutes an isolated higher level of the Ojo Guareña Karst complex. Neolithic and Bronze Age habitation areas are preserved in its two entrances: a valley facing entrance (A) where a habitation area was demarcated in prehistoric times by a wall; and the current access (C) which is the result of a ceiling collapse (Figure 3). In addition, it preserves sepulchral/symbolic areas inside the cave (B) with semi-naturalistic rock art (Uribarri and Liz 1973; Ortega *et al.* 2013). Its strategic location, perched 140 m above the Sotocueva Valley, has protected it from the erosive action of the Guareña River and gave it a strategic location for territory control. Therefore, Kaite offers great potential for the presence and preservation of Pleistocene occupation remains.

### Methodology

Electrical Resistivity techniques have proven their suitability for characterizing complex karstic environments (Martínez-Moreno *et al.* 2014; Bermejo *et al.* 2013a; 2014b; Cardarelli *et al.* 2006; Zhou *et al.* 2002) even when interpreted through 2D profiles, as they can determine both horizontal and vertical electrical resistivity contrasts.

2D ER imaging renders data compiled by a combination of four aligned electrodes: two of them inject an electrical current into the ground, whereas the other two measure the electrical potential difference. When multiple electrodes are combined along a rectilinear profile, different resistivity values can be recorded at various depths.

Depending on the array geometry, different imaging resolution and penetration depths can be obtained. Wenner-Schlumberger (WS) and Dipole-Dipole (DD) are the commonly used arrays for this type of surveys. WS usually offers good depth determination but poorer spatial resolution, while DD is better at locating vertical and dipping structures but is poorer in depth resolution (Dahlin &



Zhou 2004). Due to the unpredictable nature of the karst subsurface both arrays were used in the present study.

The ER acquisition was performed using a Syscal Pro-resistivity meter (IRIS instruments). In Palomera Cave a single profile with a length of 355 m and 5 m inter-electrode spacing was laid out from Dolina Palomera to Galería Principal, reaching a gradient of more than 80 m (Figure 2). For logistical reasons, the profile was laid out close to the eastern wall of the cave, and in some occasions the electrodes had to be placed on the limestone host rock. In Kaite, three profiles were measured. Profile 1, with a length of 87.5 m and 2.5 m electrode spacing, was placed over the valley-facing entrance area (A in Figure 3). In order to gain resolution at interesting features seen at profile 1, profile 2 was arranged in the same area but with less electrode spacing (1.25 m) and was therefore shorter (66.3 m –Figure 3). Finally, profile 3, with a length of 87.5 m and 2.5 m electrode spacing, was laid out over the actual access area (C in Figure 3).

In regards with data, effects C and P were filtered using the X2ipi software (© Alexei A. Bobachev) (Ritz *et al.* 1999). Subsequently, data was processed using the Res2dinv software (version 3.59.119, Geotomo Software) to produce a two-dimensional model of the subsurface from the apparent electrical resistivity values, represented in model blocks (Loke & Barker, 1996). Inversions were performed using the Robust option; topographic adjustments were carried out based on the geomorphological maps of the endokarst system provided by the Speleological Group Edelweiss. Special attention was paid to the inversion's absolute error, which is calculated from the difference between the measured and the calculated apparent resistivity values. The logarithmic color scale was designed to display the resistivity values of the geophysical surveys with respect to local geological observations and global knowledge of the karstic system.

Following this process, 225  $\Omega$ .m was established as the maximum resistivity value attributed to the different detrital sediments of Palomera Cave. For Kaite, the limit of 350  $\Omega$ .m was chosen, as the high resistivity values of the upper layers influence the underlying layers which yielded low resistivity values. These limits are indicated in each profile by a thick black line (Figure 5).

## Results and discussion

The model proposed by the ERI profile for Palomera Cave shows a complex geology (Figure 4). In the profile's first 100 m there is a 70 m wide low resistivity anomaly at about 8 m under the subsurface (a in Figure 4), with an inclination which coincides with the slope of Palomera Sinkhole. These low resistivity values, which likely correspond to detrital sediments, cannot be attributed to any known cave passage and must therefore be linked to Palomera Sinkhole and/or to the continuation of Galerías Altas level, as they match this conduit's height (Figure 4).

In relation to it, there is a conductive anomaly around the profile's 150 m (b in Figure 4) associated to a vertical discontinuity (marked by a discontinuous line in Figure 4) that matches the cave's current entrance cliff. If this is a collapse sinkhole type, it is possible that the former anomalies represent detrital sediments related to the cave's ceiling/walls collapse, whereas the vertical discontinuity may be associated with a fracture that caused this collapse.

The first 50 m from the cave's current entrance reveal a conductive area (c in Figure 4) that reaches 15 m in depth. The resistivity values of this area are consistent with the sediments that host the archaeological site of which the upper 5 m are known from Corchón's excavation (Figure 2). Consequently, these may contain remains associated with human occupation.

Finally, the three conductive anomalies (d-f in Figure 4) found between the profile's 200-300 m could represent three filled passages with an E-W orientation, related to the fourth level of the karst (Figure 4). This level, the longest one, corresponds to Galería Principal (Figure 2) and is indeed developed E-W, which is the preferential direction of the Ojo Guareña Karst (Figure 1). Contrastingly, the

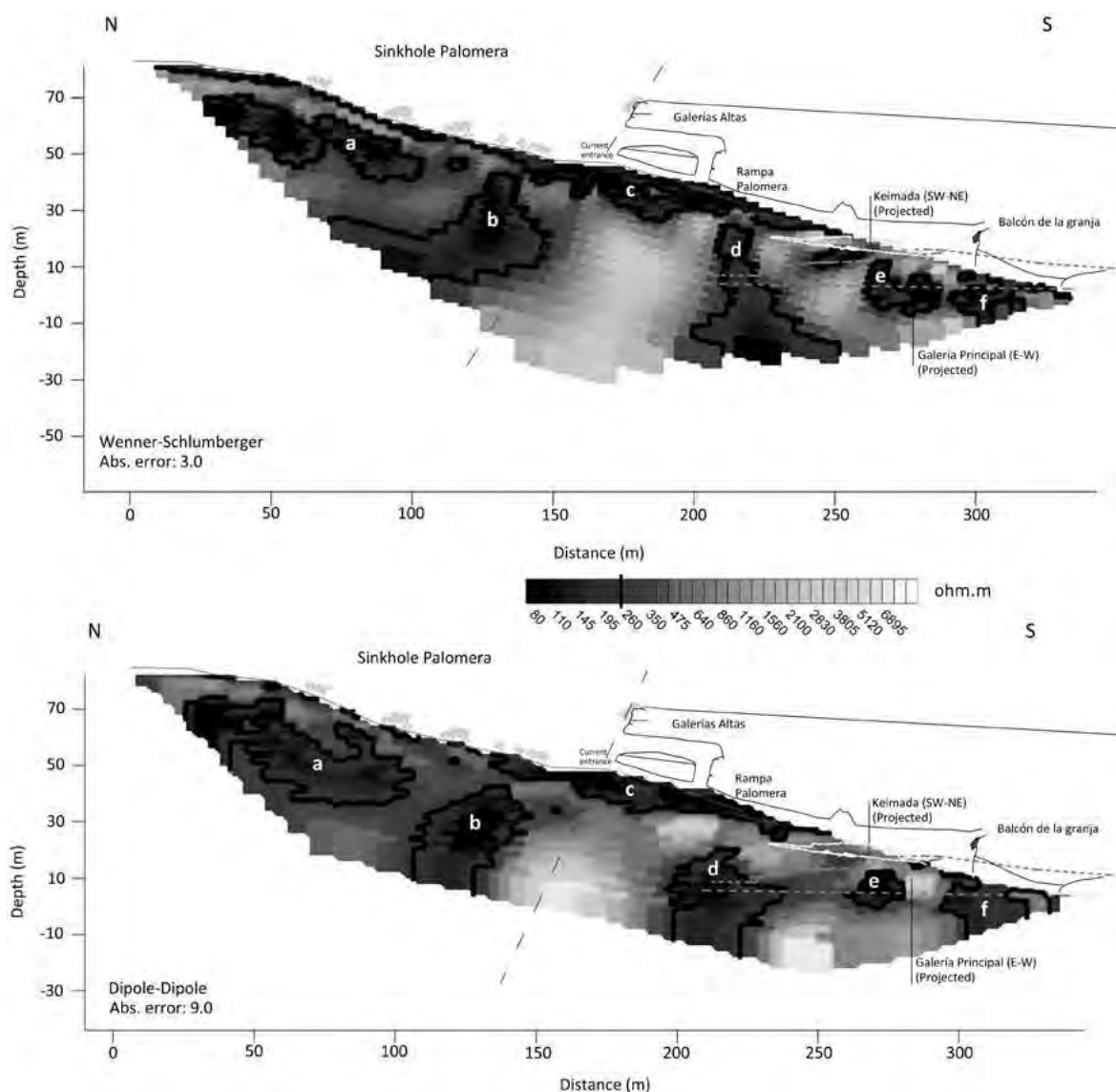


FIGURE 4. PALOMERA'S ERT PROFILE WITH BOTH WENNER-SCHLUMBERGER (WS) AND DIPOLE-DIPOLE (DD) RESULTS.

continuity of Sala Keimada is not visible in the ER survey (Figure 4). This could be due to the fact that the ER profile was placed too close to the eastern wall of the cave, or that the horizontal narrow, visible from Sala Keimada but not accessible to speleological prospection, ends near-by. The last infill (f in Figure 4), at 310 m, is the only one apparently connected with the surface and located near a connection with the Balcón de la Granja passage (Figure 4), a higher level where prehistoric hearths have been identified (Ortega & Martín 1986).

In summary, this latter infill and the one near the cave's entrance are the most accessible for archaeological excavation and may be considered in the planning of future archaeological work. Since the results of both arrays (WS and DD) are similar and their absolute error low, these data can be taken as reliable.

Kaite's profiles 1 and 2 (Figure 3) were laid out over a prehistoric habitation area, delimited by a prehistoric manmade wall (nowadays covered by a thin flowstone), corresponding to the twilight

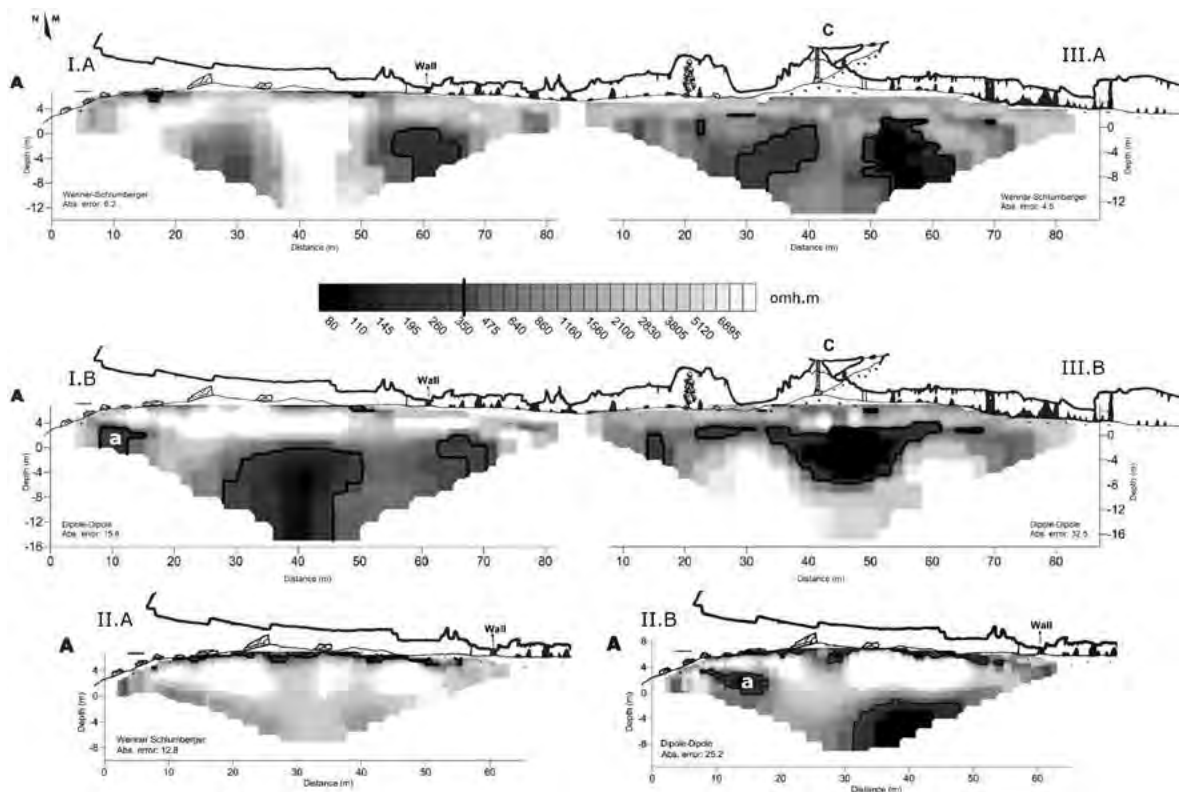


FIGURE 5. KAITE'S ERT PROFILES: I.A – WS PROFILE 1; I.B – DD PROFILE 1; II.A – WS PROFILE 3; II.B – DD PROFILE 3; III.A – WS PROFILE 2; III.B – DD PROFILE 2.

zone, where light is sufficient to permit human vision. In both profiles, the two applied arrays (WS and DD) show low resistivity values in the upper layers, which can be attributed to the sediments visible on the surface. These barely reach one meter deep and disappear laterally before reaching the prehistoric wall, which highlights their relationship to an occupation area (Figure 5 I.A, I.B, II.A and II.B).

The sediments of this upper layer sit on an irregular surface of high resistivity values that reach a depth of up to 7 m. This anomaly may be attributed to the ceiling breakdown blocks, which are visible on the surface and in roof, where the negatives of the blocks can be appreciated (Figure 6). Indeed, they disappear at the profile's 50 m, where the vault morphology changes into a phreatic type (Figure 5).

From this depth downwards it is difficult to make a proper interpretation about the subsurface nature: WS shows high resistivity values (Figure 5 I.A and II.A) whereas DD, at higher absolute error, reveals conductive anomalies consistent with the detrital sediments resistivity values (Figure 5 I.B and III.B). In any case, the conductive anomaly detected by DD at abscissa 15 m in profiles 1 and 2 (a in Figure 5 I.B and II.B) should be considered for a future excavation, as it is close to the surface and therefore easy to gain access to. Moreover, since it is located within the habitation area and below the high resistive anomaly, it is susceptible of hosting a pre-ceiling breakdown occupation. Given the fact that this is one of the oldest caves in the Ojo Guareña Karst complex, these deposits could be Pleistocene.

Profile 3 was conceived as the extension of profile 1, with the aim to cover the cave's length and gain more insight in the cave's current access collapse (Figure 5 III). The results show a very simple



FIGURE 6. DETAIL OF KAITE'S ANCIENT ENTRANCE. NOTICE THE STEPPED CEILING AND THE BIG BLOCKS ON SURFACE THAT MATCH THE VAULT'S NEGATIVES.

geological model that features high resistivity values reaching at least 4 m in depth (Figure 5 III), which can be related to the surface flowstones as well as to the actual access (C in Figure 3) ceiling collapse. In the underlying layers both WS and DD show a conductive anomaly that may indicate the presence of a previously unknown lower karstic filled conduit with N-S orientation. Another possibility is that the anomaly represents the bottom of Kaite's passage, which was filled with sediments and then covered with thick flowstones and/or blocks.

### Conclusions

ER prospecting at the Ojo Guareña Karst reveal a complex geology, as can be expected from a multilevel karstic system. In Palomera Cave, anomalies a and b may be interpreted as sediments related to the collapse of Palomera Sinkhole. The conductive anomaly a can be interpreted as the continuation of Galerías Altas passage. Moreover, the vertical discontinuity in both profiles could be linked to a fracture responsible of this collapse.

Inside Palomera Cave, different detrital infills possibly related to human occupation have been identified. The one at the cave entrance and the one related to the Balcón de la Granja passage are interesting for further work because of their accessibility and relationship with other known archaeological sites. In both cases, further geophysical work (including complementary methods such as GPR), together with excavations or archaeological test pits are necessary for a better understanding of the karstic formation processes.

In Kaite the presence of a pre-ceiling breakdown occupation in the valley-facing entrance area is still up in the air, as the different arrays (WS and DD) offer contradictory results. However, the



results show more than 7 m of breakdown potential, which otherwise is witnessed in the geometry of the vault's negatives. Furthermore, the existence of detrital sediments filling an unknown lower karstic level or deposited at the bottom of the conduit, offers new possibilities for the interpretation of this singular cave. Additional geophysical prospection could be helpful in order to plan a future excavation and to elaborate a proper speleogenesis reconstruction of one of the highest and oldest caves of the Ojo Guareña Karst.

The different results obtained in both caves, especially with regards to the cave morphologies, illustrate the potential of ER imaging for archaeological site detection in karstic environments.

### Acknowledgments

The corresponding author is beneficiary of a Fundación Atapuerca Pre-doctoral Grant. A.I.O. has been supported by a postdoctoral grant from Juan de la Cierva Subprogram (JCI-2010-06792) and a 2014 Mineco CGL2009-1273-C03-01 contract. This study was partly funded by the financial aid "Jóvenes Excelentes 2013" from the Gutierrez Manrique Foundation, managed by the Caja de Burgos Foundation, awarded to the corresponding author. The authors wish to thank Grupo Espeleológico Edelweiss for its constant scientific and logistic support and Laura González Navarro who participated in the field survey. This work has benefited from discussions with Isidoro Campaña Lozano. Authors thank the anonymous reviewer for their comments which helped improve the manuscript.

### References

- BENECH, C.; HESSE, A. 2007. Some considerations on the integration of geophysical data into archaeological research. In *Geophysik und Ausgrabung. Einsatz und Auswertung zerstörungsfreier Prospektion in der Archäologie*, Internationale Archäologie Naturwissenschaft und Technologie. p. 175-186.
- BERMEJO, L.; CANALS, A.; GONZÁLEZ, J. M.; FERNÁNDEZ, F.; CAMPAÑA, I.; CARBONELL, E. 2013b. Aplicación de técnicas de prospección geofísica al estudio de la Cueva de Santa Ana (Cáceres, España). *Actas del X Congreso Ibérico de Arqueometría*. p. 451-452.
- BERMEJO, L.; GUÉRIN, R.; CANALS, A. 2010. Subsoil Characterization by Electrical Resistivity Tomography around Rosières-la-Terre-des-Sablons site (Lunery, Region Centre, France). *Annali dell'Università di Ferrara Museologia Scientifica e Naturalistica*, 6.
- BERMEJO, L.; ORTEGA, A. I.; ARACIL, E.; GUÉRIN, R.; PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; BENITO-CALVO, A.; HUGUET, R.; MARURI, U.; PÉREZ, R.; VALLVERDÚ, J.; CAMPAÑA, I.; PORRES, J. A.; BERMÚDEZ DE CASTRO, J. M.; CARBONELL, E. 2013a. Aplicación de ERT (Electrical Resistivity Tomography) para la identificación de la morfología sub-superficial del yacimiento de Elefante, Sierra de Atapuerca (Burgos, España). *Actas del X Congreso Ibérico de Arqueometría*. p. 352-363.
- BERMEJO, L.; ORTEGA, A. I.; GUÉRIN, R.; PARÉS, J. M.; BENITO-CALVO, A.; MARTÍN, M. A.; ARACIL, E.; MARURI, U.; PORRES, J. A. 2014a. Electrical Resistivity Tomography (ERT) for identifying Torcas area passages connecting Gran Dolina, Galería Complex and Sima del Elefante sites (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). In *XVII Congreso Mundial de la UISPP*. Burgos: p. 39-40. Libro de resúmenes.
- BERMEJO, L.; ORTEGA, A. I.; GUÉRIN, R.; PARÉS, J. M.; BENITO-CALVO, A.; MARTÍN, M. A.; ARACIL, E.; MARURI, U.; PORRES, J. A. 2014b. Técnicas de prospección geofísica aplicadas a yacimientos kársticos: Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) en el Karst de Ojo Guareña (Ojo Guareña, Merindad de Sotocueva, Burgos). In *Cubía 18*. Grupo Espeleológico Edelweiss. Diputación de Burgos. p. 48-55.
- CARDARELLI, E.; DI FILIPPO, G. 2009. Integrated geophysical methods for the characterisation of an archaeological site (Massenzio Basilica – Roman forum, Rome, Italy). *Journal of Applied Geophysics*. 68, p. 508-521.
- CARDARELLI, E.; DI FILIPPO, G.; TUCCINARDI, E. 2006. Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study. *Near Surface Geophysics*. 4, 387-392.

- CHALIKAKIS, K.; PLAGNES, V.; GUÉRIN, R.; VALOIS, R.; BOSCH, F. 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*. 19, p. 1169-1180.
- CONYERS, L. 2012. *Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology*. Left Coast Press, Walnut Creek, California.
- DAHLIN, T.; ZHOU, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*. 52, p. 379-398.
- GRUPO ESPELEOLÓGICO EDELWEISS (Ed.) – 1986. *Monografía sobre Ojo Guareña*.
- GUÉRIN, R.; BALTASSAT, J. M.; BOUCHER, M.; CHALIKAKIS, K.; GALIBERT, P. Y.; GIRARD, J. F.; PLAGNES, V.; VALOIS, R. 2009. Geophysical characterisation of karstic networks? Application to the Ouyse system (Poumeyssen, France). *Comptes Rendus Geoscience*. 341, p. 810-817.
- HESSE, A. 1999. Multi-parametric survey for archaeology: how and why, or how and why not? *Journal of Applied Geophysics*. 41, p. 157-168.
- LOKE, M. H.; BARKER, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*. 44, p. 131-152.
- LOWE, K. M. 2012. Review of geophysical applications in Australian archaeology. *Australian Archaeology*. 74, p. 71-84.
- MARTÍNEZ-MORENO, F. J.; GALINDO-ZALDÍVAR, J.; PEDRERA, A.; TEIXIDO, T.; RUANO, P.; PEÑA, J. A.; GONZÁLEZ-CASTILLO, L.; RUIZ-CONSTÁN, A.; LÓPEZ-CHICANO, M.; MARTÍN-ROSALES, W. 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*. 107, p. 149-162.
- ORTEGA, A. I.; BENITO-CALVO, A.; PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; PORRES, A.; MARTÍN, M. A. 2010. Applying electrical resistivity tomography to the identification of endokarstic geometries in the Pleistocene sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection*. 17, p. 233-245.
- ORTEGA, A. I.; MARTÍN, M. A. 1986. La Arqueología del Karst de Ojo Guareña. In *Grupo Espeleológico Edelweiss (Ed.). Monografía sobre Ojo Guareña*. Kaite. 4-5, p. 331-389.
- ORTEGA, A. I.; MARTÍN, M. A. 2011. El Karst de Ojo Guareña. *Merindad de Sotoscueva, Burgos*. In *Cubía* 15. p. 20-39.
- ORTEGA, A. L.; MARTÍN M. A.; GRUPO ESPELEOLÓGICO EDELWEISS 2013. *Cuevas de Ojo Guareña. Una visión de la mano del Grupo Espeleológico Edelweiss*. Diputación Provincial de Burgos.
- PIRO, S.; TSOURLOS, P.; TSOKAS, G. N. 2001. Cavity detection employing advanced geophysical techniques: a case study. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 6, p. 3-31.
- PORRES, J. A.; ORTÍZ, S.; IBÁÑEZ, S. J. 2013. Subsoil caves characterization by means of the interpretation of electrical resistivity tomography: Application to Clunia and Atapuerca archaeological sites. 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4. 2, p 1435-1440.
- RITZ, M.; ROBAIN, H.; PERVAGO, E.; ALBOUY, Y.; CAMERLYNCK, C.; DESCLOITRES, M.; MARIKO, A. 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*, 47, p. 85-101.
- URIBARRI, J. L.; LIZ, C. 1973. El arte rupestre en Ojo Guareña. La Cueva de Kaite. *Trabajos de Prehistoria*, 30, p. 69-108.
- VALOIS, R., BERMEJO, L.; GUÉRIN, R.; HINGUANT, S.; PIGAUD, R.; RODET, J. 2010. Karstic Morphologies identified with Geophysics around Saulges Caves (Mayenne, France). *Archaeological Prospection*. 17, p. 151-160.
- WYNN, J. C. 1986. A Review of Geophysical Methods Used in Archaeology. *Geoarchaeology: An International Journal*, 1(3): 245-257. In *Selected Papers on the Application of Geophysical Instruments for Archaeology (1986)*. Geonics limited, Ontario.
- ZHOU, W.; BECK, B. F.; ADAMS, A. L. 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*. 42, p. 922-928.

a 

actas  
**x** Congreso Ibérico de  
arqueometría







# x Congreso Ibérico de arqueometría



CULTURA ARTS  
IVC+RI



VNIVERSITAT  
ID VALÈNCIA

I(CM)UV

SAPaC

MUSEU  
de Belles Arts de Castelló

## X Congreso Ibérico de Arqueometría

### Comité Científico

Marian del Egido Rodríguez. Instituto del Patrimonio Cultural de España, Madrid, España  
Josefina Pérez Arantegui. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España  
Yolanda Carrión Marco. Universidad de Valencia, Valencia, España  
Blanca María Gómez Tubio. Universidad de Sevilla, Sevilla, España  
Maria Isabel Garrido Prudencio. Instituto Tecnológico e Nuclear, Lisboa, Portugal  
Mario Vendrell Saz. Universidad de Barcelona, Barcelona, España  
Kepa Castro Ortiz de Pinedo, Universidad del País Vasco, Leioa, España  
Eduarda Vieira. Centro de Investigação em Ciência e Tecnologias das Artes, Porto, Portugal  
Salvador Rovira Llorens, Arqueólogo

### Comité Organizador

#### Coordinación

Carmen Pérez García, Subdirectora de Conservación, Restauración e Investigación IVC+R CulturArts Generalitat  
Clodoaldo Roldán. Instituto de Ciencia de Materiales, Universitat de València  
David Juanes Barber, IVC+R CulturArts Generalitat  
Rafael Martínez Valle, IVC+R CulturArts Generalitat  
Sonia Murcia Mascarós, Fundación Universidad de Valencia  
M<sup>a</sup> Isabel Marques Dias, Instituto Tecnológico e Nuclear, Lisboa

#### Secretaría Técnica

Jose Ignacio Catalán. IVC+R CulturArts Generalitat  
Juan Carlos Martínez. IVC+R CulturArts Generalitat  
Elena Gandía Gijarro. IVC+R CulturArts Generalitat  
Manel Alagarda Carratalà. Comunicación y museografía didáctica aplicada a la conservación del patrimonio cultural

Depósito Legal: V 328-2014

© de la presente edición:

Subdirección de Conservación, Restauración e Investigación IVC+R de CulturArts Generalitat

© de los textos:

A sus autores.

© de las fotografías y gráficos:

A sus autores

Coordinación de la publicación:

David Juanes Barber  
Clodoaldo Roldán García

Edición:

Subdirección de Conservación, Restauración e Investigación IVC+R de CulturArts Generalitat

Diseño:

Manel Alagarda Carratalá

Maquetación:

Manel Alagarda Carratalá  
Sarah Estefanía De Sousa Perregil

Esta obra está sujeta a una licencia Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 de Creative Commons. Se permite la reproducción, distribución y comunicación pública siempre y cuando se cite el titular de los derechos (Subdirección de Conservación, Restauración e Investigación IVC+R de CulturArts Generalitat) y no se haga un uso comercial. Si se transforma esta obra para generar una nueva obra derivada, deberá distribuirse con una licencia igual a la que regula la obra original. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/es/legalcode.es>



Todos los derechos de propiedad intelectual de imágenes ajenas al trabajo integradas en esta presentación que proceden de museos y centros culturales, corresponden a las respectivas instituciones. El uso de estas se realiza al amparo del art. 32 del REAL DECRETO LEGISLATIVO 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, según el cual es lícita la inclusión de fragmentos de obras ajenas siempre que se realice a título de cita o para su análisis, comentario o juicio crítico. Tal utilización podrá realizarse con fines docentes, como es este caso.



# Índice



### Sesión: Análisis de Materiales: Cerámica y Vidrio

B. Carrascosa, O. Medina, A. Sanz: La conservación y restauración de los calendarios cerámicos pertenecientes a la cultura Quitu-Cara, Ecuador.	16
D. Guirao, F. Plá, A. Acosta: Estudio arqueométrico de las cerámicas Mayólicas de Talavera de la Reina y Puente del Arzobispo.	28
T. Palomar, M. García-Heras, M.A. Villegas: La Arqueometría en el estudio de un conjunto de vidrios del siglo XIX hallado en el Pecio de Navidad (Cartagena, Murcia)	38
L. R. Velázquez, A. Mendoza, A. Rodríguez: Estudio de proveniencia de la cerámica México Rojo encontrada en el convento de Santa Teresa de Jesús en la Habana Vieja.	48
L. Rosado, A.Candeias, C. Lopes, T. Ferreira, J. Mirão: Uma aproximação multidisciplinar à composição em fases de cerâmicas em função da matéria-prima e da temperatura de cozimento.	50
M. A. Valero: Estudio arqueométrico de las muestras procedentes del mosaico de la Villa Romana de Noheda (Cuenca): primeros resultados.	52
N Inácio, F. Nocete, J. M. Nieto, R. Sáez, M. R. Bayona, A. Páramo: Producción y distribución de cerámica del III Milenio A.N.E. en Valencina de la Concepción (Sevilla, España).	66
J.M. Compañá, D. Hernández, L. León, A. Cabeza, M.A. García: Estudio arqueométrico de materiales anfóricos tardorromanos procedentes de Málaga (España).	83
M. I. Dias, M.J. Trindade, M. I. Prudêncio, R. Marques, P. Flor: Esculturas Della Robbia em Portugal: análise da composição das pastas.	95
M. I. Dias, M. I. Prudêncio: O Campaniforme na Beira-Alta e Alentejo (Portugal): contextos, proveniência e circulação.	96

### Sesión: Conservación y Restauración

J. M. Pereira: De la escala IFRAO al ICC: el color como atributo de preservación en la documentación de arte rupestre.	98
M. Medina, H. M. De Rosa: Análisis del grado de contaminación por iones cloruros en clavos de hierro del Pecio Zencity.	100
P. Merello, F.-J. García, A. Fernández, M.C. Pérez, J. Pérez-Miralles, M. Zarzo: Actuaciones y monitorización microclimática para la conservación preventiva de pinturas murales en la casa Ariadna de Pompeya (Italia).	102

### Sesión: Análisis de Materiales: Pigmentos

R.Romero, A. Illán: Tradición y evolución técnica en la pintura renacentista valenciana. De Francisco de Osona a Juan de Juanes: Nuevos datos a partir de recientes procesos analíticos.	111
A.C. Coba, A. García, O. López, V.J. Medina: Estudio comparativo de pigmentos en el Real Alcázar de Sevilla: Alfarje del patio de las doncellas y alero de la fachada de Pedro I.	127
J. Pérez-Arantegui, E. Ribechini, M.P. Colombini y F. Escudero: "Preparados" complejos en la Zaragoza islámica: caracterización del contenido de pequeños recipientes arqueológicos.	136
A. Sánchez, J. A. Tuñón, M. Montejo, D. Parras, F. Márquez: Microscopía Raman para la Arqueología de los Iberos.	137

M. J. Nuevo, A. Martín, T. González: Caracterización de los materiales utilizados en libros antiguos mediante fluorescencia de rayos-X (XRF) y Anatomía Comparada.	156
A. Calero, A. Hernández, F. J. Collado, A. García: Reproducción virtual y elaboración de paletas de colores virtuales a partir de la caracterización cromática mediante espectrofotómetro de policromías reales.	164
C. Roldán, V. Villaverde, I. Ródenas, E. López, I. Domingo, S. Murcia, R. Martínez, P. Guillem: Análisis de pigmentos parietales de Arte Levantino de los abrigo del "Cingle de la Mola Remigia" (Barranco de la Gasulla, Castellón).	181
H. Gomes, P. Rosina, P. Holakooei, T. Solomon, C. Vaccaro: Identificação por espectroscopia Raman de cera de abelha utilizada como pigmento branco em pinturas rupestres na Etiópia.	193
L. Ventolà, J. Perez, G. Cepria, M. Vendrell-Saz: Análisis y caracterización de Gemas y pigmentos utilizados en cosmeticos arqueológicos, en el Mediterráneo occidental, en época romana (II AC a II AD).	194
<b>Sesión: Material Lítico y Patrimonio Construido</b>	
Undurraga, J.F. Conde, F. Agua, G. Barluenga, M.A. Villegas y M. García-Heras: El hospital de Antezana (Alcalá de Henares, Madrid): estudio arqueométrico y análisis arquitectónico de ladrillos y morteros.	197
I. Díaz Ramos: Adyuvantes orgánicos empleados en la realización de revocos térreos. Estudio, clasificación y propiedades.	210
I. Garófano, M.D. Robador, A. Durán: Estudio material y microestructural de revestimientos arqueológicos romanos e islámicos del Patio de Banderas del Real Alcázar de Sevilla.	211
C. P. Odriozola, R. Boaventura, R. Villalobos, A. Catarina, R. Mataloto: Las producciones de adorno personal en piedra verde del SW peninsular: nuevos datos y perspectivas.	224
L. Ventolà Mallart; P. Giráldez; M. Vendrell-Saz: Aporte del análisis de materiales a la cronología del claustro de Mas del Vent (Palamós).	225
J. Beltrán, E. Ontiveros, M. L. Loza, O. Rodríguez, R. Taylor: El uso del mármol en la ciudad romana de Baelo Claudia (Bolonía, Tarifa, Cádiz). Una aproximación desde la arqueometría.	226
<b>Sesiones: Análisis de Materiales: Metales.</b>	
F. Caretti, E. Montanari, H. de Rosa, C. Landa: Caracterización de una pieza de hojalata proveniente del sitio arqueológico Posta El Caldén, finales del siglo XIX (La Pampa, Argentina).	241
I. Montero-Ruiz, G. Aguilera, C. Rovira-Ortolá: Plomo metálico en yacimientos de la I Edad del Hierro en la Provincia de Castellón: Explotación de recursos mineros y circulación del metal.	252
M. Veneranda, J. Aramendia, S. Fdez-Ortiz de Vallejuelo, L. García, M. Neira, K. Castro, I. García, A. Azkarate, J.M. Madariaga: Caracterización no destructiva de piezas arqueológicas metalúrgicas del siglo XIII (Excavación del castillo de Ereñozar) mediante fluorescencia de Rayos-X.	266
N. Ciarlo, M. Rañi, H. de Rosa, M. C. Luchetta, P. Marino, N. Rodríguez, J. Martí: Estudio comparado de dos navios franceses de la Batalla de Trafalgar: los elementos de fijación estructurales del Fougueux (1785-1805) y Bucentaure (1804-1805).	268
C. Gutiérrez, M. Gener, M. C. González, I. Montero-Ruiz, J. Onrubia, J. I. Sáenz: Objetos metálicos de base cobre del yacimiento de Cueva Pintada (Gáldar, Gran Canaria)	281

P. C. Gutiérrez-Neira, A. I. Pardo, M<sup>a</sup> C. Medina, A. Climent-Font, J. Barrio: Análisis arqueométrico y restauración de un conjunto de hebillas del yacimiento "Ermita Vieja de la Torre". 292

V. Santos Vasquez, L. Huidobro Salas: Análisis y estudios de dorados en retablos de la Mixteca Alta. Estudio preliminar en obras del s. XVIII en las comunidades Yolomecatl, Cuquilla y Tataltepec. 303

C. Bashore, A. Moreno, F. Contreras: La metalurgia argárica: nuevas aportaciones. Los yacimientos de Castellón Alto (Galera) y La Terrera del Reloj (Dehesas de Guadix). 304

B. Gómez-Tubío, A. I. Moreno-Suarez, M. Á. Respaldiza, F. Chaves, R. Pliego, I. Ortega-Feliu, F. J. Ager, S. Scrivano: Análisis de monedas del siglo III a.C. en la Península Ibérica mediante un equipo portátil de fluorescencia de rayos X. 322

#### Sesión: Biomateriales y Estudios Paleoambientales

P. M. Guillem Calatayud, R. Martínez Valle, M.P. Iborra Eres: El arte rupestre esquemático y la búsqueda del género. 325

A. Manhita, L. Rocha, A. Alegría, J. Mirão, C. Barrocas-Dias: Análise material das contas de âmbar da Anta do Zambujeiro. 339

A. Garcia, I. Gutiérrez, S. Moncayo, J. Martín, F. J. Manuel de Villena, J. O. Cáceres, M. R. González: Implicaciones de los isótopos estables de oxígeno y de la relación elemental Mg/Ca en la determinación de la estación de captura de los recursos malacológicos durante el Mesolítico Cantábrico. 341

M. E. Pérez: Aplicación de técnicas arqueométricas en el estudio faunístico de la Solana del Castell (Xàtiva, Valencia). 350

#### Sesión: Datación. Prospección Geofísica. Teledetección

L. Bermejo, A. I. Ortega, E. Aracil, A. Pérez, A. Benito, R. Huguet, U. Maruri, R. Pérez, J. Vallverdú, I. Campaña, J. A. Porres, J. M. Bermúdez de Castro, E. Carbonell: Aplicación de ERT (Electrical Resistivity Tomography) para la identificación de la morfología sub-superficial del yacimiento de Elefante - Sierra de Atapuerca (Burgos, España). 352

E. García, C. Padrós, A. Pujol, R. Sala, R. Tamba: La prospección geofísica como herramienta para el planteamiento de la investigación de un yacimiento. El caso de Puig Ciutat (Oristà, Lluçanés, Barcelona). 364

#### SESIONES DE PÓSTERS

##### Análisis de materiales: Cerámica y Vidrio.

M. R. de Soto, M. D. Petit-Domínguez, I. S. de Soto, R. García, I. Rucandio: Caracterización de Opus tessellatum procedentes de Ávila, España. 367

M. R. de Soto, I. S. de Soto, R. García: Análisis arqueométrico de cerámica común y cerámica común de cocina de yacimientos romanos en el valle del río Almar (Ávila). 369

R. Taylor: El papel de la petrografía cerámica en la investigación arqueométrica. Un ejemplo desde la tecnología alfarera prehistórica del suroeste de la península ibérica. 371

M. Genera, E. Manzano, J.L. Vilchez, M. R. Blanc, A. López, L. J. Dias, G. Fernandes: Técnicas analíticas aplicadas a la investigación de cerámicas del asentamiento de Sant Miquel de Vinebre (La Ribera d'Ebre). 372

L. Rosado, A. Manhita, D. Tavares, R. Alfenim, J. Mirão, C. Barrocas-Dias: Análise de resíduos orgânicos em cerâmicas do Depósito Votivo de Garvão, 2<sup>a</sup> Idade do Ferro. 382

J. G. Iñáñez, R. Cooke, J. Martín, L. Breece, M. D. Glascock, R. J. Speakman, J. Buxeda: Pueblo de Indios y la colonización de Panamá: Cerámica criolla de Natá de los Caballeros (s. XVI). 384

C. P. Odriozola, P. Bueno, R. Barroso, R. Boaventura, A. C. Sousa, R. Villalobos E. Guerra, R. C. Auñón, R. Mataloto, L. Barros, A. Vázquez, V. Hurtado, G. Delibes: Los rellenos de pasta blanca en cerámicas campaniformes: nuevos datos. 385

#### Análisis de materiales: Pigmentos.

A.I. Calero Castillo, A. García Bueno, O. López Cruz, V.J. Medina Flórez.: Las Yeserías del Real Alcázar de Sevilla: Estudio comparativo de la fachada de Pedro I y el Patio de las Doncellas. Materiales y cronología. 386

A. Iturregui Torre, N. Arrieta Irazabal, K. Castro Ortiz de Pinedo, I. Martínez-Arkarazo, J. Cárcamo Martínez, J.M. Madariaga Mota: Arqueología Industrial: caracterización de pigmentos de comienzos del siglo XX en la Bombeadora de Elorrieta (Bilbao, País Vasco). 388

A. Kriznar, M. V. Muñoz, M. Á. Respaldiza, M. Vega: Análisis no-invasivo de La Purificación de Luis de Vargas con fluorescencia de rayos X portátil. 390

C. Roldán García, A. Calderón Rodríguez: Análisis mediante EDXRF de las tintas y pigmentos de los Códices 55 y 146 de la Catedral de Valencia (s. XIV-XV). 392

#### Análisis de materiales: Metales.

P. C. Gutiérrez-Neira, O. García-Vuelta y A. Perea: El Archivo Au: acceso público y puesta en valor. 403

L. Perelló Mateo, B. Lull Estarellas: Una aproximación a la tecnología metalúrgica postalayótica a través del estudio de los tintinabula. 404

Nicolás C. Ciarlo, Marina Rañi, Horacio M. De Rosa, Gisela Maxia, Rut Geli Mauri y Gustau Vivar Lombarte: Observaciones sobre un caso de producción artesanal en serie: análisis metalúrgico de las tachas de revestimiento de forro halladas en el sitio Deltebre (1813). 425

S. Carpintero Lozano: Estudio preliminar de la Metalurgia del Plomo y la Plata en la Ciudad Fenicia de Baria. 426

Horacio De Rosa, Mariano Ramos, Ariel Lopez, Verónica Helfer, Matilde Lanza, Alejandra Raies, Marina Rañi: Análisis de artefactos de metal provenientes del sitio ARQUEOLÓGICO Vuelta de Obligado, Provincia de Buenos Aires, Argentina. 428

M.P. Iborra Eres, F. M. Valle Algarra, M. A. Ferrer Eres, J. V. Gimeno Adelantado; R. Martínez Valle: Determinación del uso de bocado metálico en los caballos de la edad del hierro del territorio valenciano mediante la utilización de microscopía electrónica de barrido en modo medioambiental. 429

#### Material Lítico y Patrimonio Construido.

F. L. Torres, L. Pérez, J. M. Tomassetti, C. León: Aproximación geoarqueológica, aprovisionamiento, selección y explotación de los recursos líticos por parte de las sociedades del paleolítico y primeras productoras de alimentos en Manilva (Málaga). 436

F. L. Torres, V. Castañeda, L. Pérez, Y. Costela: Las materias primas y sus posibles áreas de captación en el extremo sur de la Península Ibérica (Campo de Gibraltar, España) por parte de las sociedades del paleolítico y las primeras productoras de alimentos. 437

F. L. Torres, V. Castañeda, I. García, Y. Costela: Materias primas y áreas de captación de los distintos ortostatos de la Estructura 1-2. de la necrópolis prehistórica de Los Algarbes (Tarifa, Cádiz). 439

I. Cardoso, P. Moita, J. Santos, S. Ribeiro, A. Candeias, A. Santos Silva, J. Mirão: <i>Isótopos de estrôncio no estudo da proveniência do ligante em argamassas: crónica de um insucesso.</i>	441
C. P. Odriozola, J.L. Cardoso, R. Boaventura, R. Villalobos-García, A. Catarina Sousa: <i>Producción y circulación de rocas verdes y sus productos en el SW peninsular: el caso de Leceia.</i>	443
<b>Conservación y Restauración.</b>	
A. Justo-Estebarez, O. Laguna, G. Grenzing, L. K. Herrera, B. Sigüenza, M.C. Jiménez de Haro, y A. Justo: <i>Estudio interdisciplinar de la restauración del Órgano de la Iglesia Prioral de Sant Jaume, Vila-Real (Castellón).</i>	444
F. Elhaddad, M. J. Mosquera: <i>Aplicación de nuevos nanomateriales consolidantes en la necrópolis prehistórica de Los Algarbes (Tarifa, Cádiz).</i>	446
C. Linda de França, K. de Melo Barboza: <i>Os efeitos da radiação ionizante aplicada no tratamento de objetos museológicos em plástico: Um estudo comparativo entre os benefícios e riscos.</i>	448
K. Melo Barboza, C. Linda de França: <i>Medição de traços radioativos dos poluentes e a interação destes com monumentos expostos em ambientes ao ar livre.</i>	450
<b>Datación. Prospección Geofísica. Teledetección.</b>	
L. Bermejo, A. Canals, J.M. González, F. Fernández, I. Campaña, E. Carbonell: <i>Aplicación de técnicas de prospección geofísica al estudio de la Cueva de Santa Ana (Cáceres, España).</i>	451eI



# Introducción

Los Congresos Ibéricos de Arqueometría, inicialmente denominados Congresos Nacionales de Arqueometría, son desde sus orígenes, un foro de discusión y encuentro para los grupos de investigación nacionales dedicados a la caracterización de materiales del patrimonio cultural mediante diferentes técnicas analíticas propias de áreas como la física y química. Estos congresos son un ejemplo en el que se unen el carácter científico y tecnológico con el humanístico, arqueológico y artístico.

Bajo el auspicio de la Sociedad de Arqueometría Aplicada al Patrimonio Cultural (SAPaC), estos congresos han conseguido reunir a los más destacados representantes de los centros de investigación y estudio de España y Portugal relacionados con la Arqueometría, al tiempo que han supuesto un punto de inflexión en cuanto a la valoración académica y social de las investigaciones y proyectos de I+D que se han desarrollado y se siguen desarrollando en este campo. Así mismo, hay que destacar el aspecto formativo de los mismos, puesto de manifiesto por la significativa participación de estudiantes que desarrollan sus estudios de grado o postgrado en el marco de estudio e investigación que ofrece la Arqueometría. Así pues, tras las nueve ediciones anteriores, estas jornadas se han consolidado como un referente de la Península Ibérica donde profesionales del ámbito de las ciencias y las humanidades dedicados al estudio y conservación del patrimonio histórico, se encuentran, discuten y avanzan en la conservación del patrimonio cultural.

El congreso celebrado los días 16, 17 18 de octubre de 2013 en el Museo de Bellas Artes de Castellón, ha continuado así, con esta décima edición, la serie de congresos que, desde 1995 y con una periodicidad de dos años, reúne a profesionales de las áreas de física, química, ingeniería, arqueología, historia, restauración, conservación y áreas afines, y a todos los interesados en la teoría, desarrollo y metodología experimental aplicada al estudio, caracterización y conservación de materiales del patrimonio cultural. En esta décima edición, la conservación y restauración de bienes culturales, ha habido un mayor protagonismo con una importante contribución del IVC+R de CulturArts Generalitat, no solo como organizador, sino como importante actor en las líneas de discusión del congreso, y del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), ambas entidades con un reconocido prestigio nacional e internacional.

En las sesiones técnicas del X Congreso Ibérico de Arqueometría se presentaron las ponencias en las que se abordaron los avances logrados en estos dos últimos años en las áreas temáticas: cerámica y vidrio, metales, pigmentos, biomateriales, restauración, conservación, material lítico, patrimonio construido, datación, teledetección y otras áreas relacionadas con la temática del Congreso.

Queremos felicitar a todos los que durante esos días se han dado cita en el X Congreso Ibérico de Arqueometría por su interés y su dedicación al estudio de patrimonio cultural.

Por último, deseamos agradecer a la SAPaC la confianza depositada en el Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales IVC+R de CulturArts Generalitat al delegarle la organización del X Congreso Ibérico de Arqueometría.

Carmen Pérez García

Subdirectora de la Unidad de Conservación, Restauración e Investigación, IVC+R

CulturArts Generalitat

## Aplicación de ERT (Electrical Resistivity Tomography) para la identificación de la morfología sub-superficial del yacimiento de Elefante - Sierra de Atapuerca (Burgos, España)

Lucía Bermejo Albarrán <sup>(a),(c)</sup>, Ana Isabel Ortega Martínez <sup>(b)</sup>, Enrique Aracil Ávila <sup>(d),(e)</sup>, Roger Guérin <sup>(f)</sup>, Alfredo Pérez González <sup>(b)</sup>, Alfonso Benito-Calvo <sup>(b)</sup>, Rosa Huguet Pàmies <sup>(f),(g)</sup>, Unai Maruri Brouard <sup>(e)</sup>, Raquel Pérez Martínez <sup>(h)</sup>, Josep Vallverdú Poch <sup>(f),(g)</sup>, Isidoro Campaña Lozano <sup>(b)</sup>, Jose Ángel Porres Benito <sup>(d)</sup>, Jose María Bermúdez de Castro Risueño <sup>(b)</sup> y Eudald Carbonell Roura <sup>(f),(g)</sup>

<sup>(a)</sup> Departamento de Ciencias Históricas y Geografía, Universidad de Burgos, C/ Villadiego, s/n 09001 Burgos, España

<sup>(b)</sup> Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH). Paseo Sierra de Atapuerca, 09002 Burgos, España.

<sup>(c)</sup> Equipo Primeros Pobladores de Extremadura, Casa de la Cultura Rodríguez Moñino, Avda. Cervantes s/n., 10003 Cáceres, España

<sup>(d)</sup> Área de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e I.C.T. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos, 09001 Burgos, España.

<sup>(e)</sup> Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. c/ Luxemburgo, 4; portal 1, oficina 3; 28224-Pozuelo de Alarcón, Madrid, España

<sup>(f)</sup> IPHES, Institut Català de Paleoeología Humana i Evolució Social. C/ Marcellí Domingo s/n e Campus Sescelades URV (Edifici W3). 43007 Tarragona. España

<sup>(g)</sup> Universitat Rovira i Virgili (URV), Campus Catalunya, Avinguda de Catalunya 35, 43002 Tarragona, España

<sup>(h)</sup> TAUP, Joaquim Viola 12, 25700 Seu d'Urgel (Lleida), España

<sup>(i)</sup> Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, 75252 Paris cedex 05, Francia  
lucia.bermejo@eb.cenieh.es

**PALABRAS CLAVE:** Geofísica, Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), Karst, Pleistoceno, Sima del Elefante, Sierra de Atapuerca

### RESUMEN:

Los resultados aportados por las prospecciones geofísicas de ERT llevadas a cabo en los yacimientos de la Sierra de Atapuerca (Ortega *et al.*, 2010), así como en otros complejos kársticos con yacimientos paleolíticos (Valois *et al.*, 2010; Bermejo *et al.*, 2010), han puesto de manifiesto la relevancia de este tipo de estudios tanto para el mejor entendimiento de la geometría y los procesos de formación del yacimiento, como para las estrategias de planificación de los trabajos de excavación.

El yacimiento de la Sima del Elefante de la Trinchera del ferrocarril representa la evidencia humana más antigua de la Sierra de Atapuerca y una de las más antiguas de Europa (Carbonell *et al.*, 2008). Presenta una secuencia estratigráfica dividida en tres grandes unidades litoestratigráficas, con importantes procesos de subsidencia y deformación que afectan principalmente a la Unidad Roja Inferior (TE7-14). Precisamente la compleja e interesante secuencia de esta unidad fue la que motivó la realización de nuevos perfiles geofísicos en 2007, cuyos resultados mostraron la continuidad de los sedimentos de Elefante en el subsuelo de trinchera. Estos datos, junto con los excelentes hallazgos procedentes de la excavación, determinaron la ampliación del área de excavación, cuya intervención arqueológica ha permitido contrastar los valores de resistividad obtenidos por la ERT con la secuencia arqueológica descubierta, así como disponer de un test de control validado para los yacimientos de la Sierra de Atapuerca, comenzado por Ortega *et al.* (2010) en los sondeos de ERT de 2003.

KEYWORDS: Geophysics, Electrical Resistivity Tomography (ERT), Karst, Pleistocene, Sima del Elefante, Sierra de Atapuerca

ABSTRACT:

The results provided by ERT geophysical surveys carried out in Sierra de Atapuerca sites (Ortega *et al.*, 2010) as well as other karst complexes with Paleolithic sites (Valois *et al.*, 2010; Bermejo *et al.*, 2010), have highlighted the importance of such studies for both better understanding of site formation processes and for planning excavation strategies.

Trench railroad Sima del Elefante site represents the oldest human evidence of Sierra de Atapuerca sites and one of the oldest in Europe (Carbonell *et al.*, 2008). It has a stratigraphic sequence divided into three lithostratigraphic units with significant subsidence processes and deformation, mainly affecting the Lower Red Unit (TE7 -14). This complex and interesting sequence was the one that motivated the implementation of new geophysical profiles in 2007. The results showed that sediments continued under the trench. These data, together with the excellent findings from the excavation, determined the expansion of the excavation area, which has allowed a validated control test for the ERT profiles of Sierra de Atapuerca, started by Ortega *et al.* (2010) in 2003.

### Introducción:

Los sistemas kársticos representan entornos complejos y difíciles para las exploraciones geofísicas, debido a la alta variabilidad de sus morfologías y a las impredecibles características de estos sistemas (Chalikakis *et al.* 2011). Sin embargo, la prospección geofísica del subsuelo mediante la Tomografía Eléctrica se ha revelado como una vía eficaz y no destructiva para conocer las características, desarrollo y extensión de los conductos y sus sedimentos con un potencial contenido arqueológico.

Los resultados aportados por las prospecciones geofísicas llevadas a cabo en sistemas kársticos con yacimientos paleolíticos (Ortega *et al.*, 2010; Valois *et al.*, 2010; Bermejo *et al.*, 2010; Bermejo 2009), han puesto de manifiesto la relevancia de este tipo de estudios tanto para el mejor entendimiento de la geometría y los procesos de formación del yacimiento, como para las estrategias de planificación de los trabajos de excavación.

El conjunto arqueológico de la Sierra de Atapuerca es uno de los enclaves más importantes para el conocimiento de la evolución humana en Europa ya que alberga una de las mayores acumulaciones de fósiles humanos y manifestaciones culturales del Pleistoceno (Arsuaga *et al.*, 1997; Bermúdez de Castro *et al.*, 1997; Rodríguez *et al.* 2011; Martín-Torres *et al.*, 2012; Ollé *et al.*, 2013). El yacimiento de la Sima del Elefante constituye la evidencia humana más antigua de la Sierra de Atapuerca (Carbonell *et al.*, 2008) y una de las primeras de Europa.

Los trabajos de prospección geoeléctrica desarrollados en el sistema de cavidades de la Sierra de Atapuerca, entre 2003 y 2006, mostraron la existencia de conductos colmatados y de rellenos en el término de Torcas, donde se encuentra el yacimiento de Sima del Elefante (Ortega 2009). Con respecto a este yacimiento, los datos mostraban una relación clara tanto con el Valle de la Propiedad como con el conducto inferior de Cueva Peluda (Ortega *et al.* 2010).

En 2007 se realizaron nuevos los perfiles en el yacimiento de la Sima Elefante, que pusieron de manifiesto la existencia de un importante paquete sedimentario. En 2011 se amplió el área de excavación, proporcionando un test de control para los resultados obtenidos por la prospección geofísica. Este trabajo presenta las valoraciones metodológicas de dichas prospecciones y las propuestas interpretativas del subsuelo bajo la superficie de la Trinchera del Ferrocarril.

**Situación y contexto geológico:**

La Sierra de Atapuerca, a 15 km al este de Burgos (Fig. 1), corresponde a un anticlinal calizo de la Orla mesozoica del Sistema Ibérico, situado en el sector NE de la Cuenca del Duero y que se relaciona con la Cuenca del Ebro a través del Corredor de la Bureba.



Figura 1: Situación geográfica de la Sierra de Atapuerca (Ortega *et al.* 2013)

El origen de la formación del complejo kárstico de la Sierra de Atapuerca está asociado al progresivo encajamiento del nivel de base del cercano río Arlanzón, cuya evolución modeló un sistema multinivel de conductos subhorizontales compuesto por tres niveles y desarrollado en la serie carbonatada del Cretácico superior (Ortega *et al.* 2013) del extremo Oeste de la Unidad de San Vicente (Fig. 2).

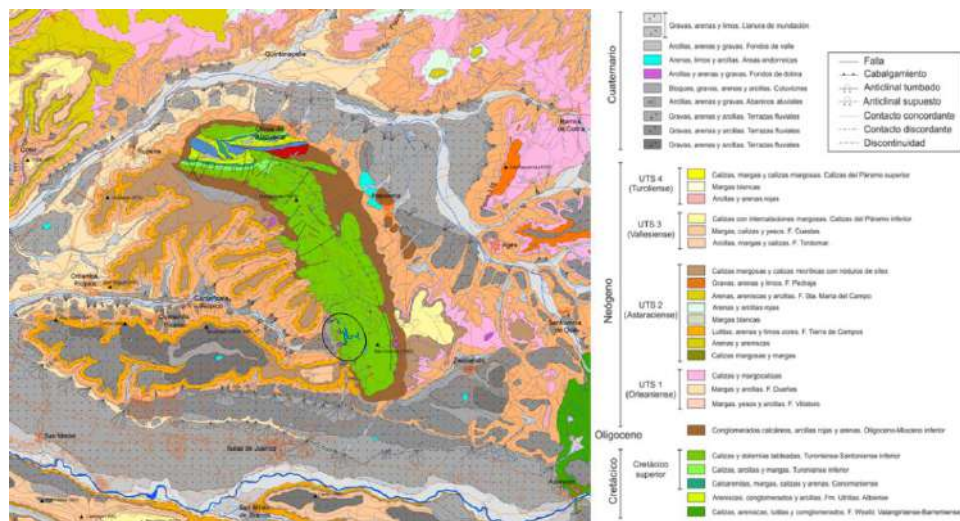


Figura 2: Mapa geomorfológico de la Sierra de Atapuerca (Benito-Calvo, 2004). El círculo negro señala la situación del karst de la Sierra de Atapuerca.



Situado en el extremo sur de la sierra, las cavidades se desarrollan hacia el OSO, a favor de la evolución de la ladera, ajustándose a las fracturas principales de dirección NNE-SSO, ONO-ESE y NO-SE (Fig. 3) (Ortega, 2009). Esta fracturación es por lo tanto importante en la interpretación de los perfiles geofísicos.

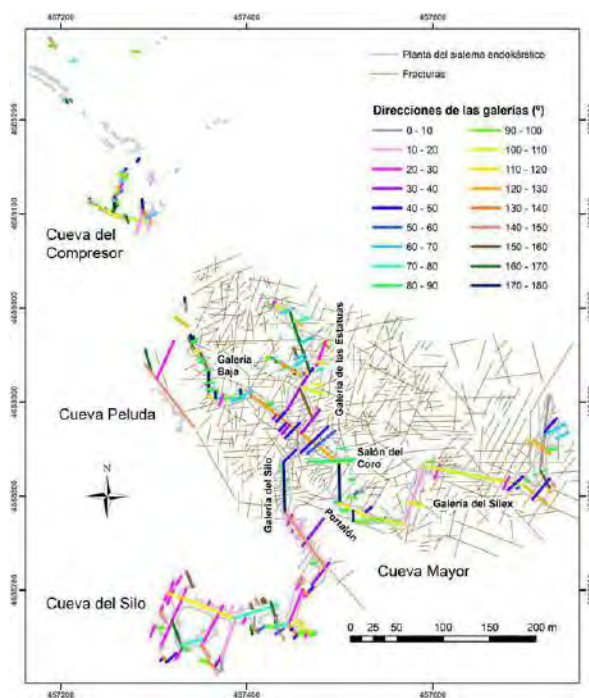


Figura 3: Mapa de fracturación y control estructural de los conductos del karst de la Sierra de Atapuerca (Ortega, 2009)

La construcción de una trinchera para el paso de un ferrocarril minero, a finales del siglo XIX, seccionó las entradas de antiguas cavidades en el término de Torcas, dando acceso y poniendo al descubierto los yacimientos arqueo-paleontológicos de Gran Dolina, Complejo Galería y Sima del Elefante. Este ferrocarril tuvo una efímera vida, documentando su abandono en los años 50 (Díez González, 2002)

Entre las cavidades descubiertas por la trinchera, destaca la Sima del Elefante, por representar una de las evidencias más antiguas de la ocupación humana en Europa. Corresponde a una antigua entrada de cueva, que está colmatada por sedimentos y presenta una secuencia de 18 m de altura conocida, dividida en 16 unidades litoestratigráficas (Fig. 4). El nivel TE 16 marca la inversión magnética Matuyama-Brunhes y el techo de una secuencia de colapso, cuyos sedimentos buzcan hacia NO, hecho constatable por la gran deformación que presentan principalmente los estratos TE7-TE14 (Rosas *et al.* 2006; Carbonell *et al.* 2008). Las características sedimentarias de la base de la secuencia (ca. 6m) únicamente se conocen a través de los testigos recuperados en dos pequeños sondeos mecánicos, realizados en 2001 en el centro de la trinchera.

La excavación actual se desarrolla en los niveles TE9-TE7, donde entre 2007 y 2008 fueron hallados un fragmento de mandíbula y una falange atribuidos a *Homo sp.* (Bermúdez de Castro *et al.*, 2011). En este sector se centraron los perfiles geofísicos ERT del presente trabajo.

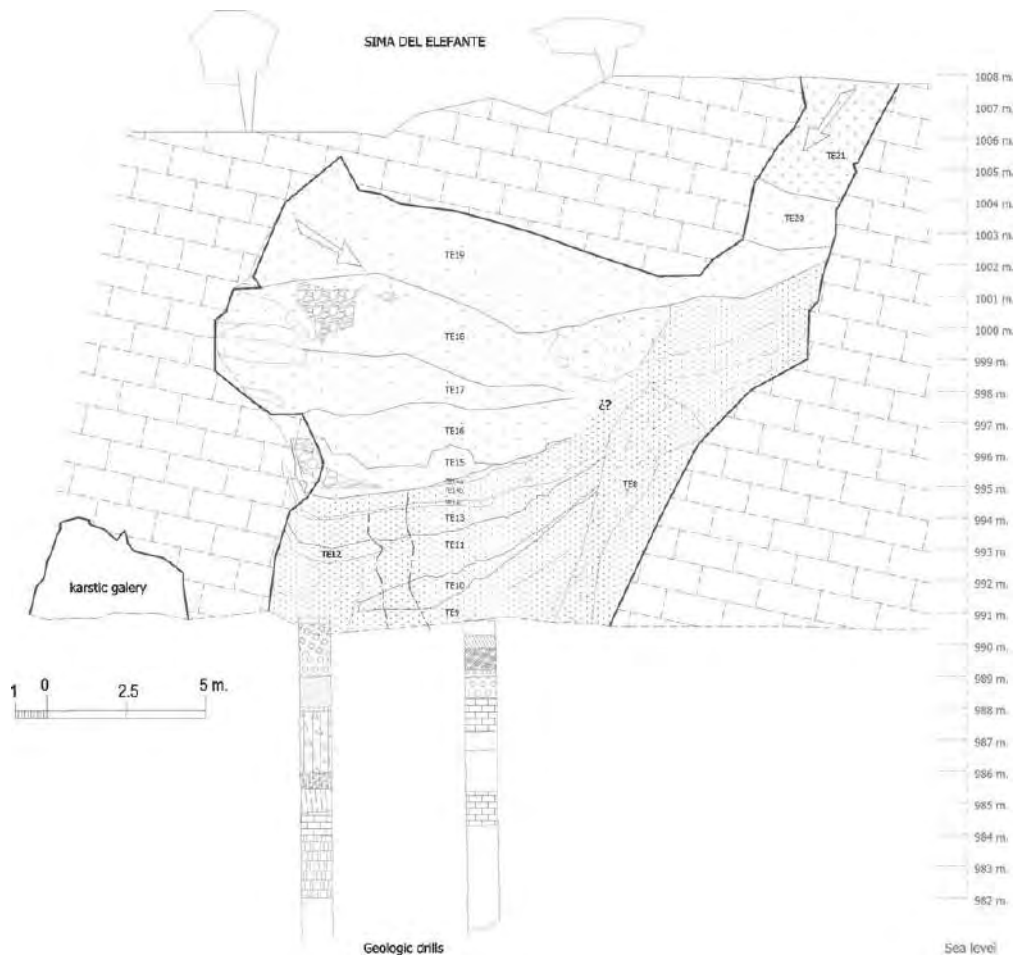


Figura 4: Secuencia estratigráfica del yacimiento de la Sima del Elefante (Rosas *et al.*, 2006)

### Metodología geofísica:

En los terrenos calizos, con importante desarrollo del endokarst, se han contrastado claras diferencias geoelectricas entre las respuestas de sedimentos detríticos (arcillas, limos, arenas y gravas principalmente) y carbonatados (calizas), lo que ha permitido determinar la presencia de conductos rellenos de sedimentos o de aire, desarrollados en las calizas. Así, uno de los métodos más apropiados para el estudio del karst es la Tomografía Eléctrica (ERT) que permite determinar, con suficiente aproximación, la dimensión, ubicación y potencialidad de los diferentes rellenos kársticos y cavidades (Guérin *et al.*, 2009; Ortega *et al.*, 2010; Valois *et al.*, 2010; Chalikakis *et al.*, 2011). Esta investigación facilita perfiles 2D del terreno en base a la diferente resistividad eléctrica que presentan los materiales (Dahlin, 2001).

El sensor del sistema ERT consiste en un conjunto de electrodos colocados de manera equidistante a lo largo de un perfil rectilíneo. Una corriente es inyectada entre dos electrodos y otros dos miden la diferencia de potencial (Loke and Barker, 1996) El equipo usado fue SYSCAL Pro (IRIS instruments) que contiene un sistema de cambio automático multicanal que permite 2000 medidas diferentes en 10-15 min.

En el caso que aquí presentamos se desarrollaron cuatro perfiles con 72 electrodos; dos de ellos con una separación de 1m y los otros dos con una separación de 2m. Todos ellos fueron medidos con los métodos Wenner– Schlumberger (Wn-Sch) y dipole–dipole (Dip-Dip), cada uno con sus propias características. Ambos se emplean de igual manera, ya que el carácter impredecible del terreno hace muy difícil prever cuál de los dispositivos es el más adecuado para la medición de un terreno determinado. Una comparación de los mismos puede ser encontrada en Dahlin and Zhou (2004). Los datos fueron procesados con el software Res2dinv (Geotomo Software) usando una técnica de inversión para producir un modelo 2D del subsuelo a partir de los datos de la resistividad aparente (Loke and Barker, 1996). Se han hecho ajustes de topografía durante las inversiones.

### Datos-Resultados:

De los cuatro perfiles llevados a cabo sobre la superficie de la trinchera del ferrocarril en el yacimiento de la Sima del Elefante, sólo han sido tenidos en cuenta los dos situados en el lado Este de la Trinchera (Perfil 2.1 y 2.2), junto al yacimiento de Elefante, debido al alto error obtenido en los realizados al Oeste (Perfil 1.1 y 1.2) (Fig. 5, tabla 1).

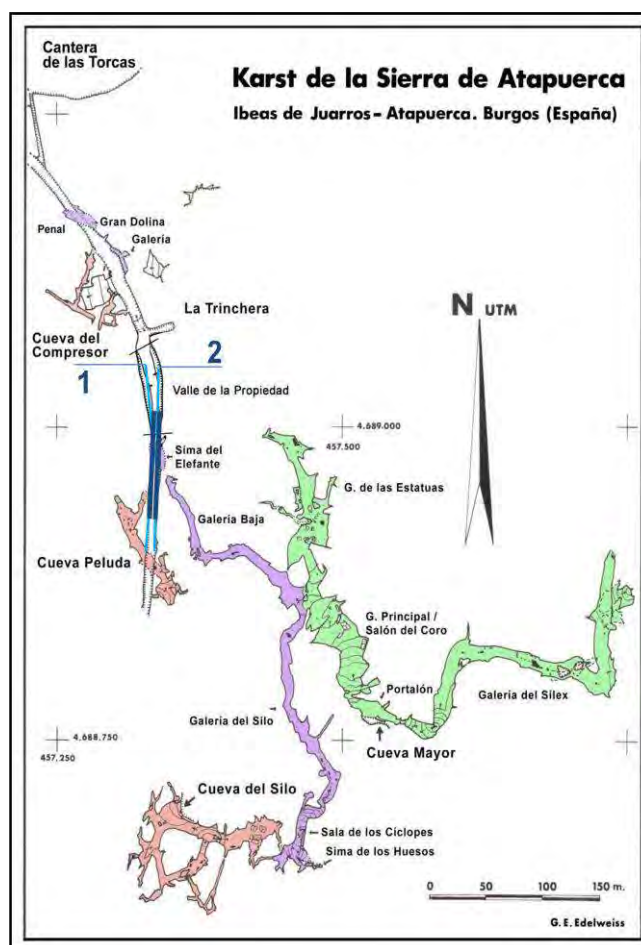


Figura 5: Situación de los perfiles geofísicos 1 y 2 sobre la planimetría del Karst de la Sierra de Atapuerca. En verde el Nivel Superior, en morado el Nivel Intermedio y en rosa el Inferior.



Perfil	Distancia (m)	Separación electrodos (m)	Número de iteraciones		Error Absoluto	
			Wn-Sch	Dip-Dip	Wn-Sch	Dip-Dip
1.1	71	1	2	3	52.1	113.6
1.2	142	2	2	5	44.7	50.1
2.1	71	1	6	5	6.3	20.8
2.2	142	2	5	5	7	10.5

Tabla 1: Características técnicas de los perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

De entre ellos, los perfiles Wenner– Schlumberger ofrecieron un menor error absoluto, así como una mejor relación con las estructuras conocidas en superficie. Se observa la correlación con las principales fracturas conocidas (marcadas en amarillo en la Fig. 6. A y B) gracias al frente de la trinchera, destacando netamente la falla que ha delimitado la pared Sur de la Sima del Elefante. Se distingue un marcado cambio en la uniformidad de la resistividad a 1,5 m de profundidad (marcada en anaranjado, Fig. 6. A y B), que se corresponde con el relleno sedimentario de la trinchera del ferrocarril documentando tanto en los sondeos mecánicos de 2001 como en la excavación de 2011.

Otro de los resultados de este estudio, establecido por la buena relación entre el dispositivo Wenner-Schlumberger y las estructuras superficiales, ha sido el de establecer que las resistividades que se corresponden con la caliza o roca caja son aquellas que sobrepasan los 400 ohm.m. Esta misma relación se confirmaba en Ortega *et al.* (2010).

El perfil Wenner-Schlumberger 2.2 muestra dos grandes anomalías: una conductiva que se encuentra entre los metros 60 y 70 del perfil a 5-17,5 metros de profundidad y una resistiva que se halla a apenas 2 metros de profundidad, entre los metros 80 y 100 del perfil. La primera, indicada con una B en la figura 6. B, sabemos por Rosas *et al.*, (2006) (Fig. 3) que se corresponde con materiales fluviales, hallados a más de 10 metros de profundidad, y que se relacionan en cota con los rellenos fluviales del nivel inferior de Cueva Peluda. Sin embargo, el perfil geofísico no nos ofrece una información clara acerca de la profundidad de esta anomalía, ni de su desarrollo lateral hacia el Norte.

Una segunda estructura cerrada, indicada con la letra A en la figura 6. B, aparece a una cota intermedia entre el nivel principal de Cueva de Peluda y el nivel inferior. Esta anomalía ofrece valores de resistividad iguales e incluso superiores a los asociados para el conducto de Cueva Peluda (Ortega *et al.*, 2010). Sin embargo, por hallarse tan cerca de la superficie excavada por la trinchera del ferrocarril, así como por su naturaleza altamente resistiva, no podemos afirmar si corresponde a un conducto aéreo o si refleja la composición compacta de este sector de la



roca. Si comparamos la estructura A con la imagen proporcionada para el conducto de Peluda en el trabajo de Ortega *et al.* (2010), observamos que en el nuevo perfil la transición de la resistividad no es gradual, apareciendo de manera abrupta el cambio hacia los valores altamente resistivos. El hecho de que su ubicación coincida con el espacio situado entre dos fracturas mayores no puede resolver ni una ni otra hipótesis. Visto en planta (Fig. 7), esta anomalía coincide con la dirección del conducto inferior de Peluda (N-20°-E), que se ajusta a uno de los principales ejes de desarrollo de los conductos (Fig. 3).

Finalmente, queda comentar el extremo Norte del perfil Wenner-Schlumberger: la presencia verticalizada de materiales de baja resistividad relacionan el espacio comprendido entre el metro 0 y el 32, con el relleno del Valle de la Propiedad. Los bajos valores de resistividad presentes entre el metro 32 y 50 y a partir de los 8,50 m de profundidad, sugieren la existencia de un conducto que marca una relación lateral del valle con los rellenos descritos en la anomalía B, también patente en los perfiles geofísicos realizados entre 2003 y 2006.

En el perfil Dipolo-Dipolo 2.2 observamos *grosso modo* la misma disposición de las estructuras de la sub-superficie descritas para los perfiles Wenner-Schlumberger: relleno de la trinchera del ferrocarril (en naranja); concordancia con las principales fracturas de la superficie (en amarillo); anomalía resistiva (A) de más de 20 metros de ancho y 2 metros de espesor; anomalía conductiva (B) de relación con el valle; y relleno del Valle de la Propiedad (Fig. 6. C).

No obstante, este perfil, que alcanza sólo los 18 metros de profundidad, frente a los 30 metros del Wenner-Schlumberger, muestra una nueva anomalía conductiva (letra C, Fig. 6.C) situada a 9,40 m de profundidad, bajo la estructura A y con dimensiones laterales similares. El perfil Wenner-Schlumberger 2.2 presenta una anomalía a los 16 metros de profundidad que puede corresponderse con la identificada con la letra C. Es interesante resaltar que la anomalía aquí descrita no tiene una aparente relación con el conducto colmatado B claramente identificado en los diferentes perfiles.



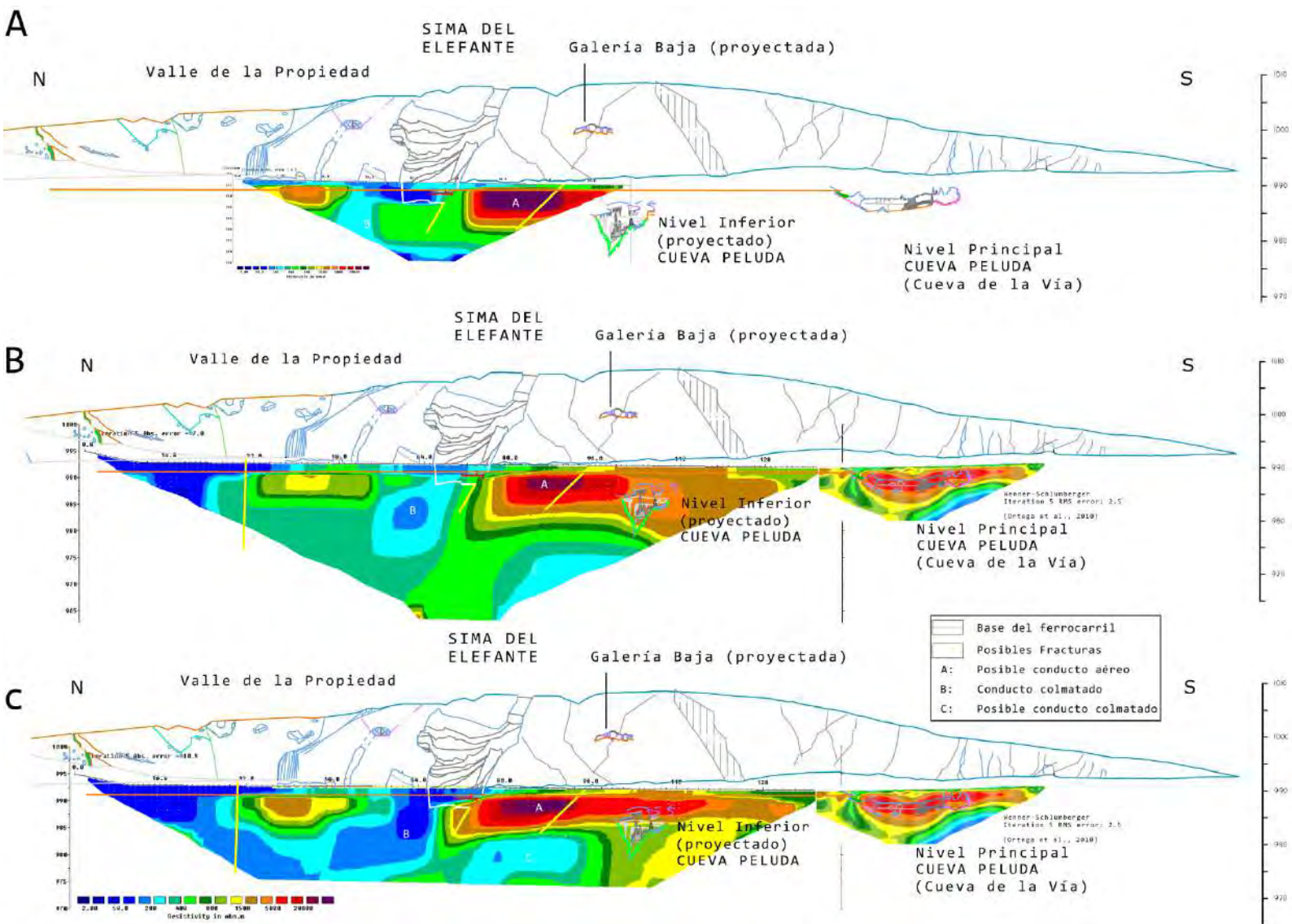


Figura 6: Perfiles Geofísicos: A) Perfil geofísico Werner-Schlumberger 2.1, B) Perfil geofísico Werner-Schlumberger 2.2; C) Perfil geofísico Dipolo-Dipolo 2.2. En rojo se representa el paquete calizo descubierto durante la excavación 2011 y retirado en 2012. En blanco los sedimentos arcillosos que marcan el límite de la excavación actual (2013).

### Discusión:

La interpretación geofísica de los perfiles ERT muestran en el primer metro y medio de profundidad unos valores de resistividad muy diferentes entre sí y que asociamos con el relleno que experimentó la base trinchera del ferrocarril a partir de 1921, al abandonarse definitivamente el proyecto ferroviario (Díez González, 2002). Durante la intervención arqueológica de 2011 las traviesas aparecieron a metro y medio de profundidad sobre la roca arrasada (Fig. 7), confirmando la morfología de estas resistividades. El relleno se produjo por el desprendimiento de los frentes de trinchera, estando relacionados en el perfil geofísico que nos ocupa, con los rellenos fluviales del Valle de la Propiedad, los rellenos sedimentarios del yacimiento de la Sima del Elefante y de los conductos TR5-TR7 y los materiales calizos de la Sierra. Destaca la concordancia que existe entre los valores de resistividad de 20 a 200 ohm.m para el tramo del Valle de la Propiedad y los relacionados con los conductos TR5-TR7 y Elefante, mientras que los valores a partir de 400 ohm.m presentan una buena correspondencia con el frente calizo de la trinchera.

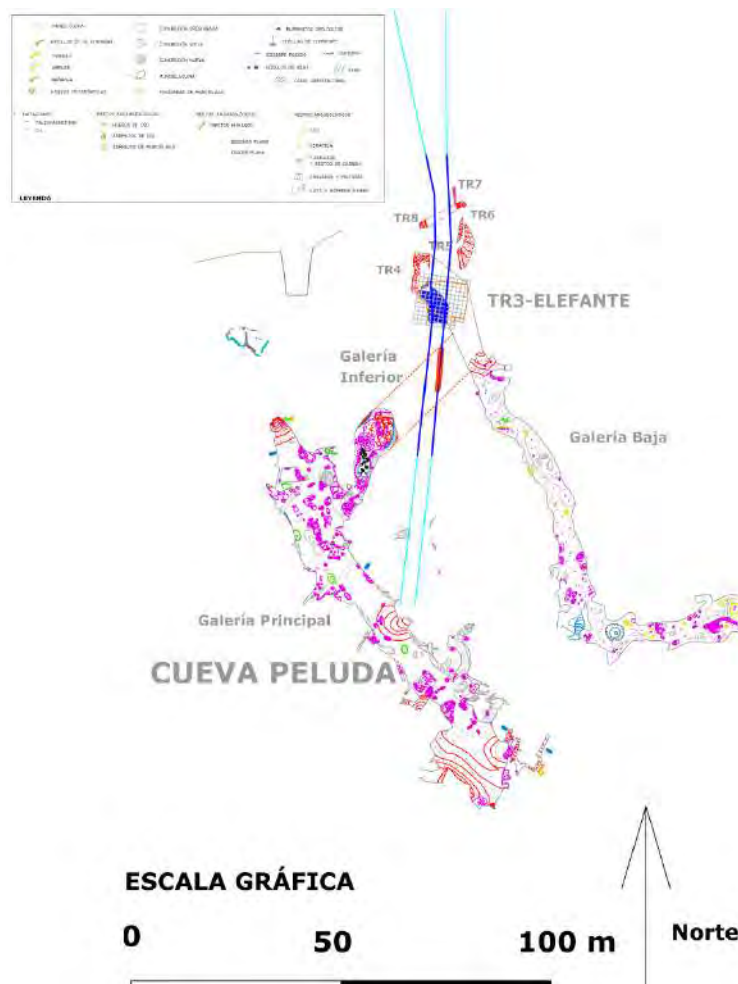


Figura 7: Situación en planta de los perfiles geofísicos y anomalías. En azul el arrasamiento de la roca caliza descubierta en 2011, sobre la que se asentaba las traviesas del antiguo ferrocarril minero. En rojo la situación de las anomalías A y C.

La precisión de este primer metro y medio no continúa en profundidad, al no identificar la roca caliza de 6 metros de longitud y 1 metro de espesor descubierta en la excavación (en azul Fig. 7 y en rojo en Fig. 6), entre sedimentos terrígenos. Esto puede ser debido, en parte, a que la separación de los electrodos haya sido demasiado grande para detectar esta morfología, pero también en parte, a que su escaso espesor no permite que se reflejen sus valores de resistividad en el contexto de materiales de baja resistividad entre los que se encuentra envuelta.

En relación con la anomalía B cabe decir que ésta representa un conducto colmatado por sedimentos terrígenos (entre 20-300 ohm.m) aunque los dispositivos muestran una ligera diferencia (Fig.6) en su morfología. En el perfil Wenner-Schlumberger 2.2 se observa una estructura de unos 15,5 metros de profundidad que alcanza una cota aproximada de 973 m s.n.m., cotas que se relacionan con el conducto inferior de Cueva Peluda. Esta anomalía está compuesta por dos elementos: el primero de ellos es un conducto cerrado de 13 metros de anchura por 12 de altura vinculado al citado de Cueva Peluda. El segundo elemento lo constituye la unión con el yacimiento de la Sima del Elefante, desarrollada a través de un paso de unos 5 metros de ancho a lo largo de 3,5 metros, que se puede interpretar como un colapso de la roca caliza de la base de la Sima del Elefante, base documentada en los sondeos mecánicos realizados en 2001 (Rosas et al, 2006) (Fig. 3).

La imagen ofrecida por el Dipolo-Dipolo 2.2 presenta una mayor complejidad, al mostrar el desarrollo longitudinal (N-S) del conducto identificado por el dispositivo Wenner-Schlumberger y en posible relación con el conducto inferior de Cueva Peluda. Este conducto se desarrolla desde la parte inferior de Elefante hasta el Valle de la Propiedad, evidenciando la presencia de una antigua surgencia, colmatada con depósitos terrígenos, cuyas bóvedas podrían localizarse entorno a los 985 m s.n.m. La segunda diferencia está en el punto de conexión entre el yacimiento de la Sima del Elefante y este conducto inferior, que aparece claramente marcado por un escalón verticalizado y una anchura de unos 8,5 m, poniendo en conexión el yacimiento de la Sima del Elefante con la chimenea ascendente identificada como TR5 (Fig. 6. C). Este escalón podría interpretarse como una morfología propia del descenso de los niveles de base en un sistema multinivel como es el caso del karst de Atapuerca (Anthony, 2004; Ortega et al., 2013)

En cuanto a la anomalía A (Fig. 6), hay que indicar que aparece identificada con las mismas dimensiones y resistividades en los dos dispositivos utilizados, que se localiza en las mismas cotas del conducto principal de Peluda (986-988 m s.n.m). y que puede ser interpretada como un conducto aéreo o un sector muy compactado de la roca (con valores superiores a 20.000 ohm.m). Para constatar la asociación de esta anomalía con una u otra interpretación, se debe hacer un sondeo mecánico con recuperación de testigo. En cualquier caso la presencia de esta anomalía, de 2,5 m de grosor a 1,80 m de profundidad, indica que éste el tamaño adecuado para la identificación de estructuras.

Finalmente, la última anomalía identificada en este estudio se corresponde con la presencia de una anomalía de carácter conductiva (C) situado bajo la anomalía A e interpretada como un conducto del nivel inferior del karst (Fig. 6). En el perfil Wenner-Schlumberger 2.2 esta anomalía aparece parcialmente representada en el extremo inferior del perfil con una bóveda próxima a los 976 m s.n.m., mientras que el Dipolo-Dipolo muestra una estructura claramente cerrada, tipo conducto, con una bóveda entorno a los 982 m s.n.m., cota relacionada con el nivel inferior de Cueva Peluda. De todos modos, esta anomalía ha de interpretarse con cautela al encontrarse en el tramo inferior de ambos perfiles.

### Conclusión:

La buena concordancia entre estos nuevos perfiles con las imágenes obtenidas por Ortega *et al.* (2010) aportan una nueva confianza para este tipo de trabajos en estudios arqueológicos en zonas kársticas.

El estudio de la relación entre las estructuras superficiales y el resultado de los perfiles geofísicos, así como la comparación de éstos con los publicados anteriormente, nos ha permitido establecer que las resistividades que se corresponden con la caliza o roca caja son aquellas que sobrepasan los 400 ohm.m. Por otro lado, podemos relacionar la presencia de cavidades vacías, a poca profundidad de investigación, con valores de a partir de 12.000 ohm.m.

El método Schlumberger-Wener ha proporcionado mejores resultados y con menor error en relación a las estructuras conocidas en superficie, aunque la separación de un metro no es la adecuada para la identificación de estructuras inferiores a 2,5 m de espesor. Los primeros metros del subsuelo dan unos valores de resistividad poco coherentes y muy verticalizados, que el proceso de excavación permitió identificar con los rellenos de la base de la trinchera del ferrocarril.

Los materiales conductivos de la anomalía B y C se pueden interpretar como un importante conducto verticalizado que alcanza y supera las cotas inferiores de Cueva Peluda, por lo que estaríamos ante un punto de conexión de los diferentes niveles del karst de la Sierra de Atapuerca, en concreto entre el nivel inferior y el intermedio. La imagen de Dipolo-Dipolo aporta además el desarrollo de la anomalía B hacia el Valle de la Propiedad.

Los altos valores resistivos de la anomalía A pueden ser interpretados como un conducto aéreo o una roca muy compactada. La realización de sondeos mecánicos o de los trabajos de excavación permitirá testear dichas hipótesis.

### REFERENCIAS:

Anthony, D. M. (2004): Multilevel Caves and Landscape Evolution. En Culver D. y White W.: *Encyclopedia of Caves*, Academia Press, 397-400

Arsuaga J.L., Bermúdez de Castro J.M., Carbonell E. (eds) (1997) The Sima de los Huesos Hominid Site. *J Hum Evol* 33: 105-421

Benito A. (2004). Análisis geomorfológico y reconstrucción de paleopaisajes neógenos y cuaternarios en la Sierra de Atapuerca y el valle medio del río Arlanzón. Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, Spain, 381 pp, ISBN 84-669- 2585-6.

Bermejo Albarrán L. (2009). Caracterización del subsuelo mediante técnicas de tomografía de resistividad eléctrica. Aplicación al yacimiento en contexto aluvial del Pleistoceno inferior de Rosières-la-Terre-des-Sablons (Lunery, Región Centro, Francia). Departament d'Història i Història de l'Art, Àrea de Prehistòria, Universitat Rovira i Virgili. Tesis de Màster.

Bermejo L., Guérin R., Canals A. (2010). Subsoil Characterization by Electrical Resistivity Tomography around Rosières- la-Terre-des-Sablons site (Lunery, Region Centre, France), *Annali dell'Università di Ferrara Museologia Scientifica e Naturalistica*, Volume 6.

Bermúdez de Castro J. M., Arsuaga, J. L., Carbonell E., Rosas, A., Martínez, I. and Mosquera, M. (1997). A hominid from the Lower Pleistocene of Atapuerca, Spain: possible ancestor to Neandertals and modern human. *Science* 276: 1392-1395.

Bermúdez de Castro J.M., Martín-Torres M., Gómez-Robles A., Prado-Simón L., Sarmiento S., Martín-Francés L., Olejniczak A., Carbonell E. (2011). Early Pleistocene human mandible from Sima





del Elefante (TE) cave site in Sierra de Atapuerca (Spain): A comparative morphological study. *J Hum Evol* 61: 12-25

Carbonell E., Bermúdez de Castro J.M., Parés J.M., Pérez-González A., Cuenca-Bescós G., Ollé A., Mosquera M., Huguet R., Made van der J., Rosas A., Sala R., Vallverdú J., García N., Granger D. E., Martín-Torres M., Rodríguez X.P., Stock G.M., Vergès J.M., Allue E., Burjachs F., Cáceres I., Canals, A., Benito, A., Díez, C., Lozano, M., Mateos, A., Navazo, M., Rodríguez, J., Rosell, J. and Asuaga J.L. (2008). The first hominin of Europe. *Nature* 425: 465-470.

Chalikakis K, Plagnes V, Guérin R, Valois R, Bosch F. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19: 1169-1180.

Dahlin T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computer and Geosciences* 27: 1019-1029.

Dahlin T, Zhou B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52: 379-398.

Díez González F. (2002). Historia del Ferrocarril. En: M. Moreno Gayo: El ferrocarril minero de Villafraa a Monterrubio de la Demanda (Historia y Naturaleza). Publicaciones de la Excma. Diputación de Burgos: 19-44.

Loke MH, Barker RD. 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-newton method. *Geophysical Prospecting* 44: 131-152.

Guérin R, Baltassat JM, Boucher M, Chalikakis K, Galibert PY, Girard JF, Plagnes V, Valois R. (2009). Geophysical characterisation of karstic networks - application to the Ouyse system (Poumeysen, France). *Comptes Rendus Geoscience* 341: 810-817.

Martín-Torres M, Bermúdez de Castro J.M., Gómez-Robles A., Pardo-Simón L., Arsuaga J.L., (2012) Morphological description and comparison of the dental remains from Atapuerca-Sima de los Huesos site (Spain). *J Hum Evol* 62: 7-58.

Ollé A., Mosquera M., Rodríguez X.P., Lombra-Hermida A., García-Antón M.D., Garía-Medrano P., Peña L., Menéndez L., Navazo M., Terradillos M., Bargalló A., Márquez B., Sala R., Carbonell E. (2013). The Early and Middle Pleistocene technological record from Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Quaternary International*, 295: 138-167.

Ortega A.I., 2009. Evolución geomorfológica del Karst de la Sierra de Atapuerca (Burgos) y su relación con los yacimientos pleistocenos que contiene. Ph.D. Thesis, Burgos Univ., Burgos, España, 627 pp. Material suplementario (11 mapa, 12 perfiles, 205 cortes transversales).

Ortega, A.I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Porres, A., Martín, M.A., 2010. Applying electrical resistivity tomography to the identification of endokarstic geometries in the Pleistocene sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain). *Archaeological Prospection* 17: 233-245.

Ortega A.I., Benito-Calvo A., Pérez-González A., Martín Merino M.A., Pérez-Martínez R., Parés J.M., Aramburu A., Arsuaga J.L., Bermúdez de Castro J.M., Carbonell E. (2013). Evolution of multilevel caves in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain) and its relation to human occupation. *Geomorphology*, 196: 122-137

Rodríguez J., Burjachs F., Cuenca-Bescós G., García N., van der Made J., Rosas A., Pérez-González A., Blain H.-A., Expósito J.M., López-García J.M., García-Antón M., Allue E., Cáceres I., Huguet R., Mosquera M., Ollé A., Rosell J., Parés J.M., Rodríguez X.P., Díez C., Rufes J., Sala R., Saladié P., Vallverdú J., Bennisar M.L., Blasco R., Bermúdez de Castro J.M., Carbonell E. (2011).





X Congreso Ibérico de  
arqueometría

One million years of cultural evolution in a stable environment at Atapuerca (Burgos, Spain). *Quaternary Science Reviews* 30: 1396–1412.

Rosas A., Huguet R., Pérez González A., Carbonell E., Bermúdez de Castro J.M., Valverde J., van der Made J., Allué E., García N., Martínez-Pérez R., Rodríguez J., Sala R., Saladie P., Benito A., Martínez-Maza C., Bastir M., Sánchez A., Parés J.M., (2006). The "Sima del Elefante" cave site at Atapuerca (Spain). *Estudios Geológicos* 62: 327–348.

Valois R., Bermejo L, Guérin R, Hinguant S. , Pigaud R, Rodet J. (2010). Karstic Morphologies identified with Geophysics around Saulges Caves (Mayenne, France). *Journal Archaeological Prospection*, 17: 151-160.

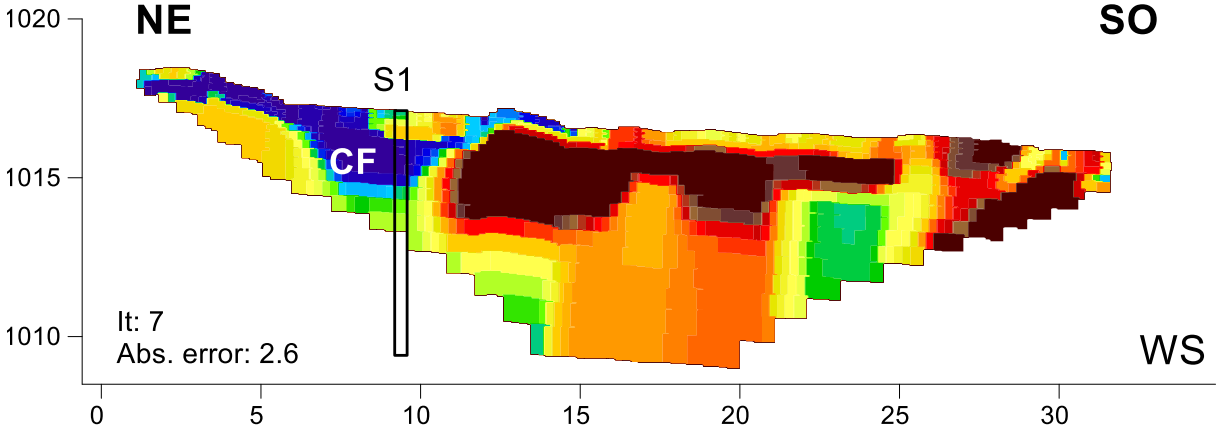
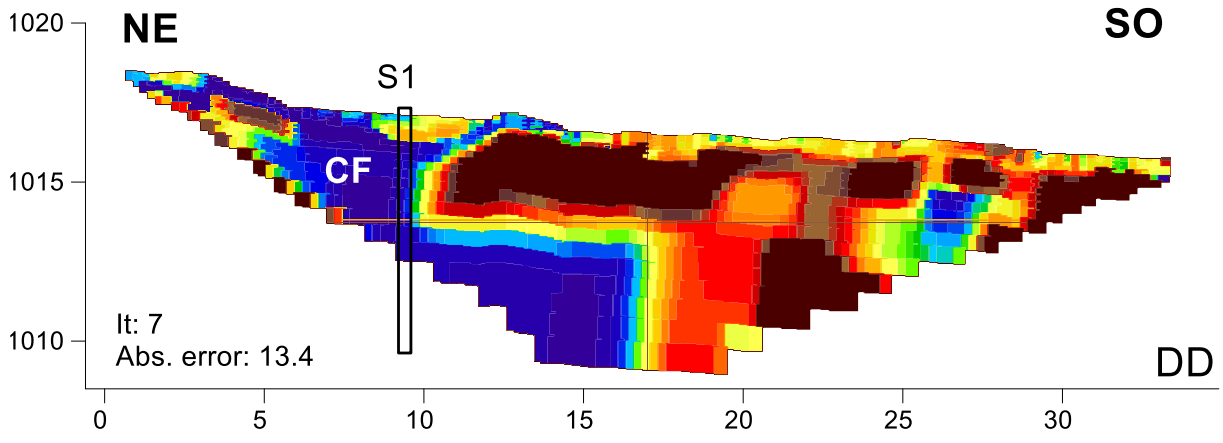
**ANEXO II**

**Perfiles de ERT**

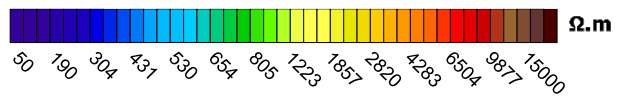
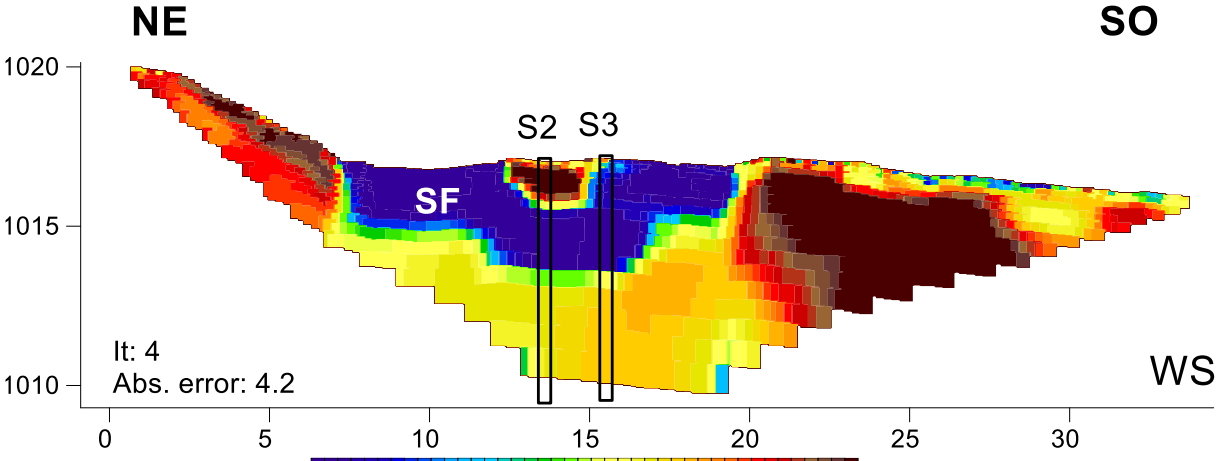
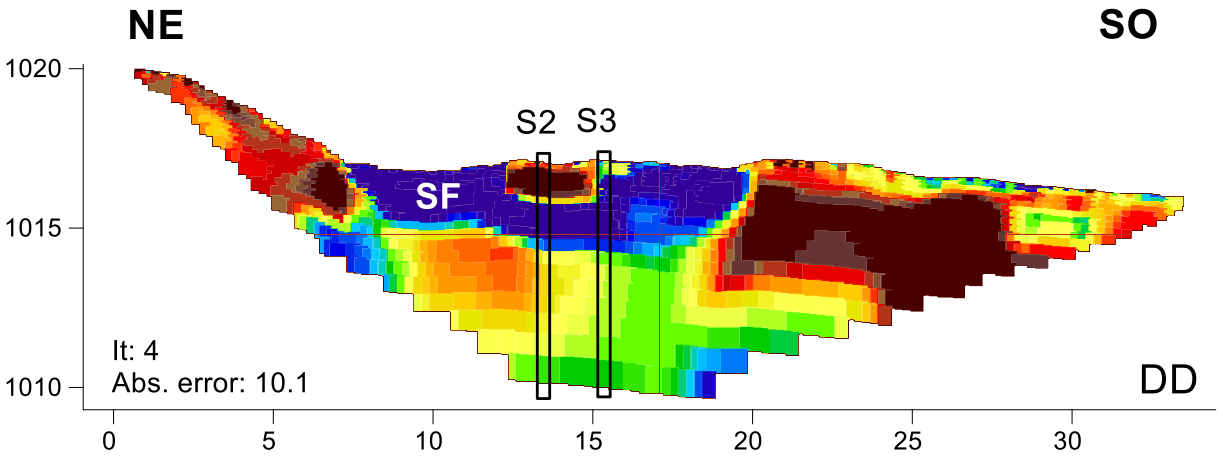
## **ANEXO II.1**

### **Escala general**

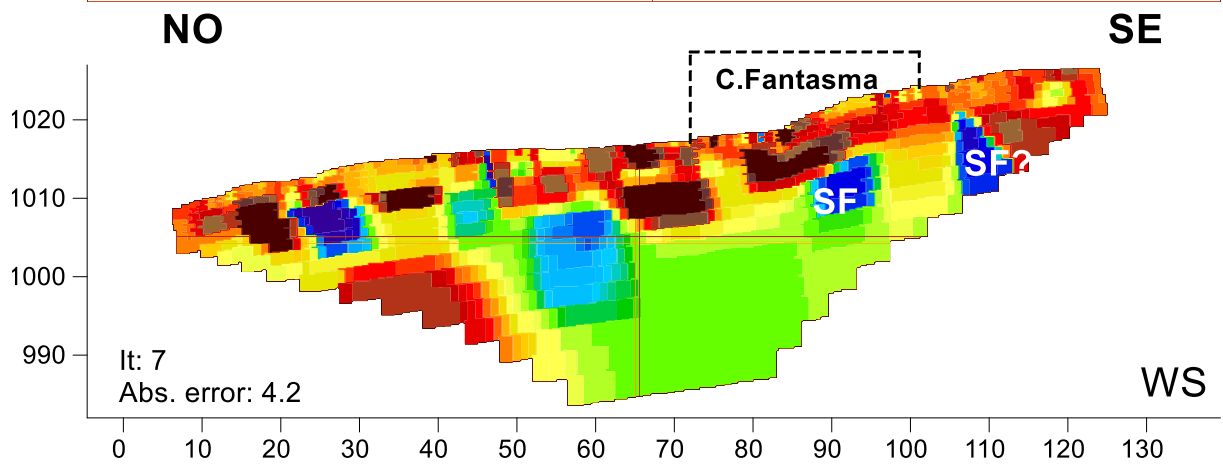
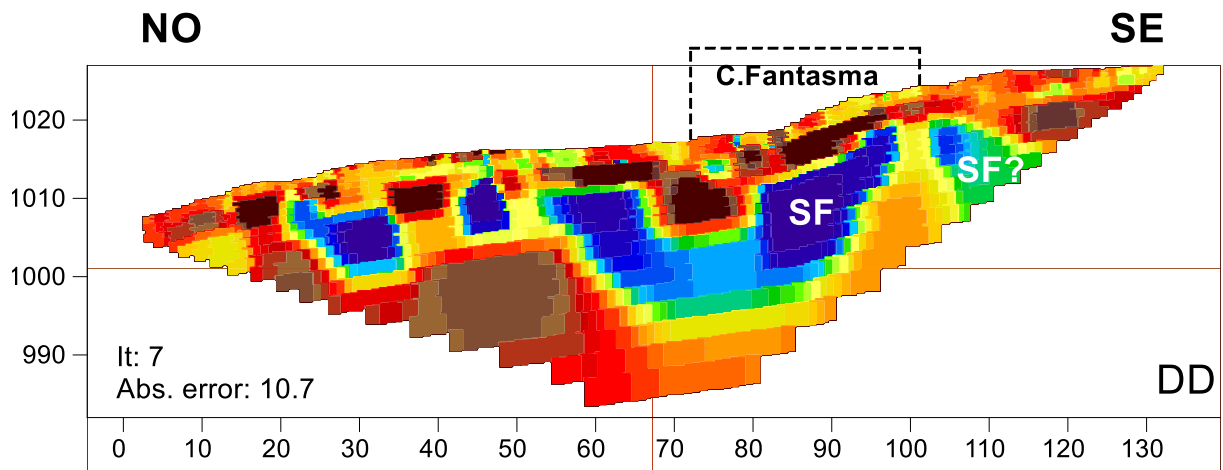
# ERT\_1



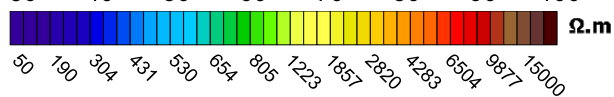
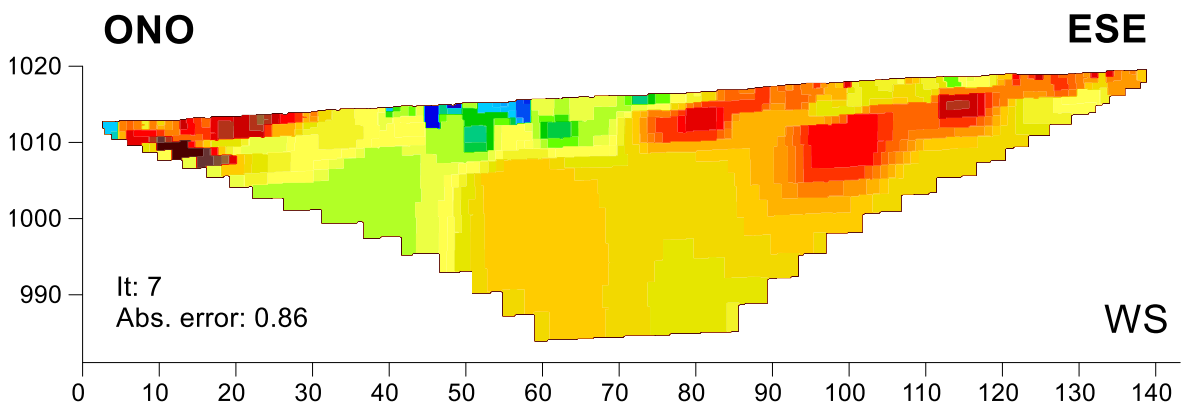
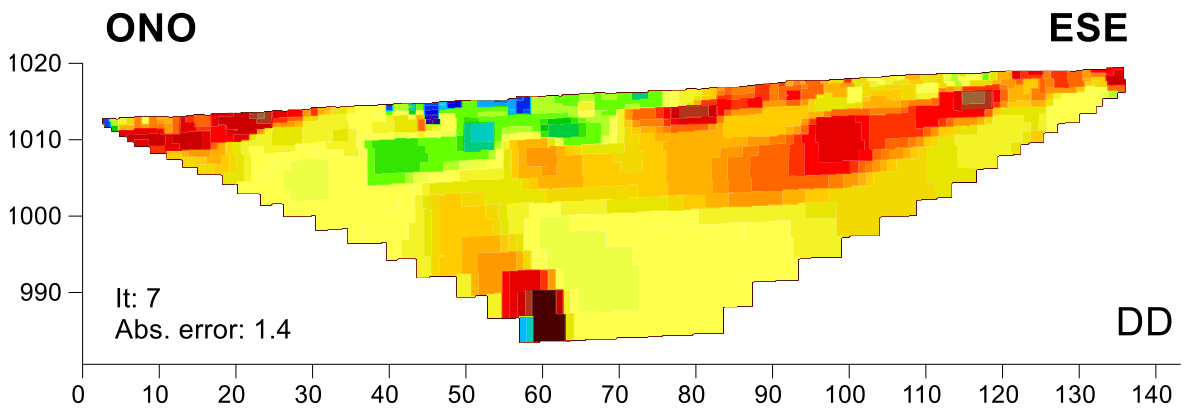
# ERT\_2



# ERT\_3

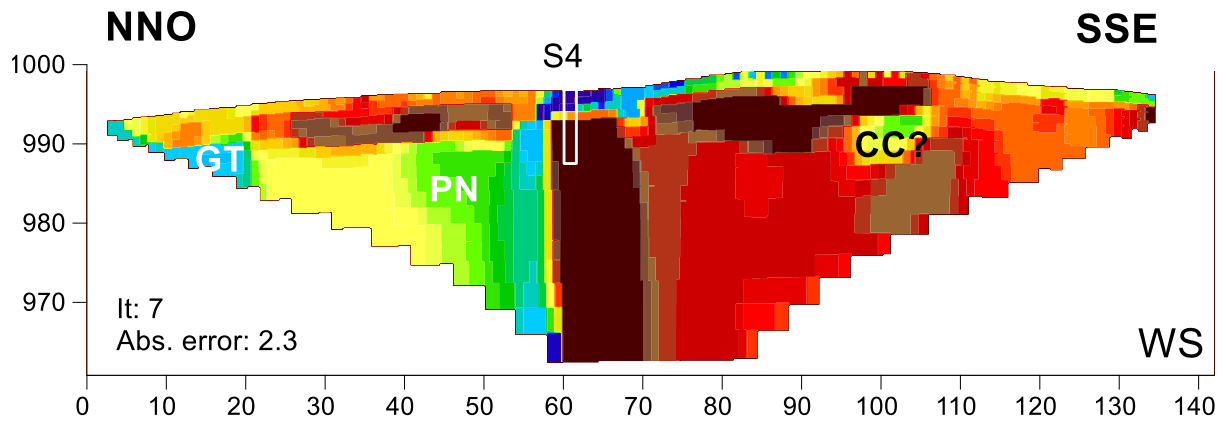
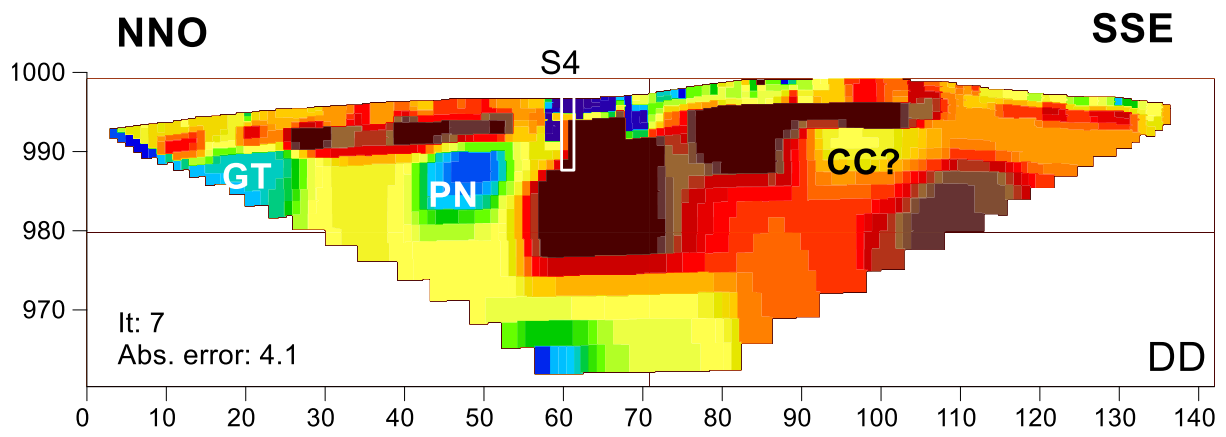


# ERT\_4

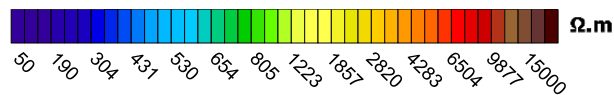
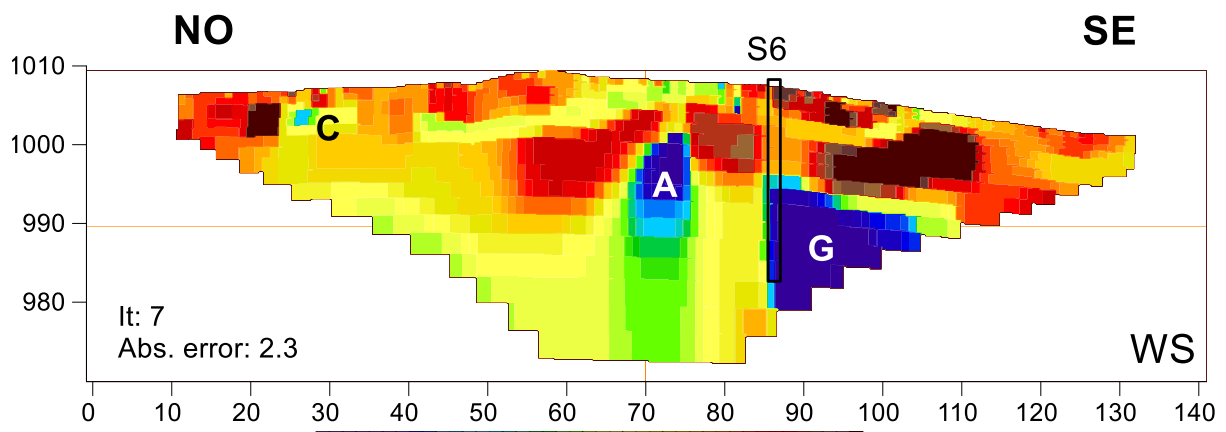
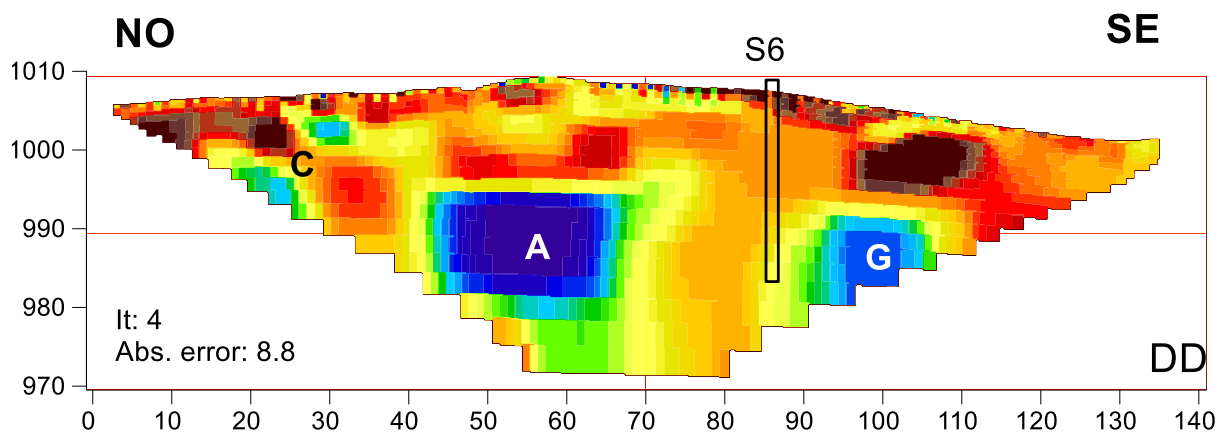




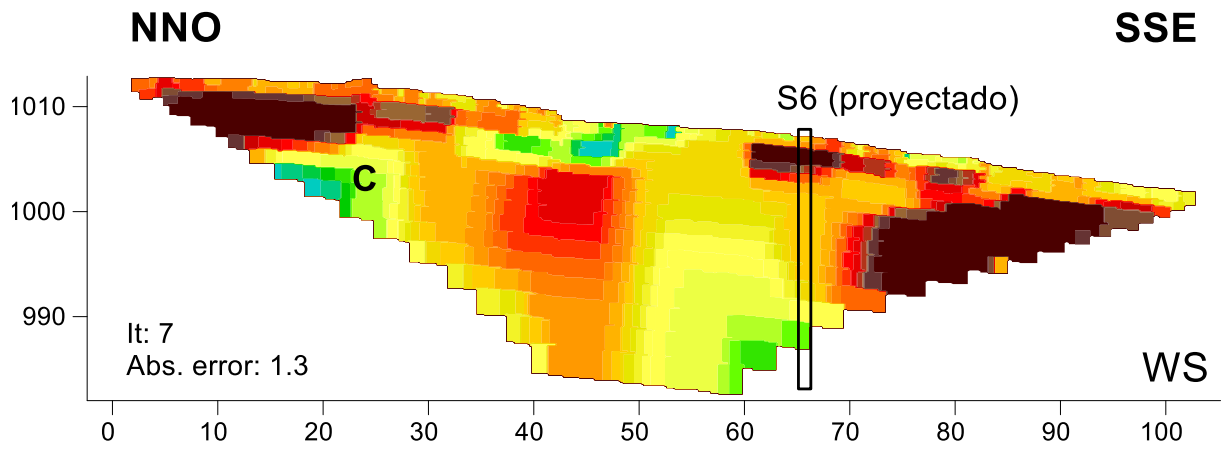
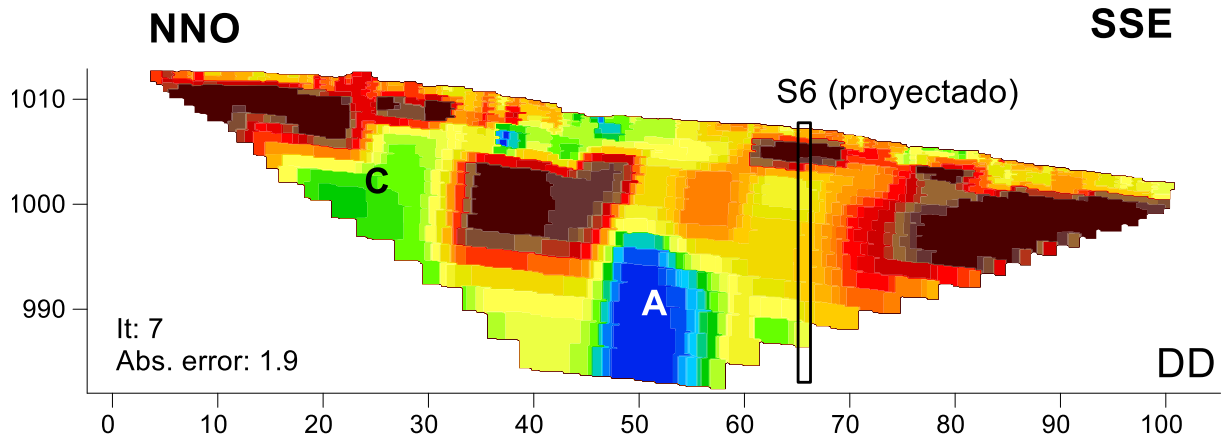
# ERT\_5



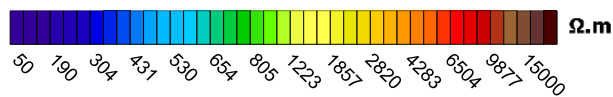
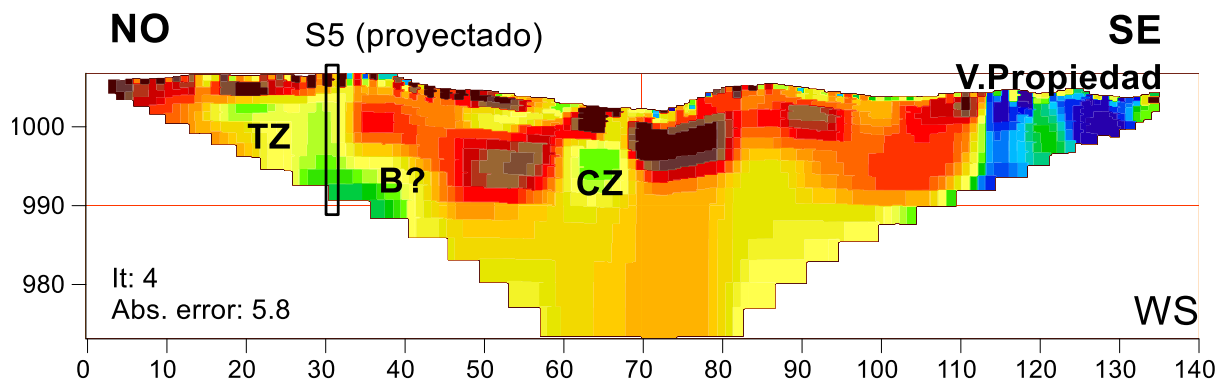
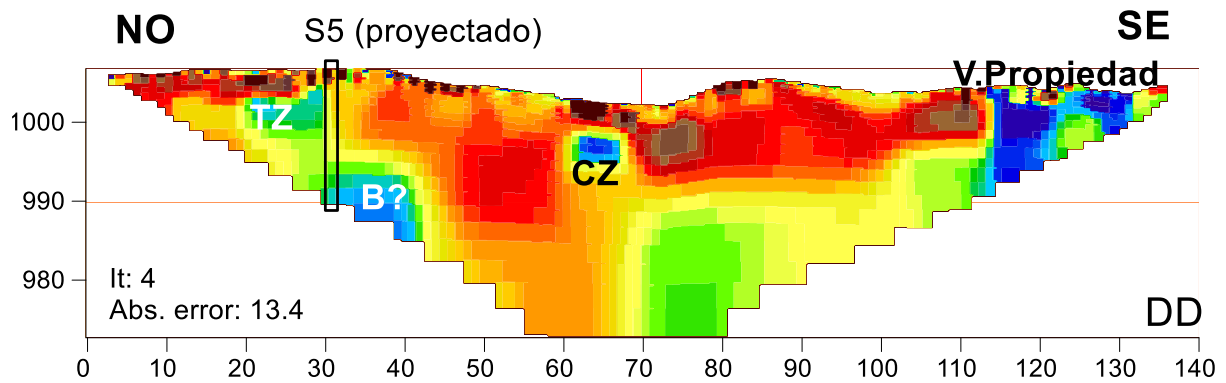
# ERT\_6



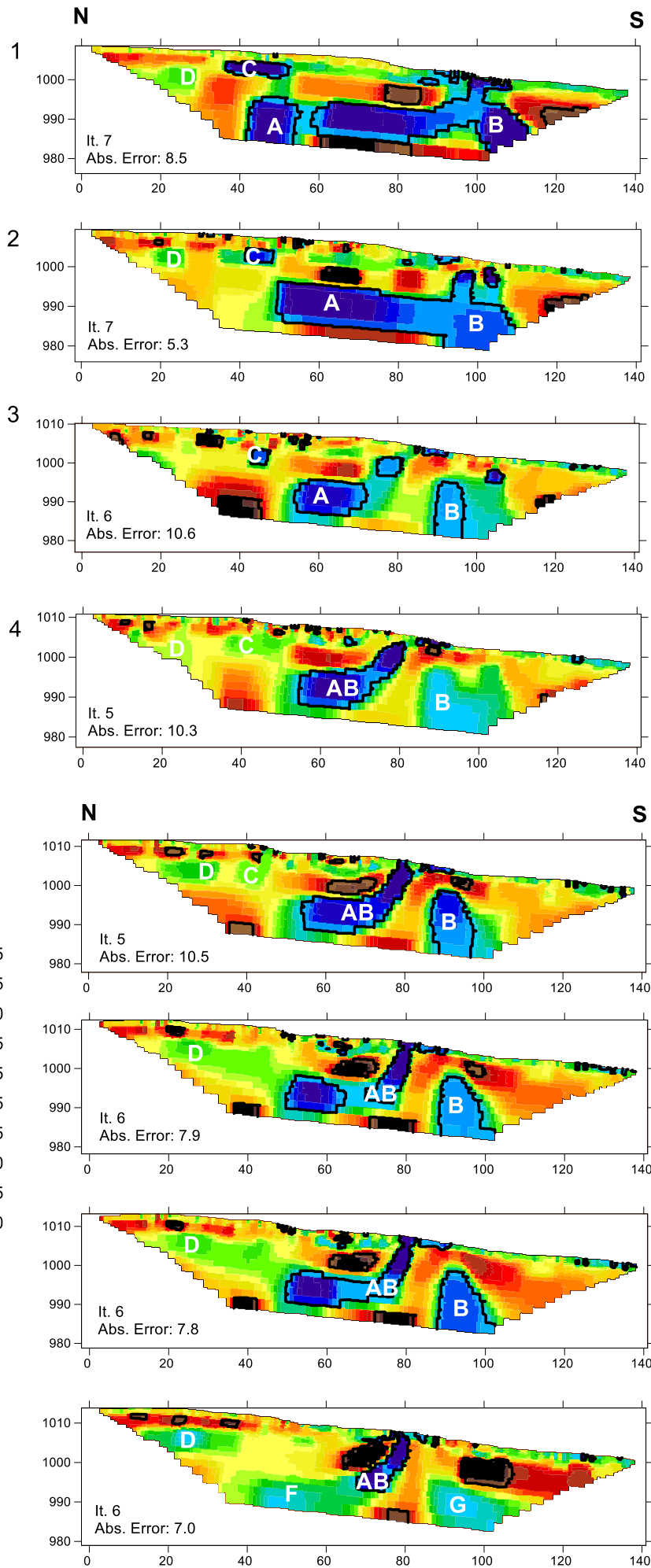
# ERT\_7



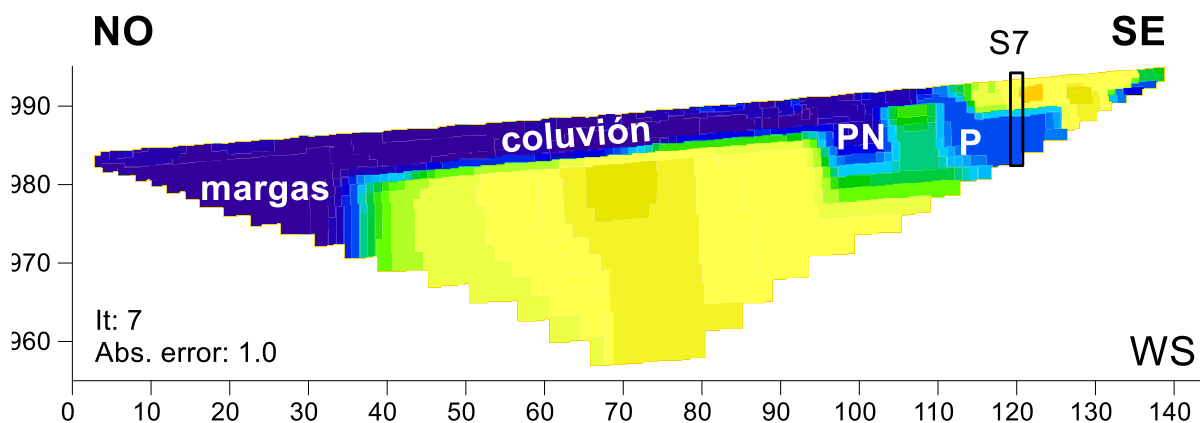
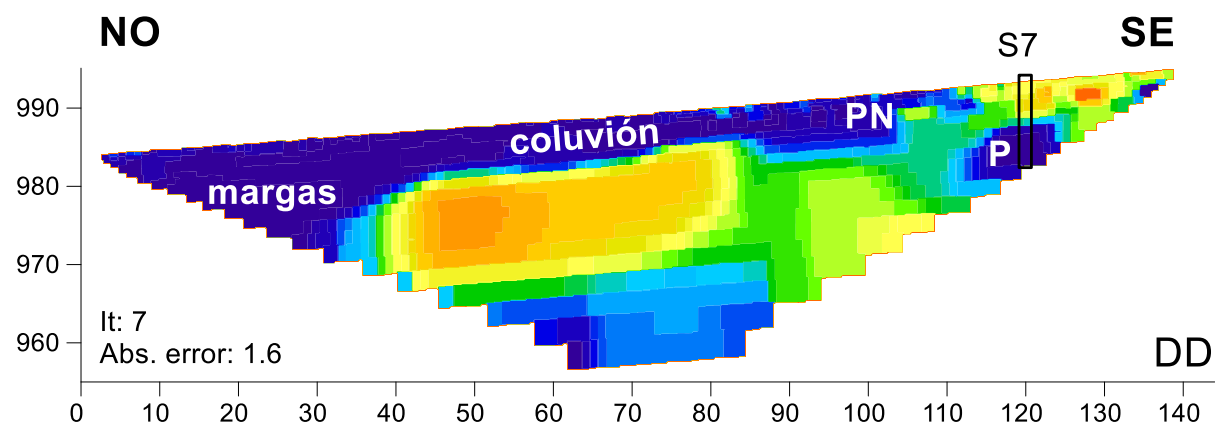
# ERT\_8



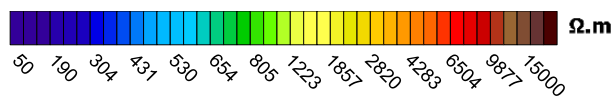
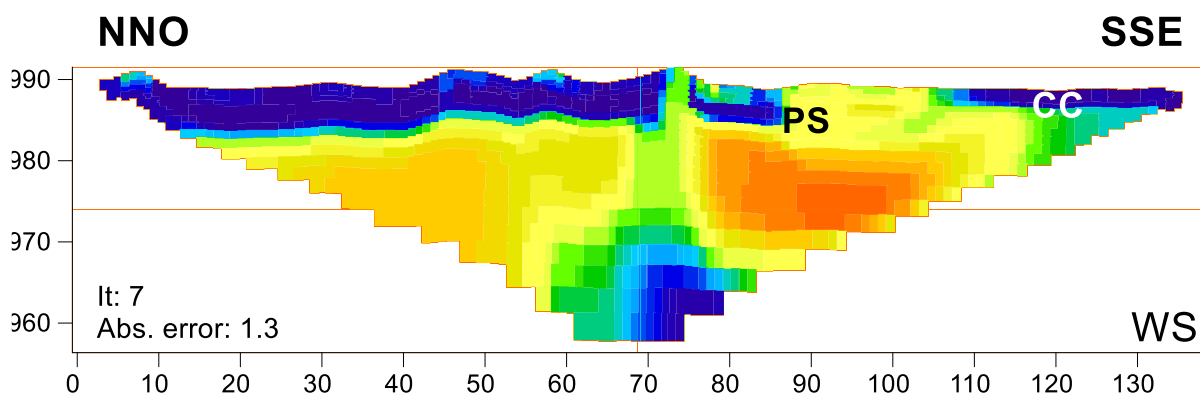
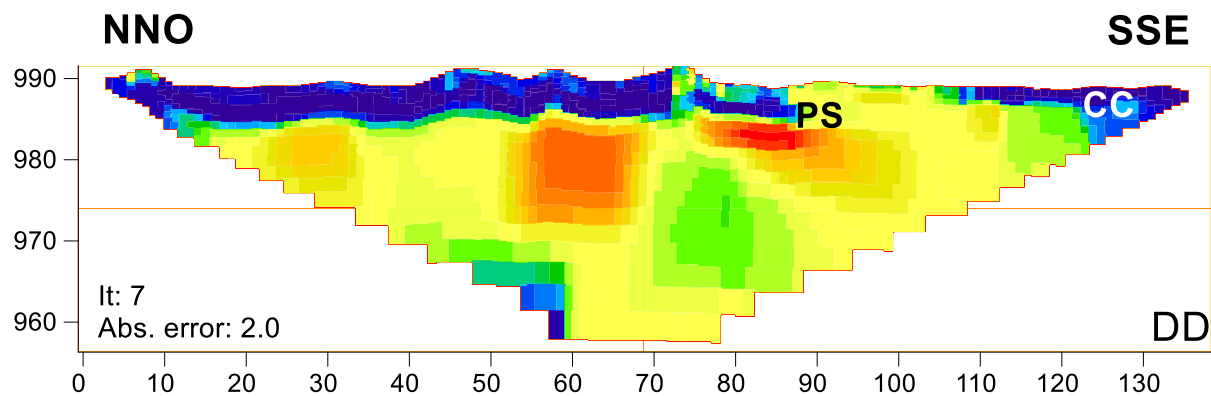
ERT\_M DD correspondientes a Bermejo et al., 2017 (Anexo I)



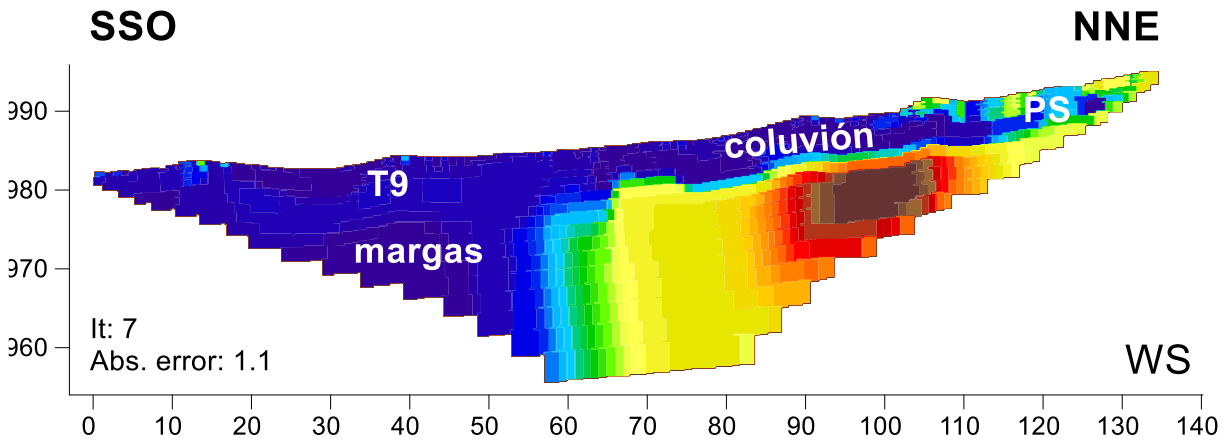
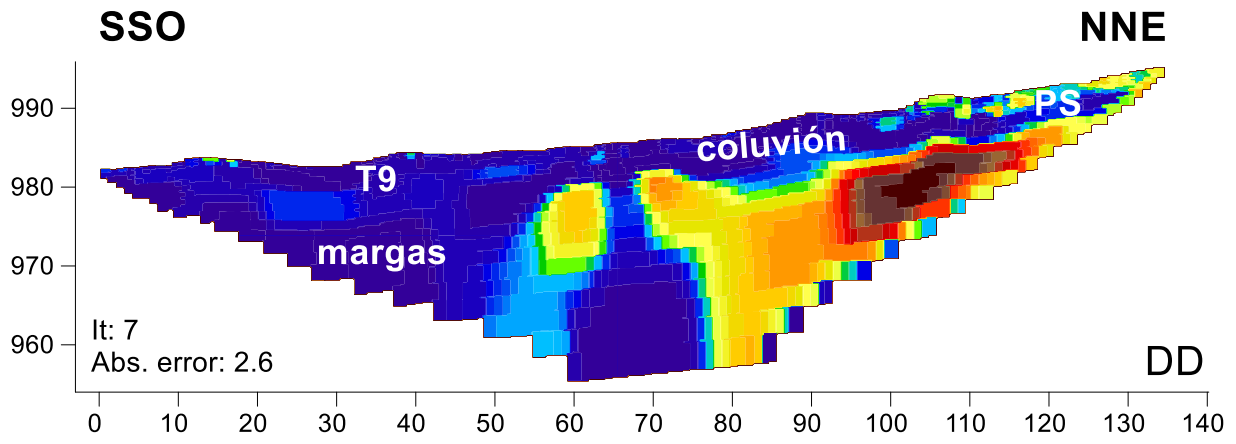
# ERT\_9



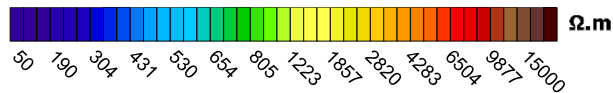
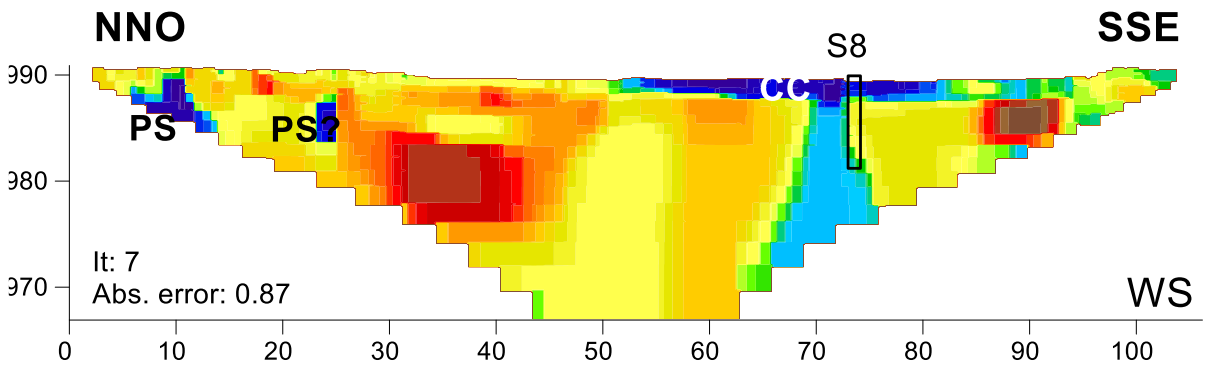
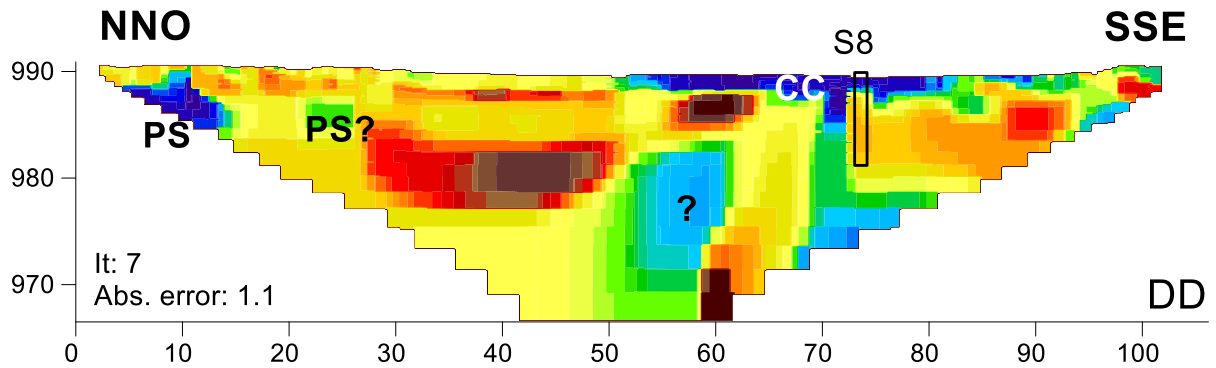
# ERT\_10



# ERT\_11

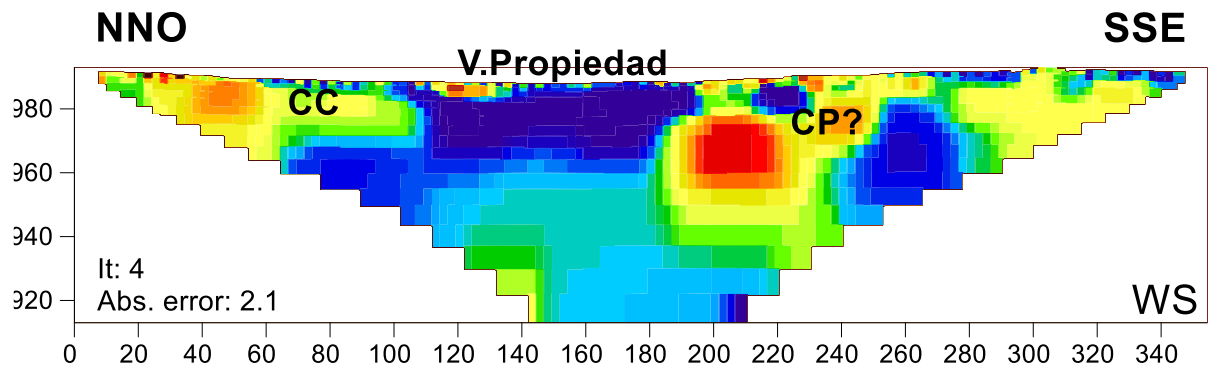
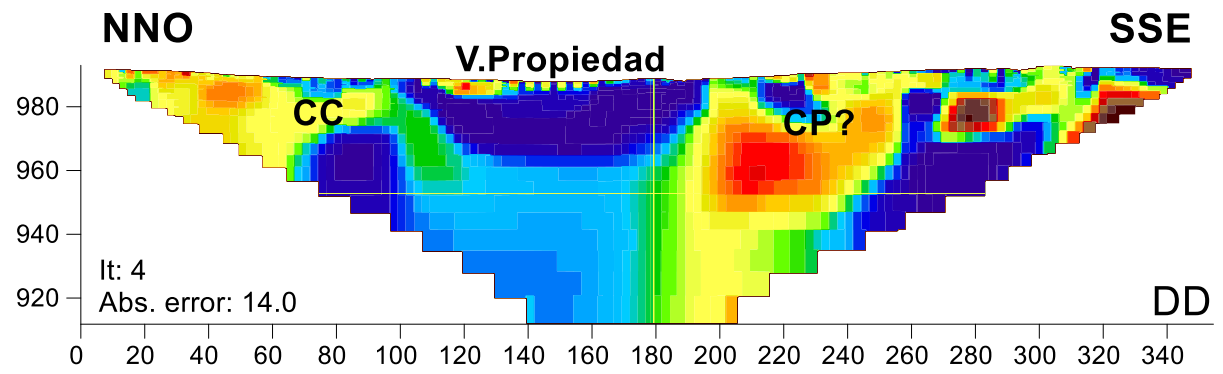


# ERT\_12

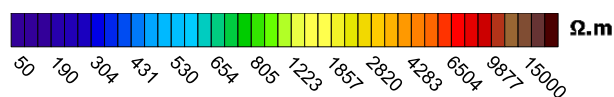
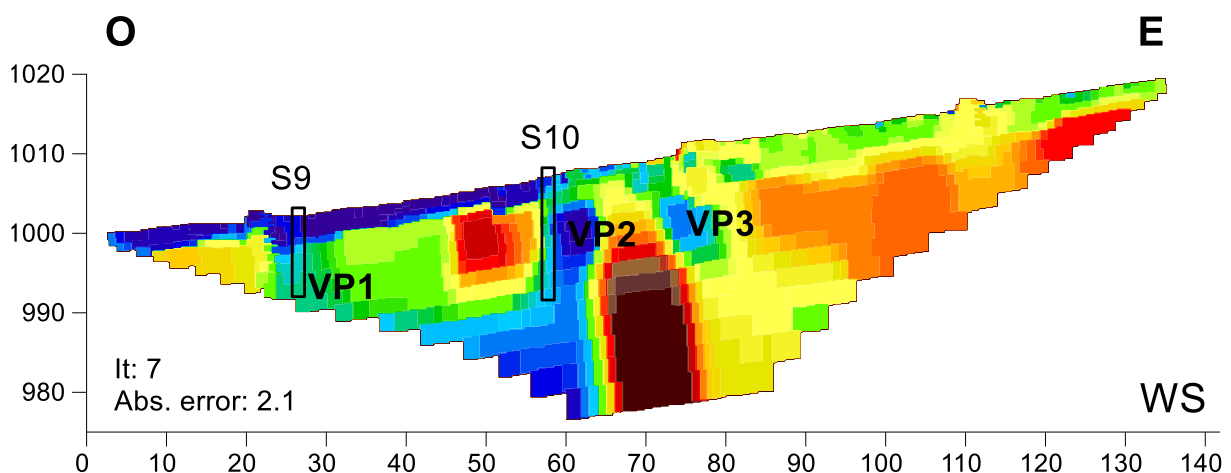
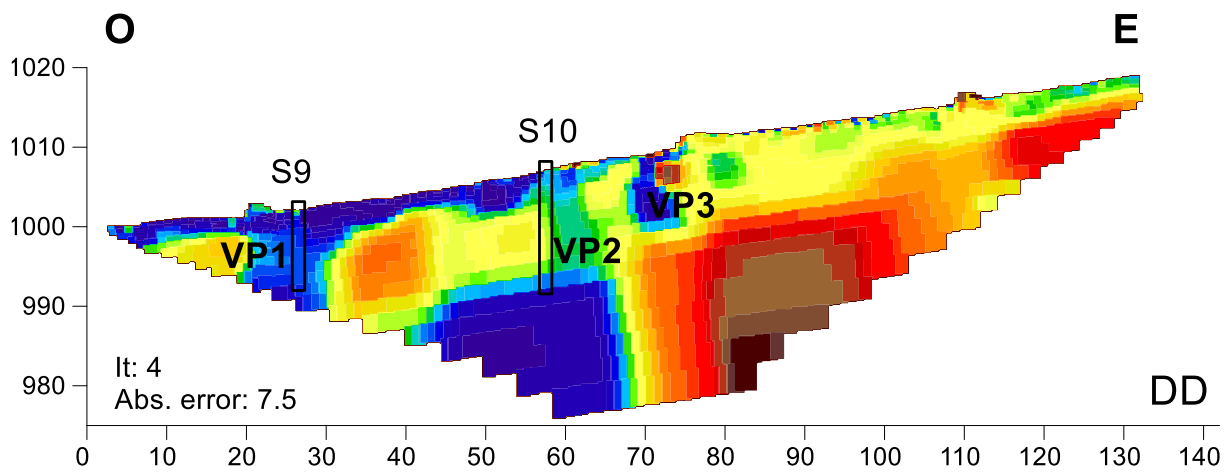




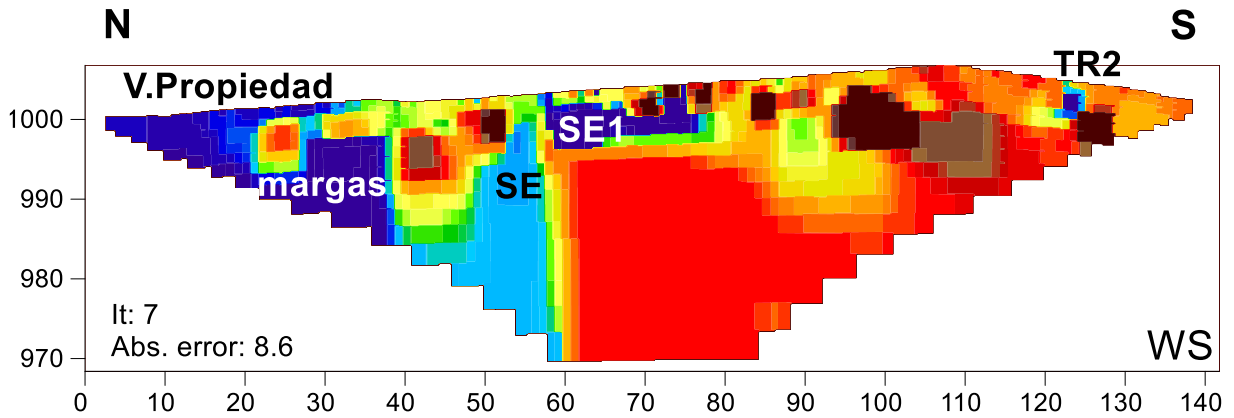
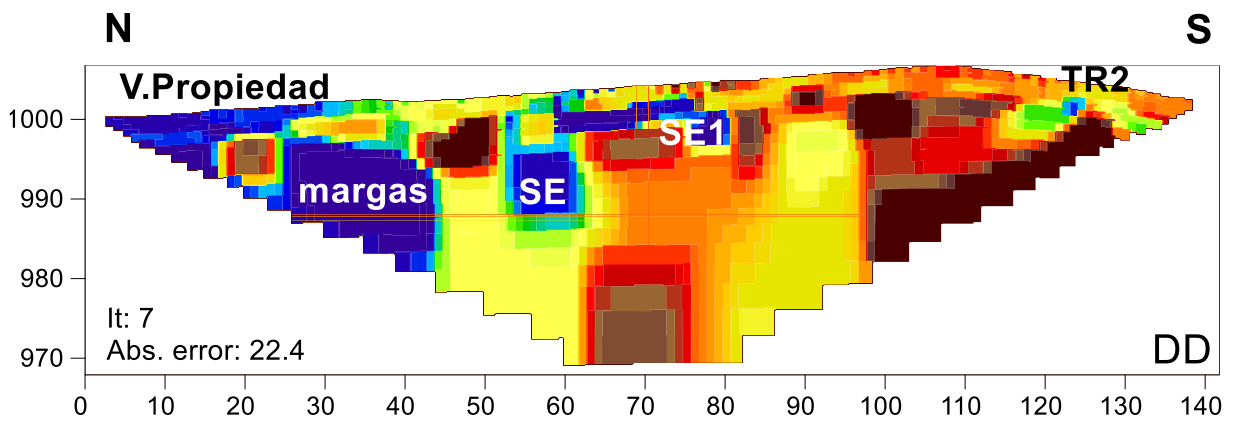
# ERT\_13



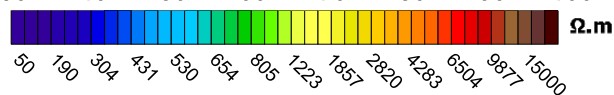
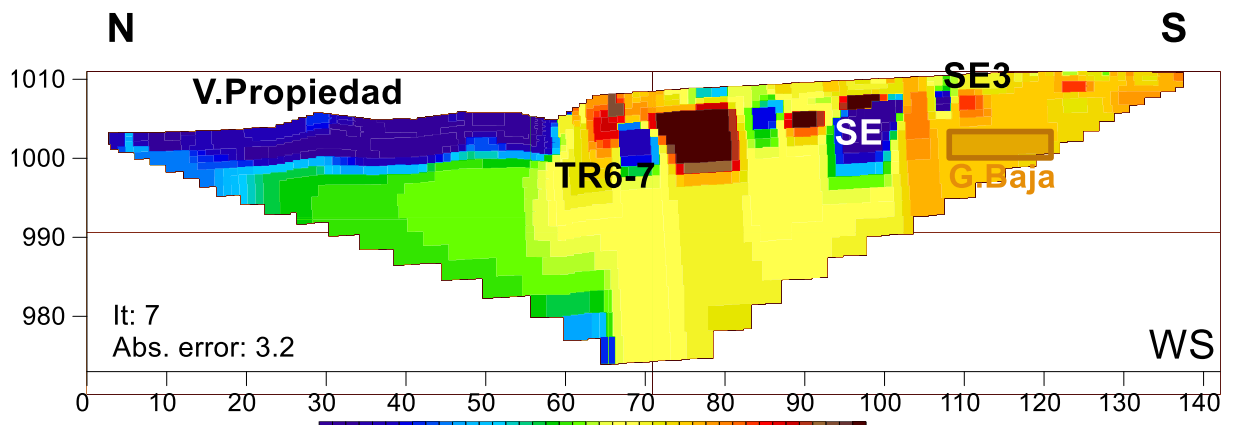
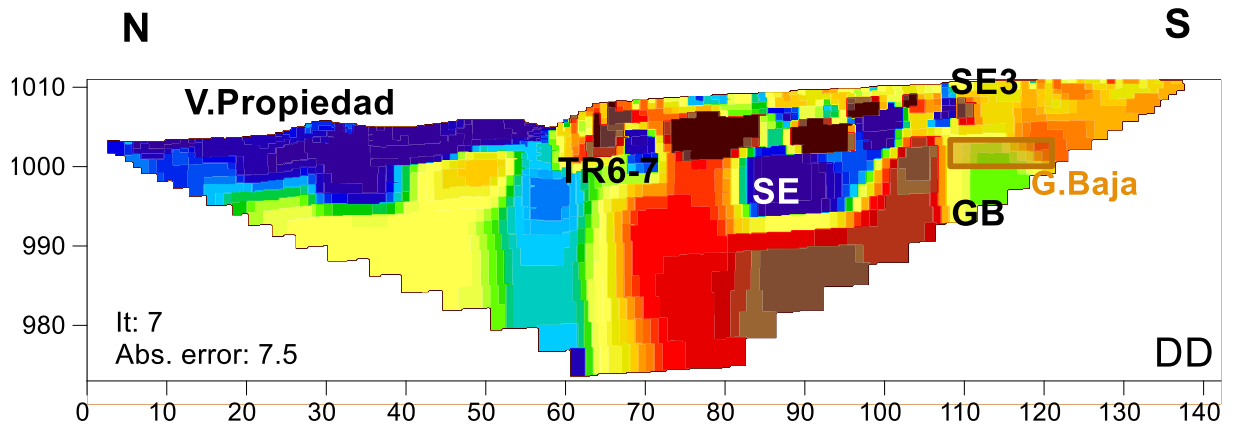
# ERT\_14



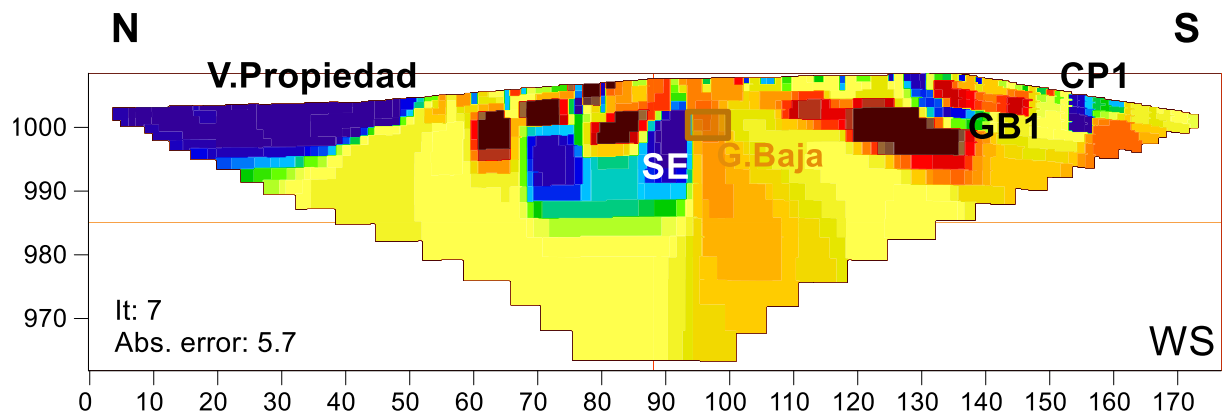
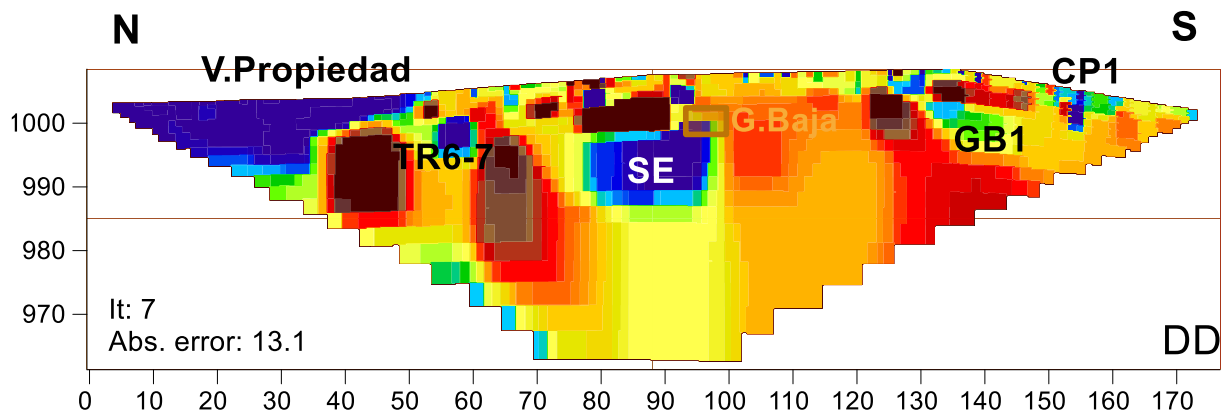
# ERT\_15



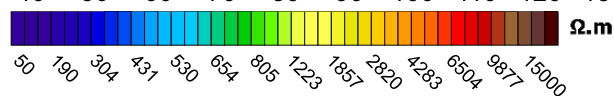
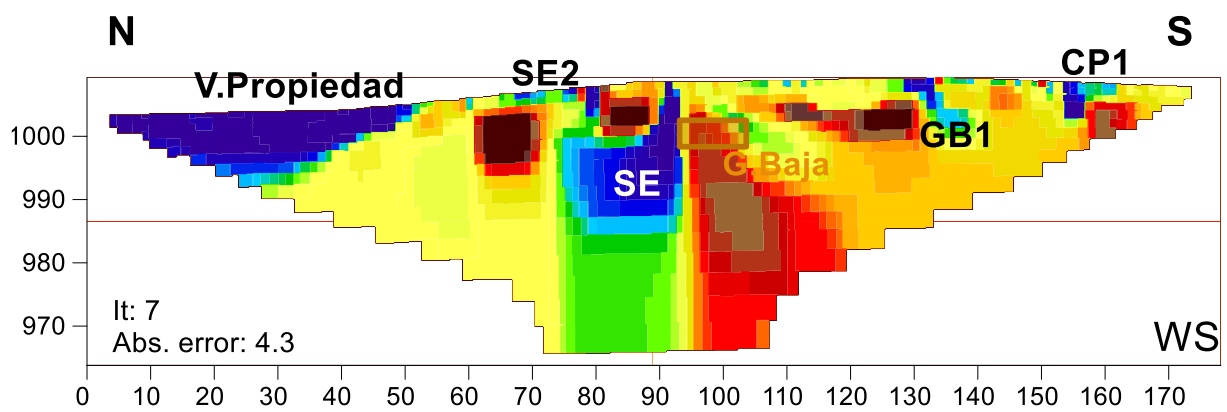
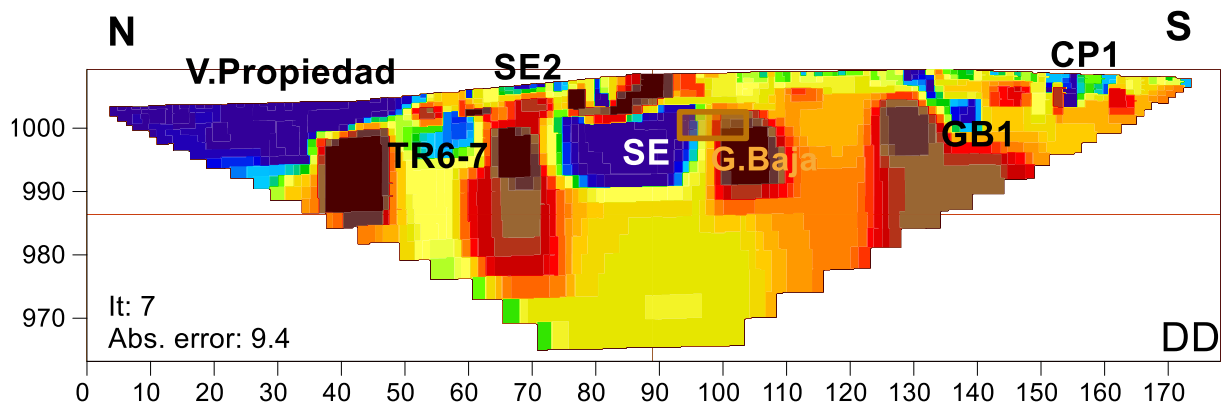
# ERT\_16



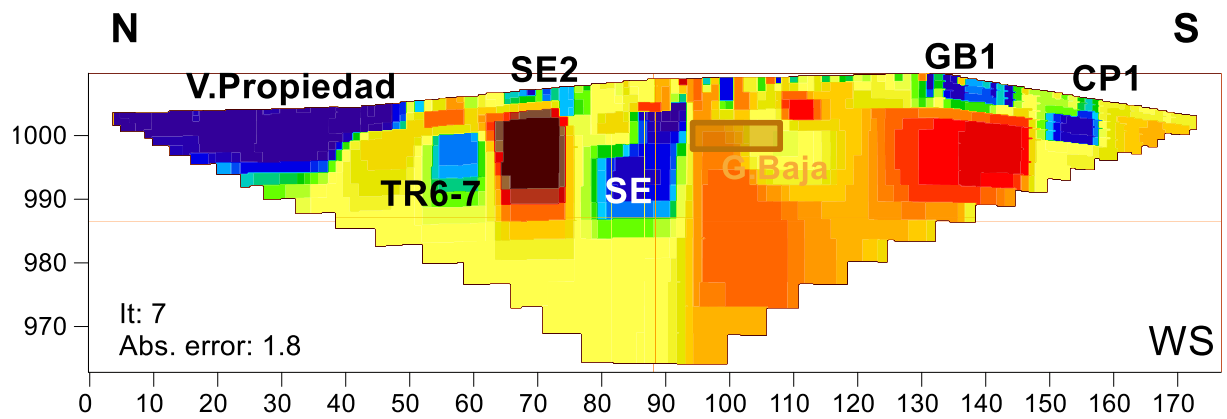
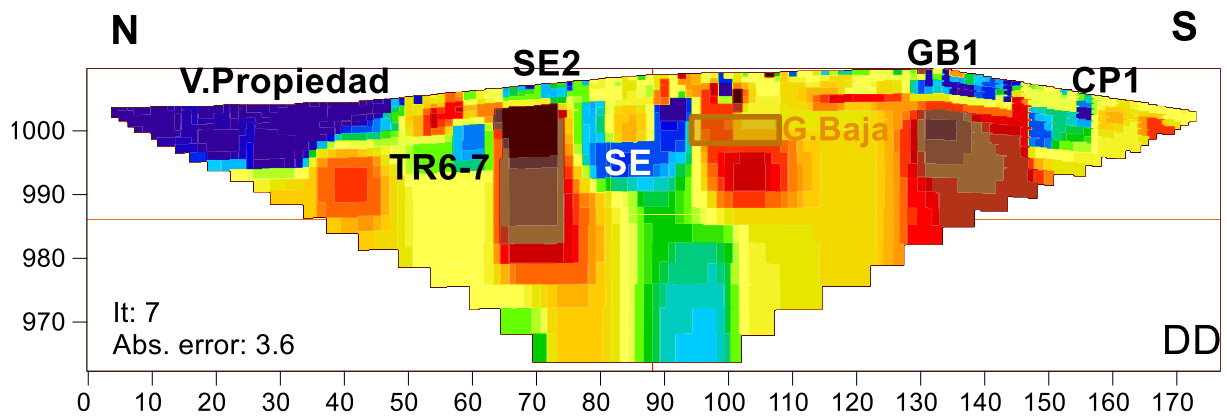
### ERT\_17



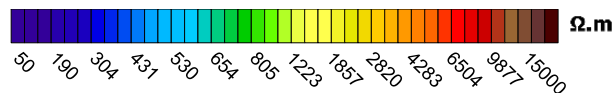
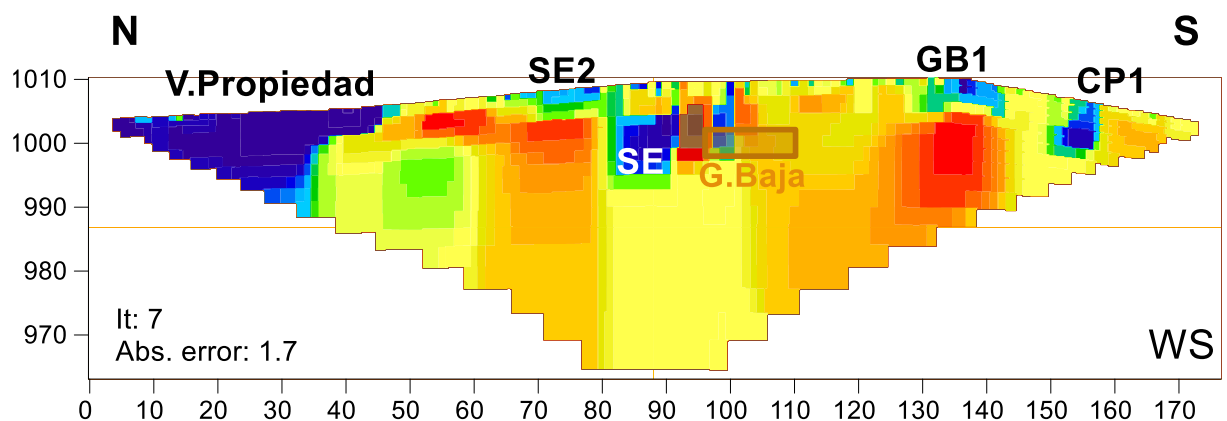
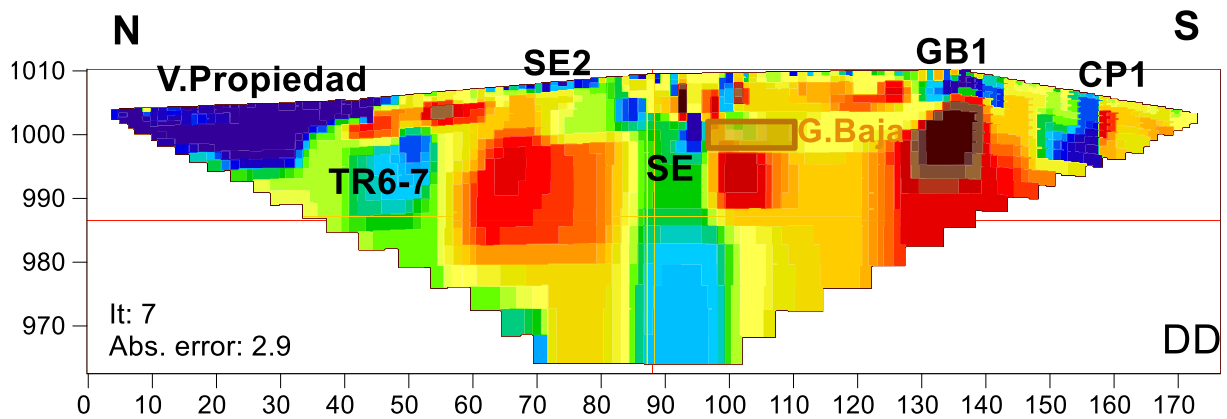
### ERT\_18



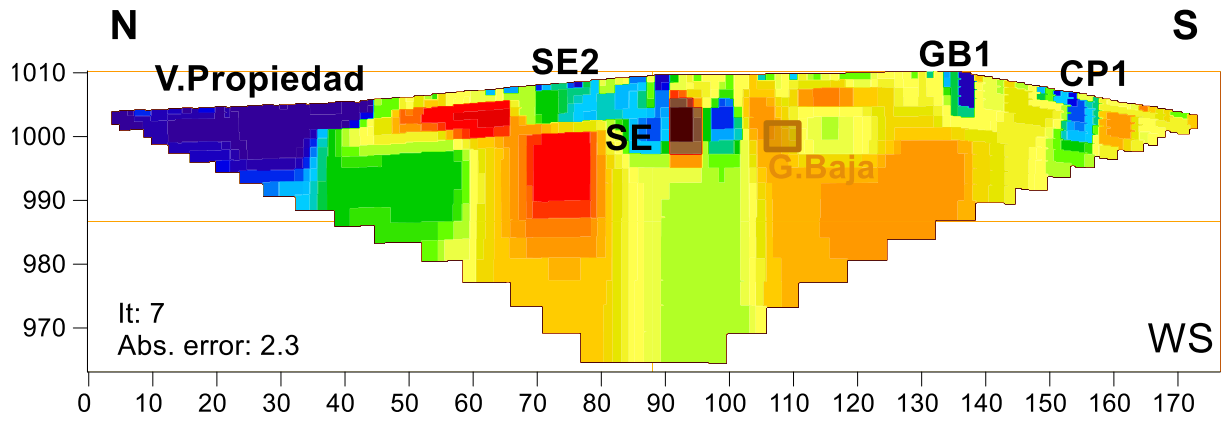
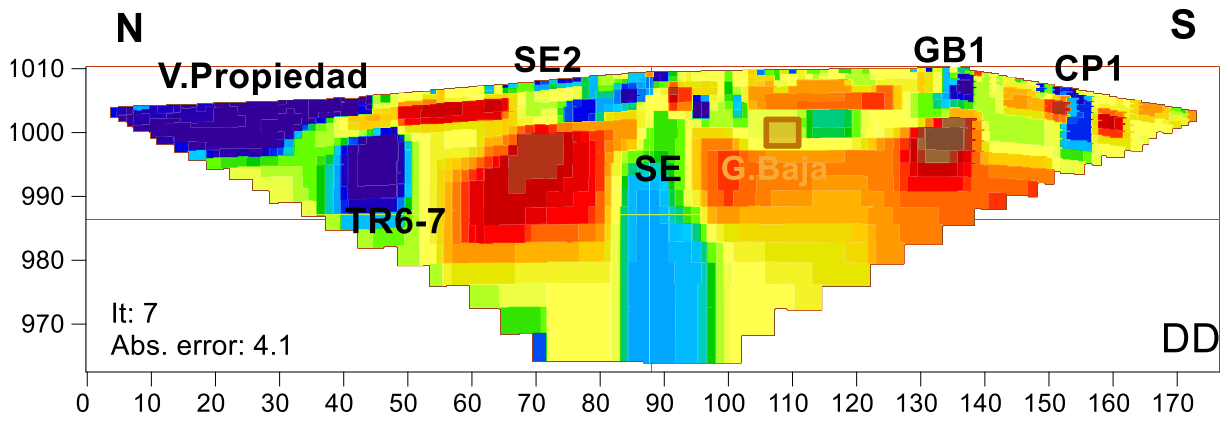
# ERT\_19



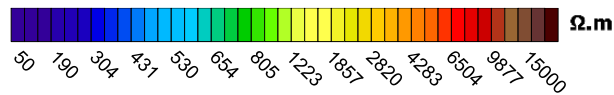
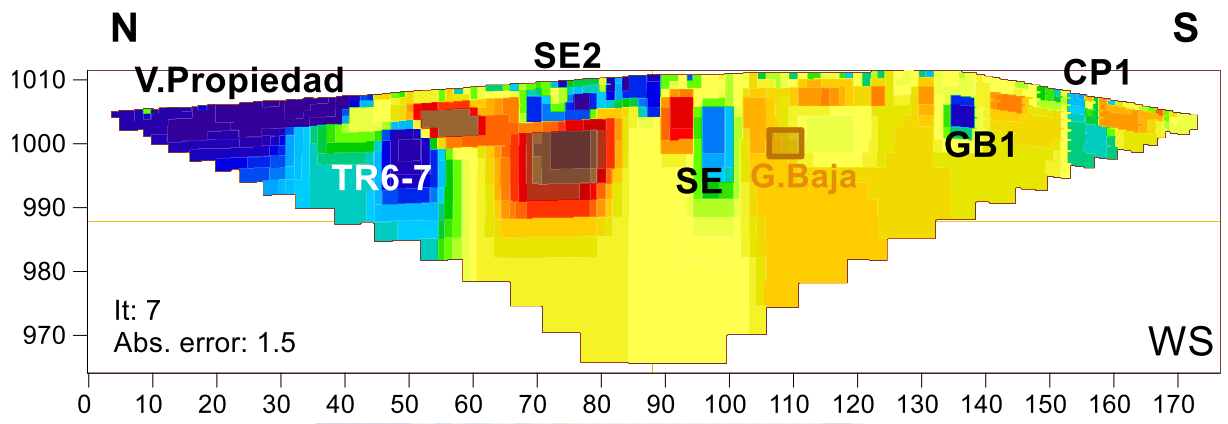
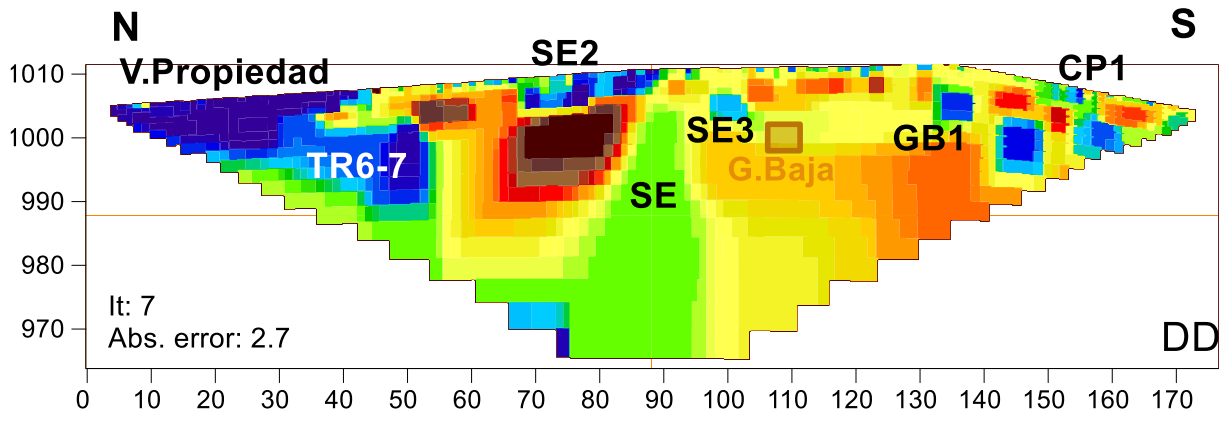
# ERT\_20



### ERT\_21

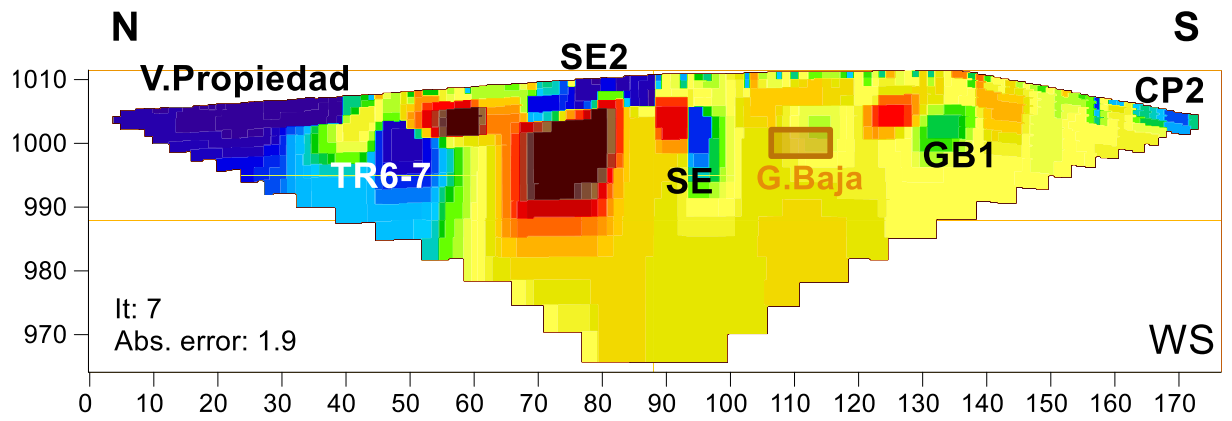
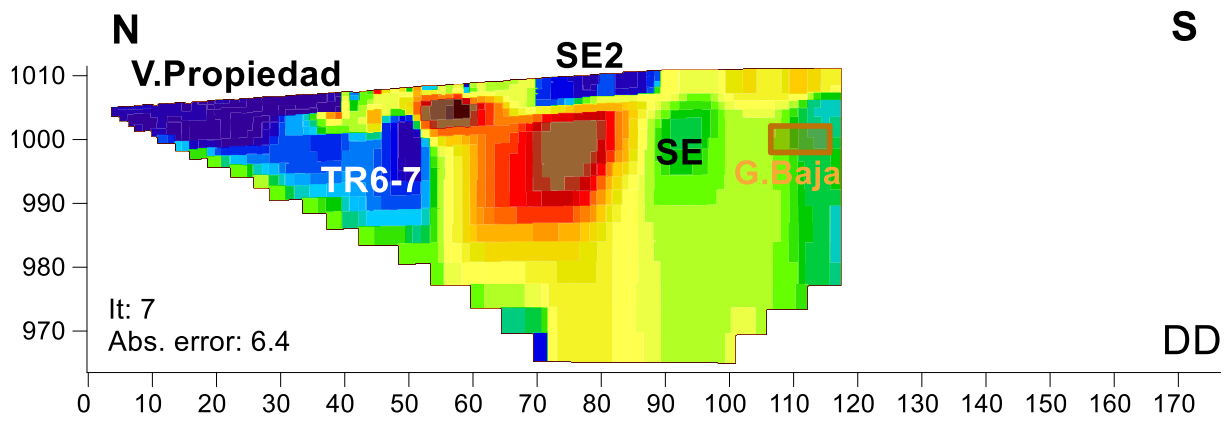


### ERT\_22

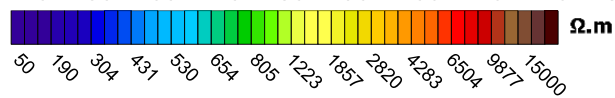
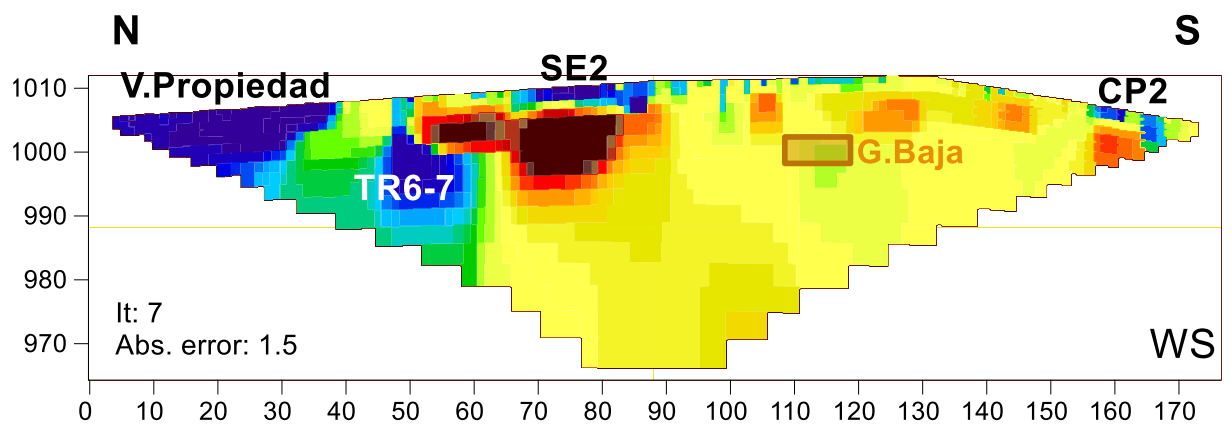
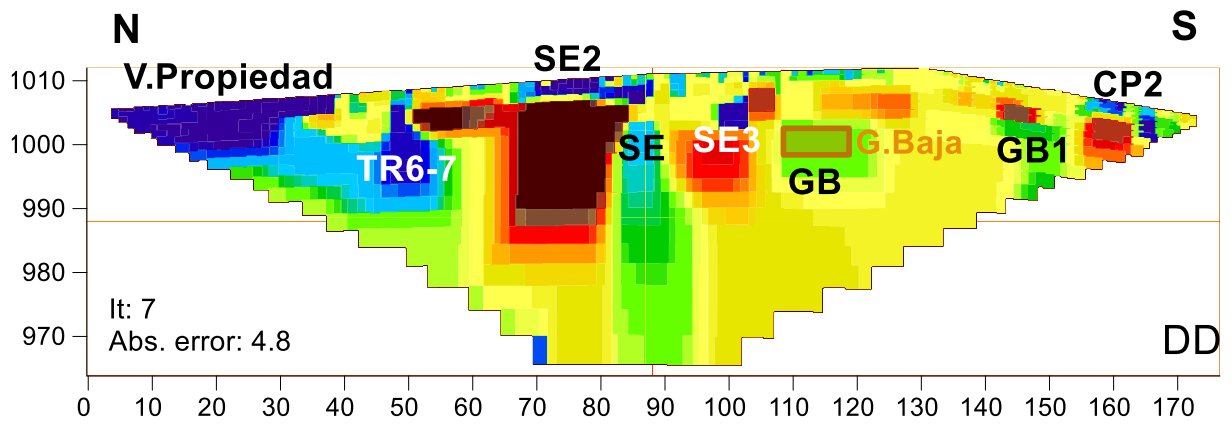




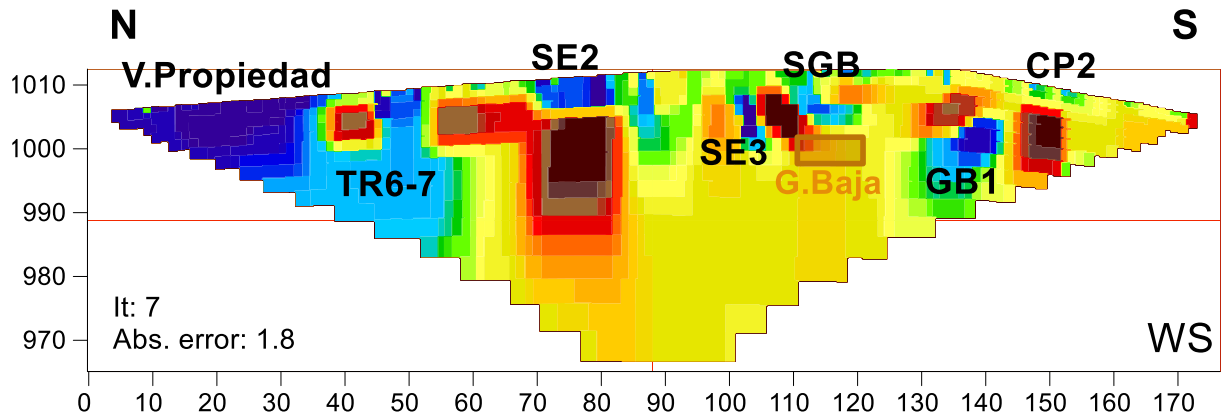
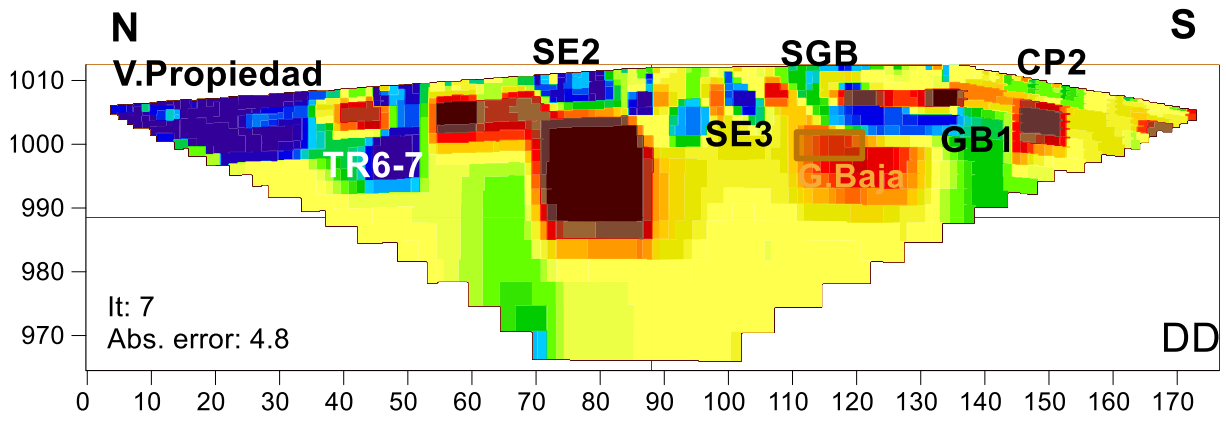
### ERT\_23



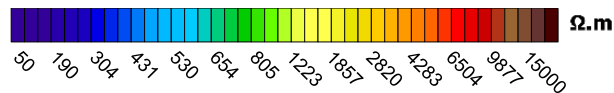
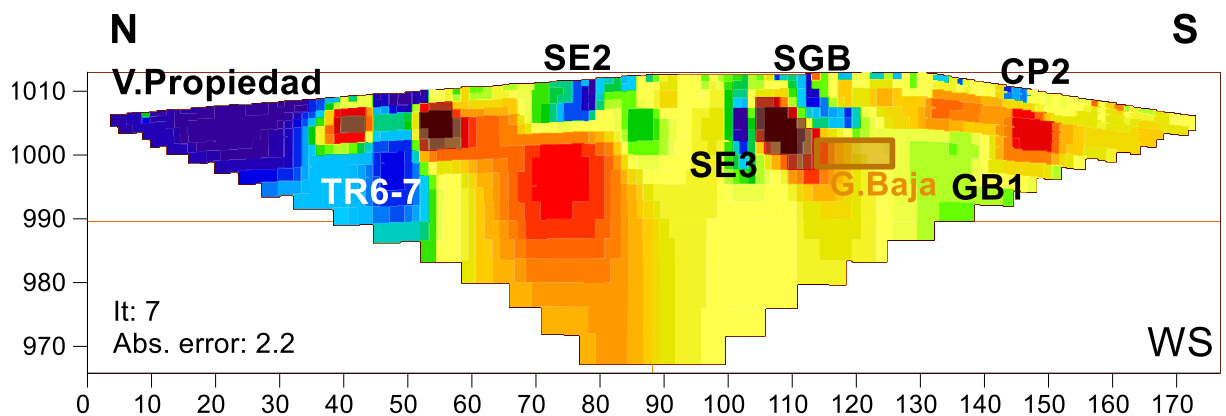
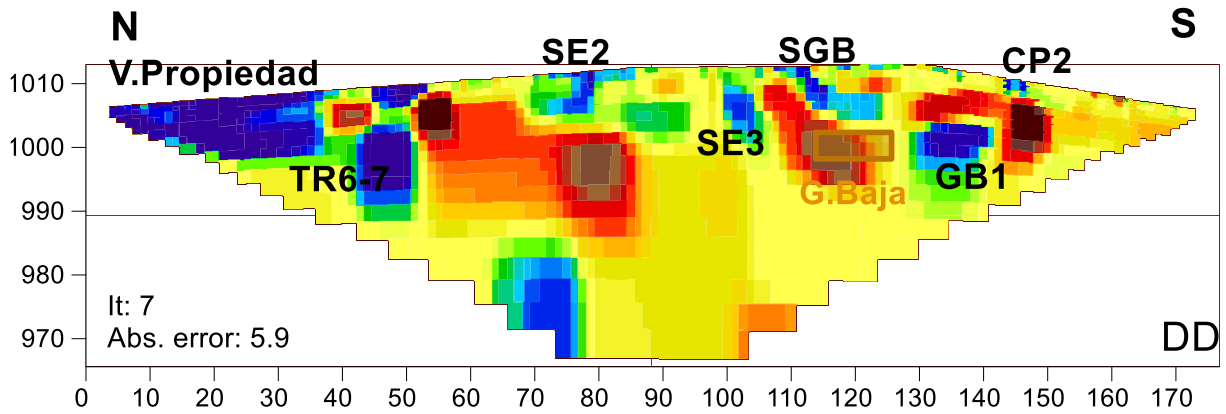
### ERT\_24



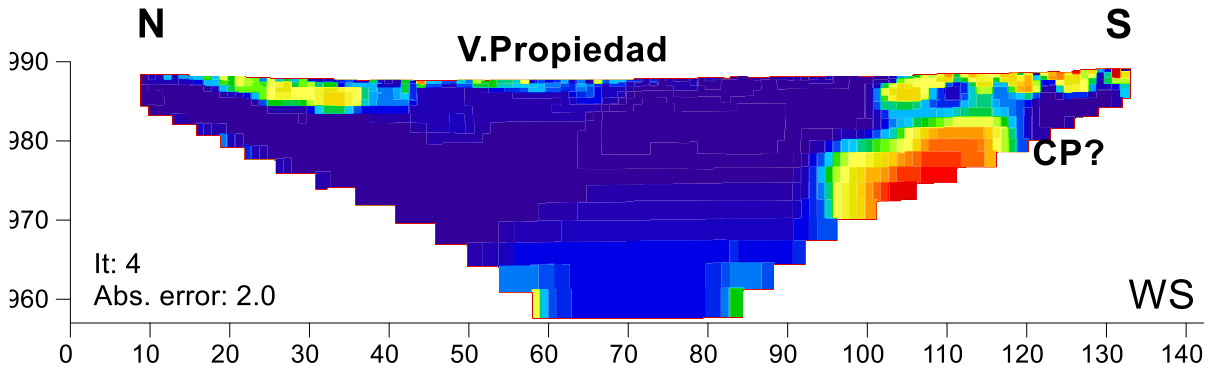
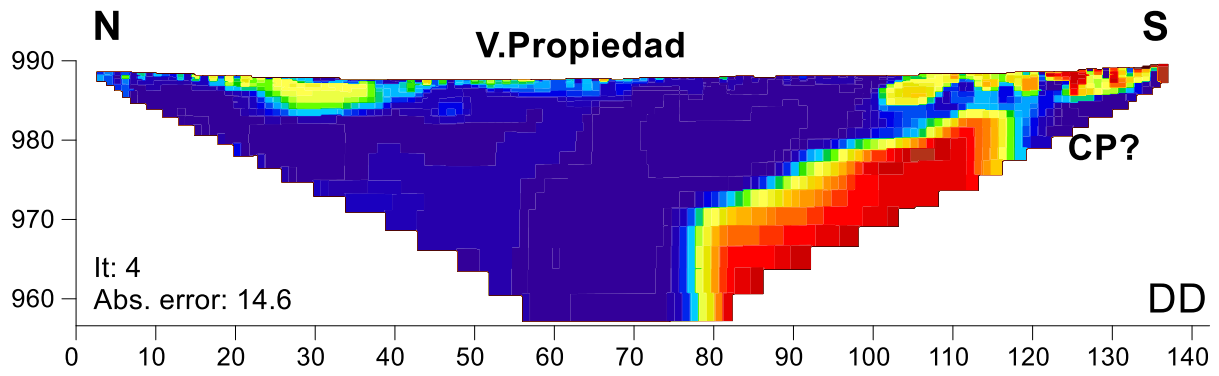
### ERT\_25



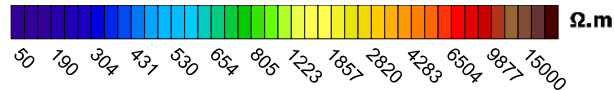
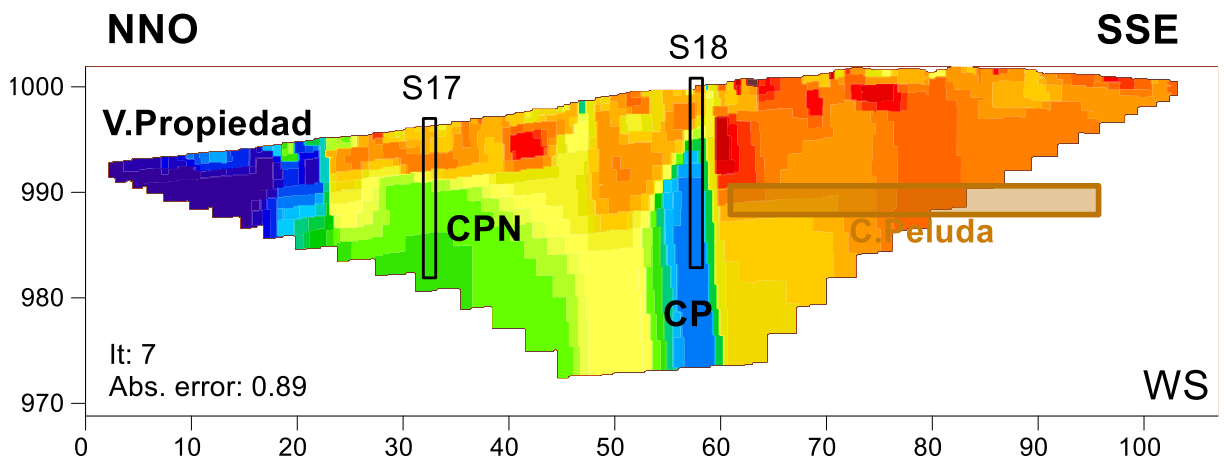
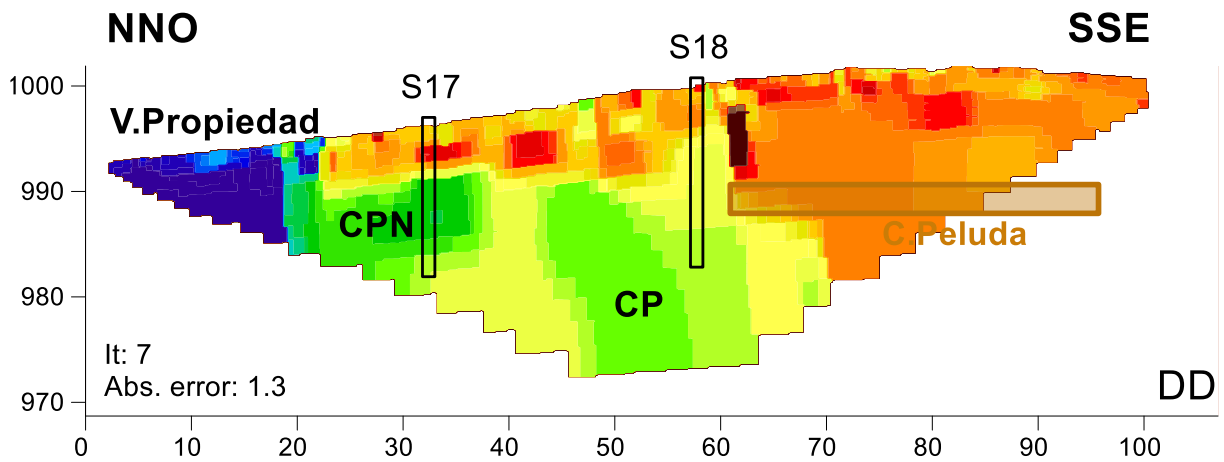
### ERT\_26



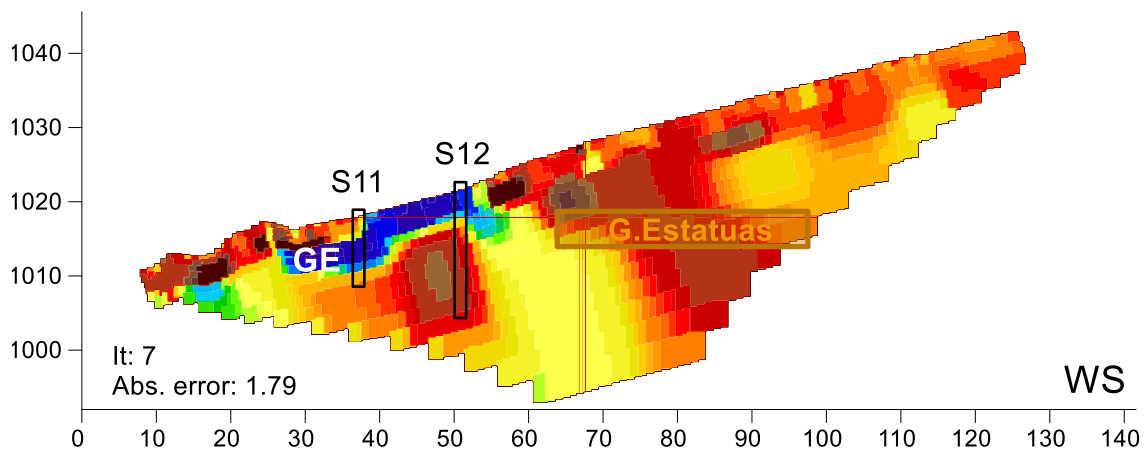
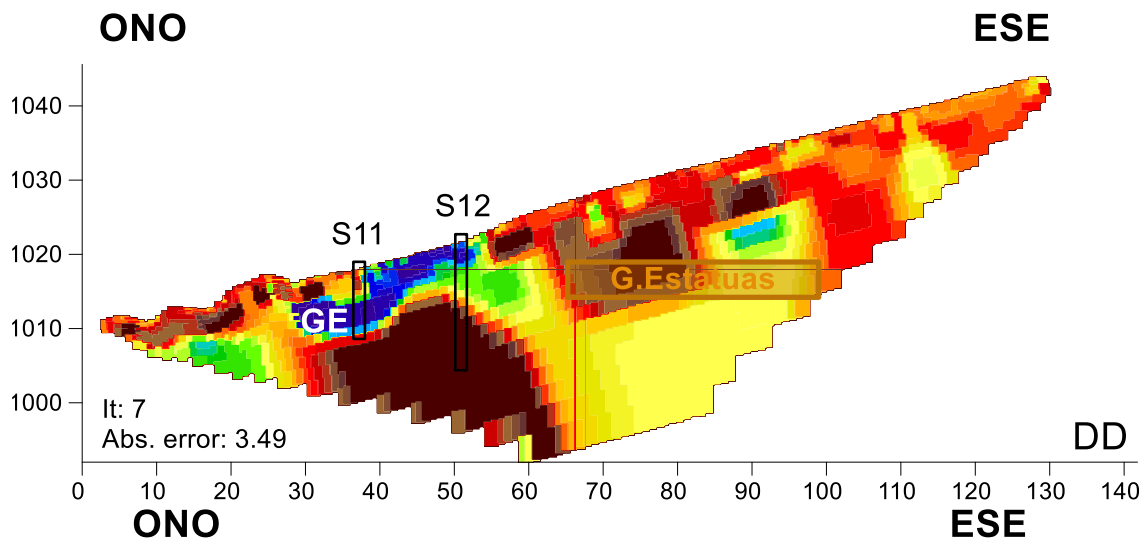
### ERT\_27



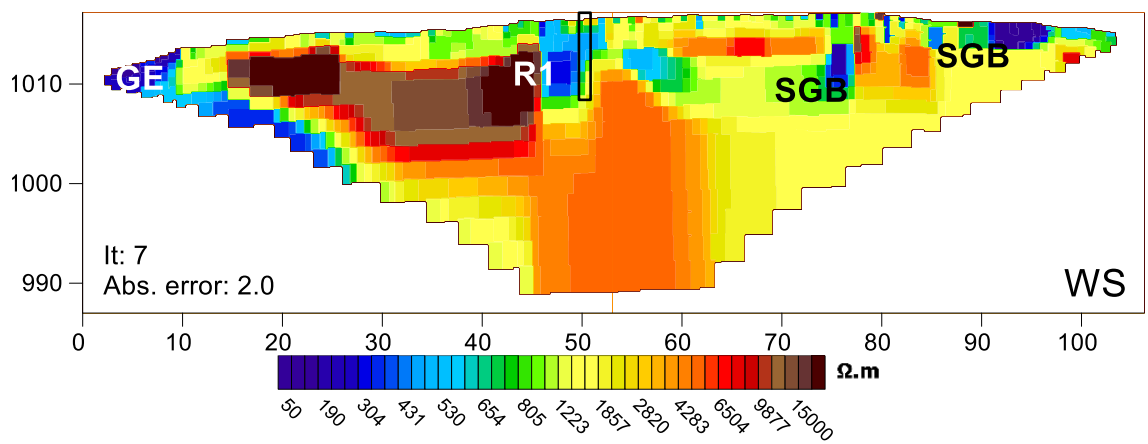
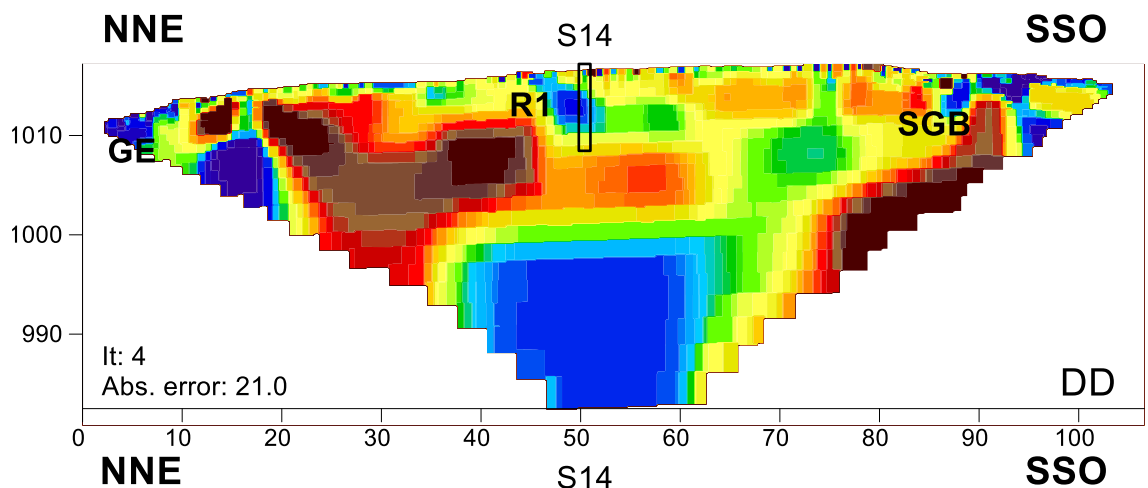
### ERT\_28



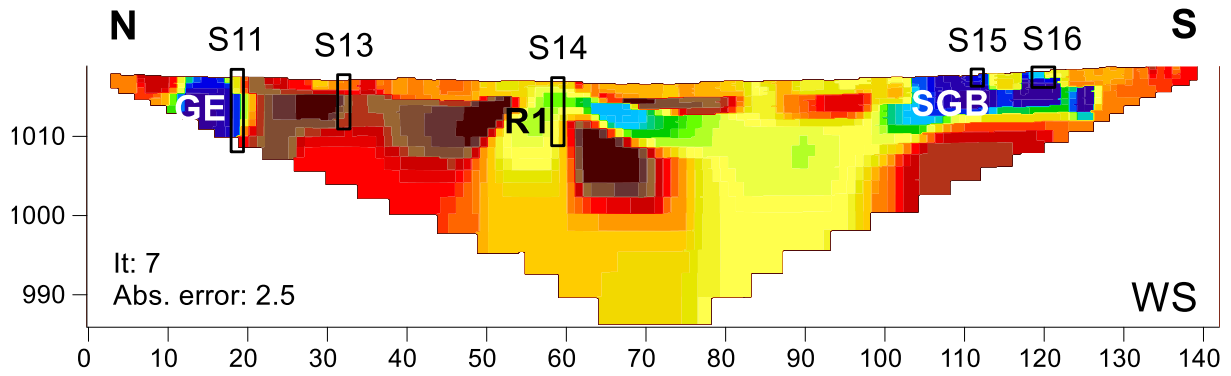
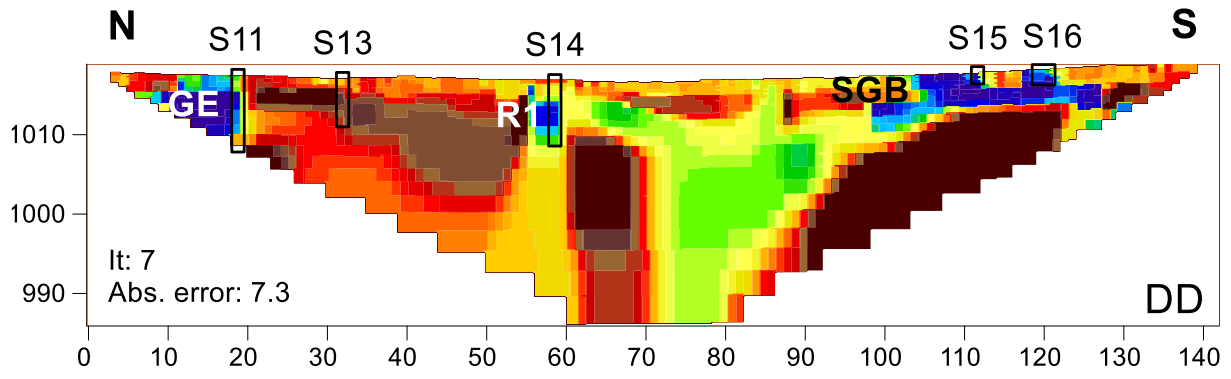
### ERT\_29



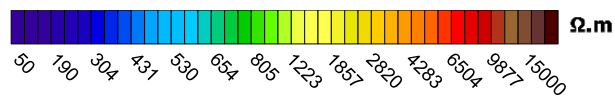
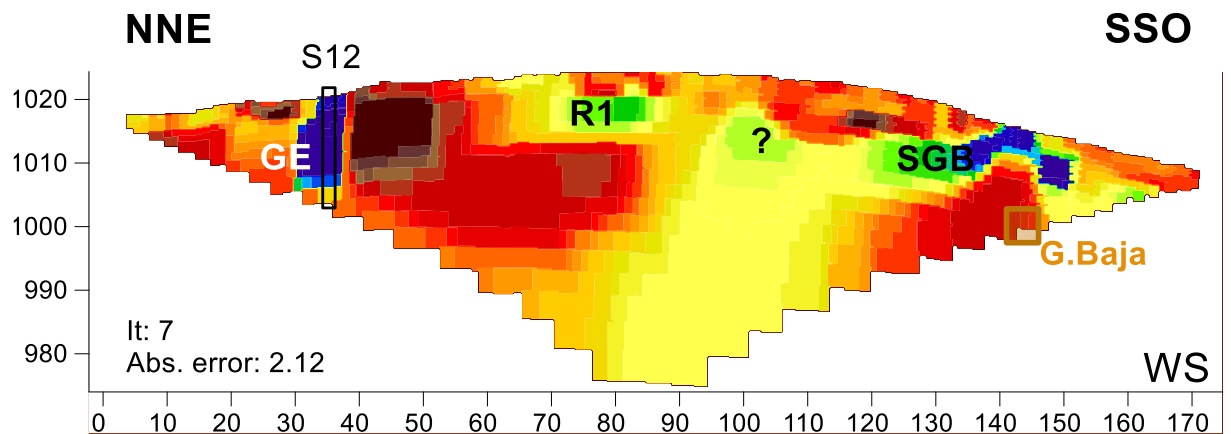
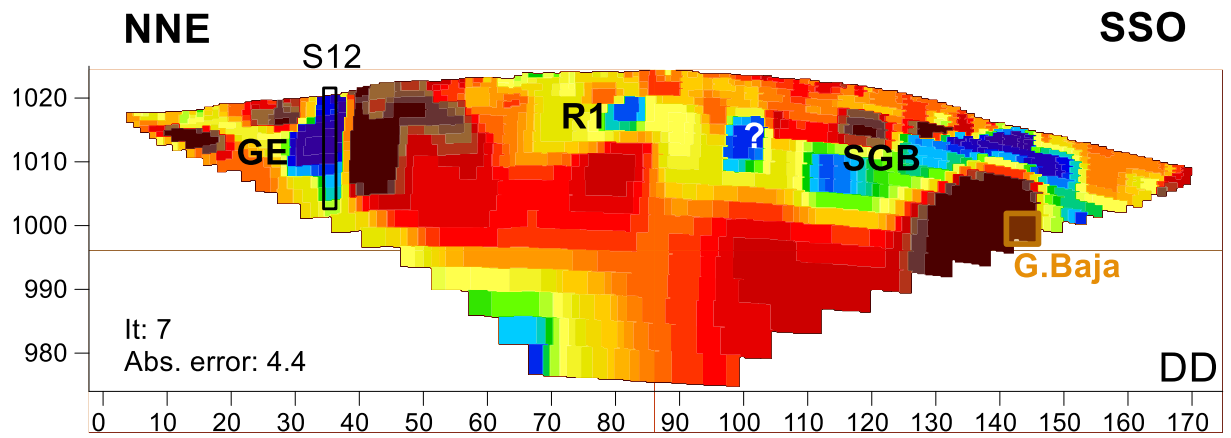
### ERT\_30



### ERT\_31

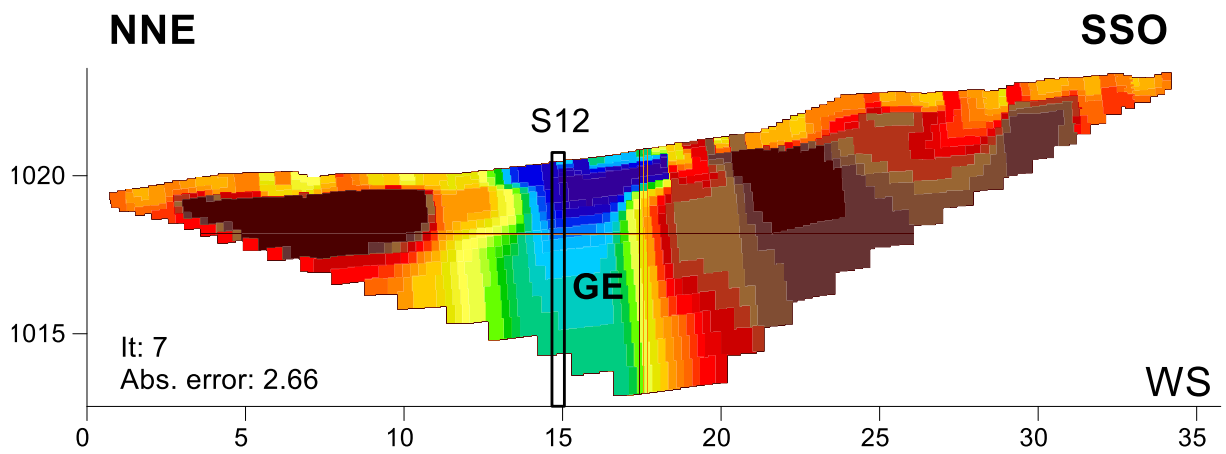
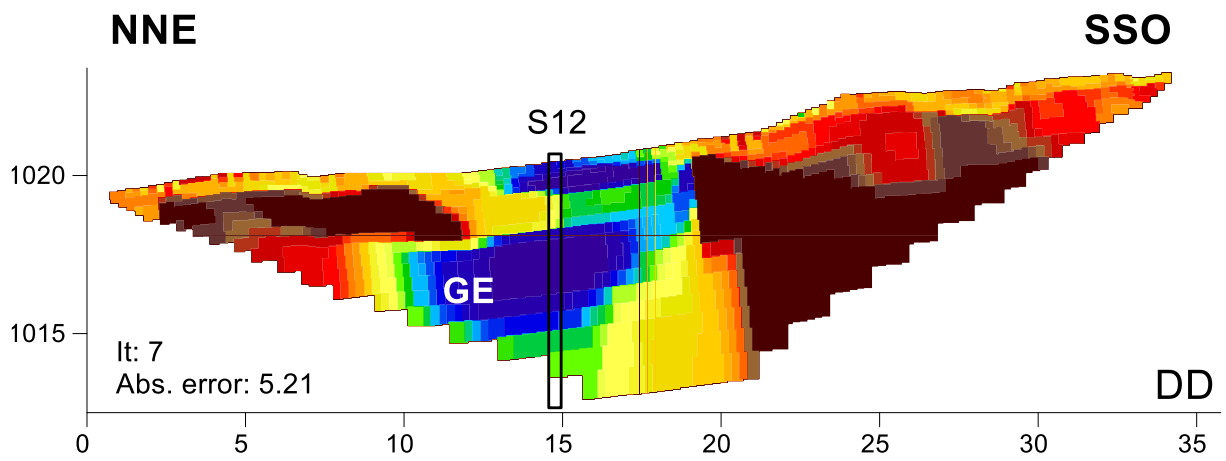


### ERT\_32

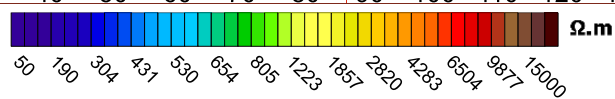
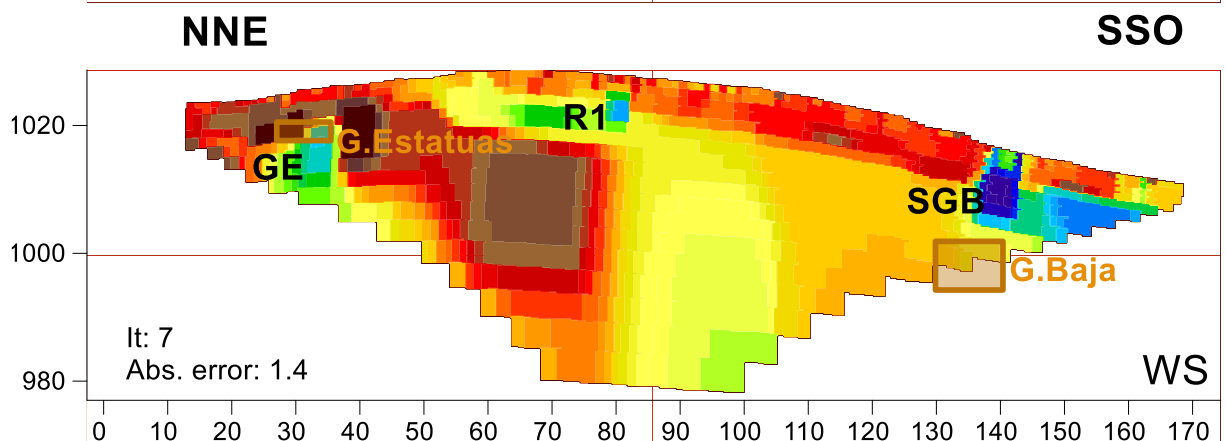
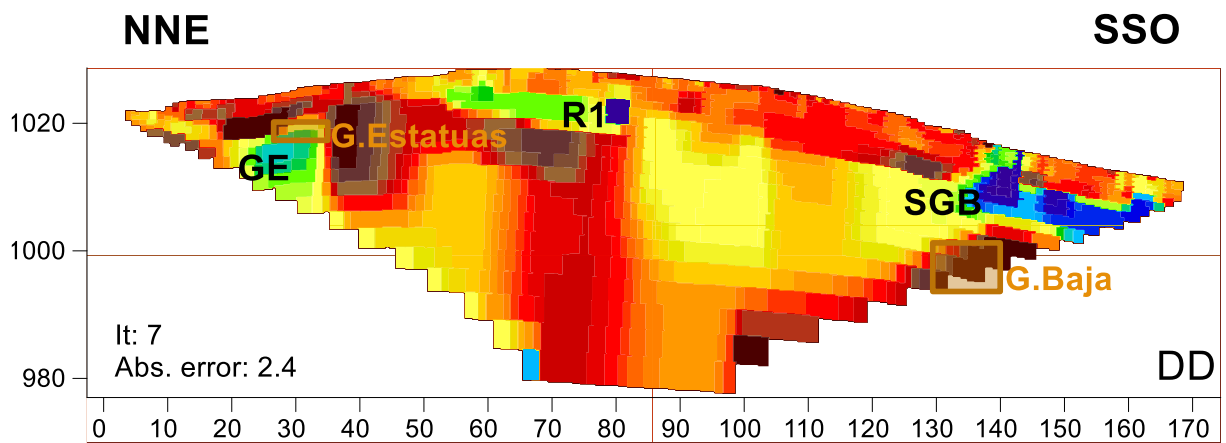




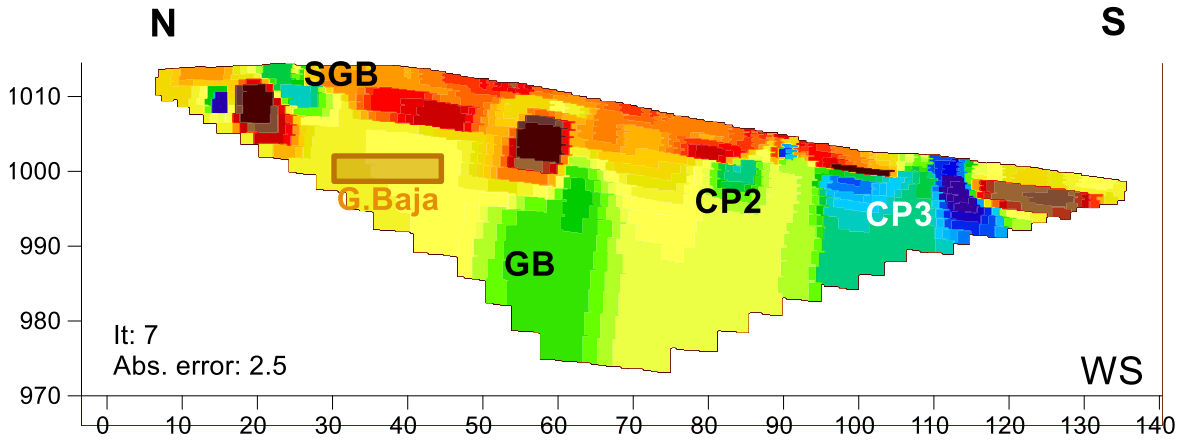
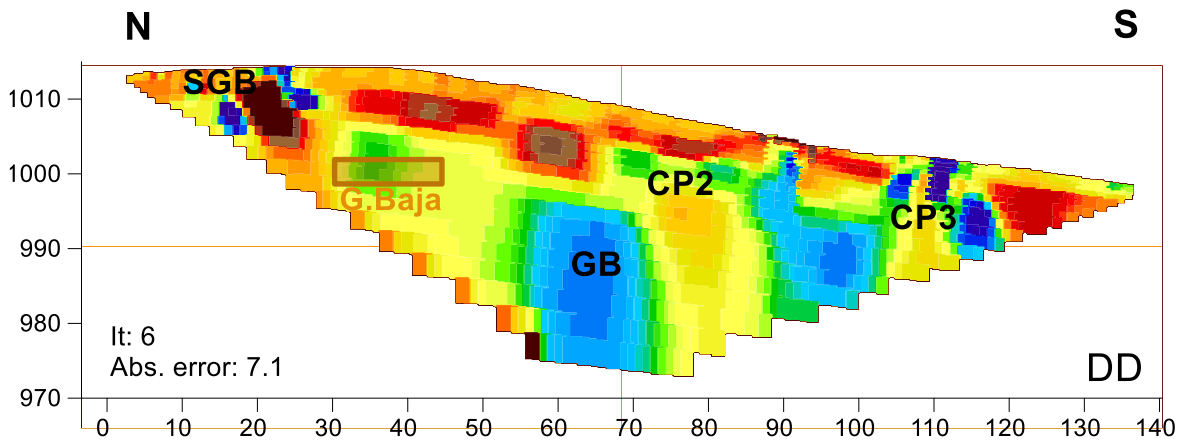
### ERT\_33



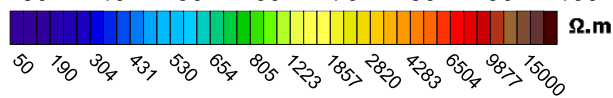
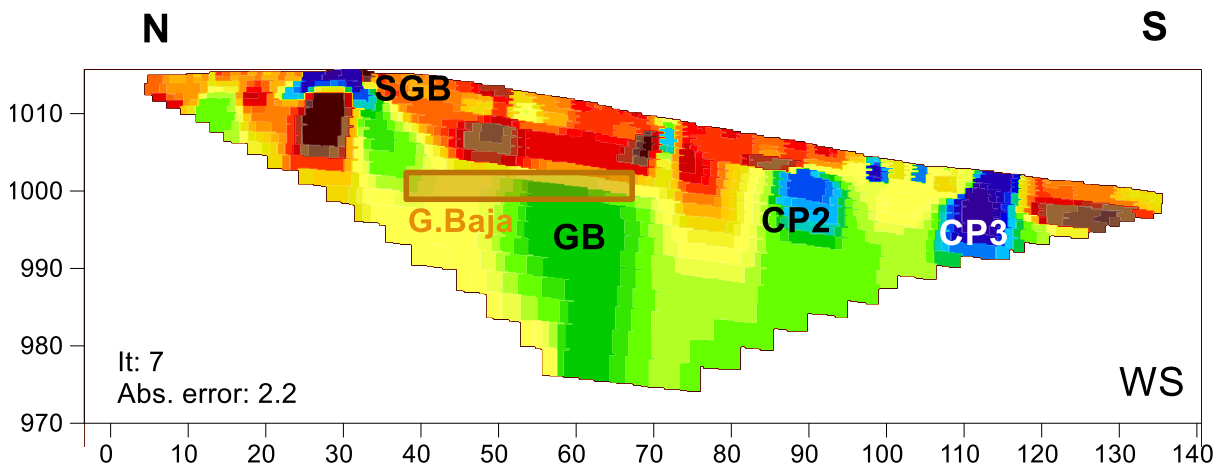
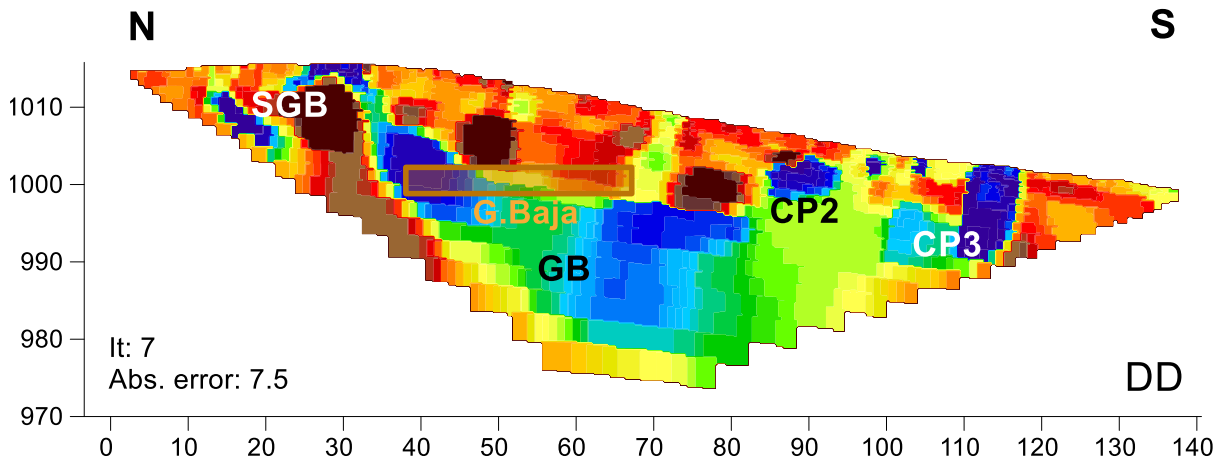
### ERT\_34



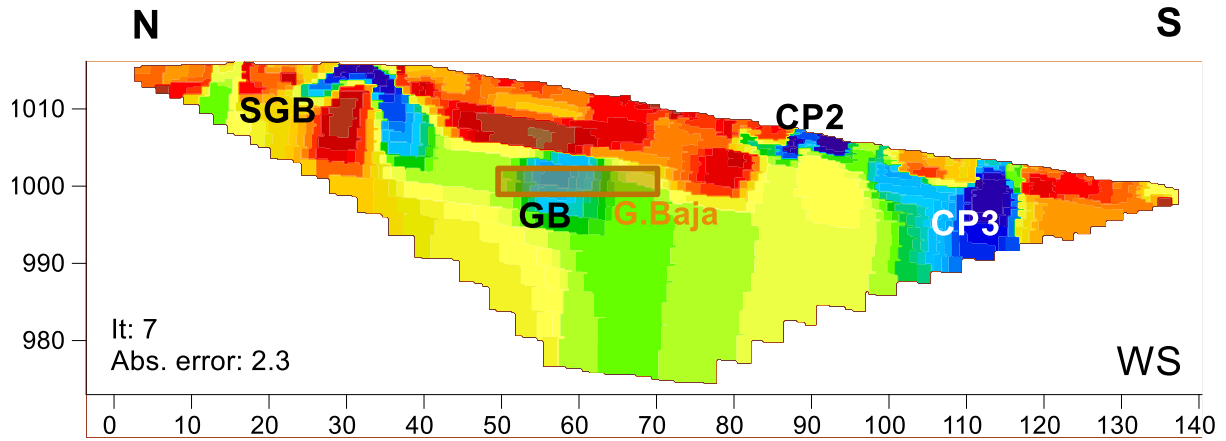
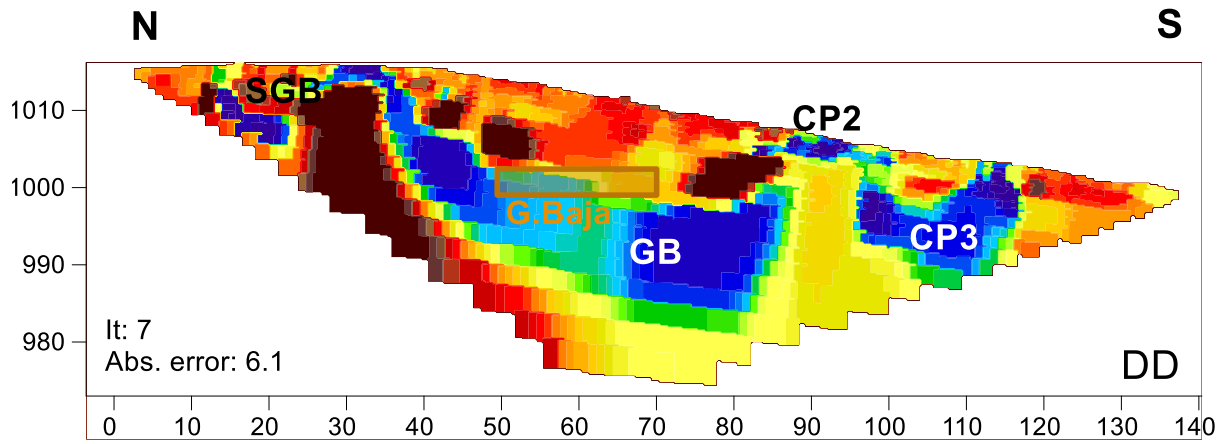
# ERT\_35



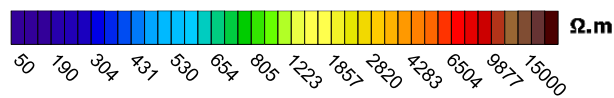
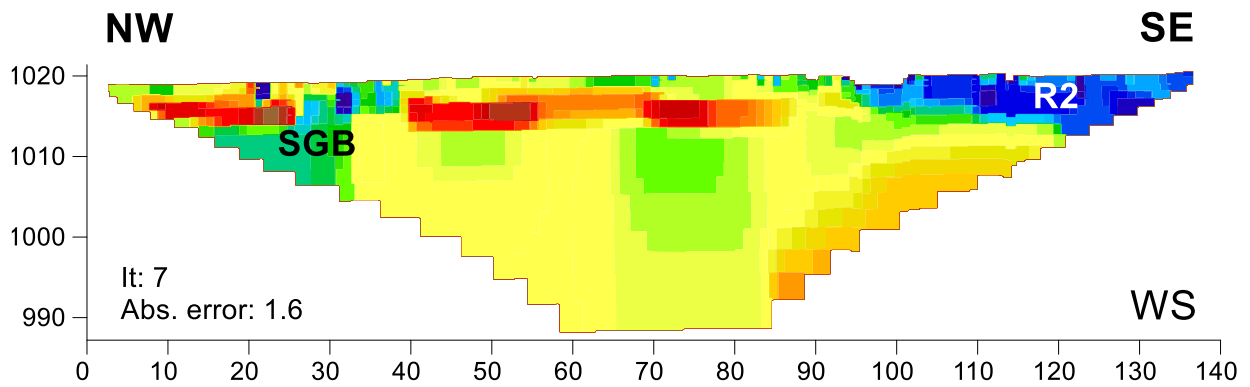
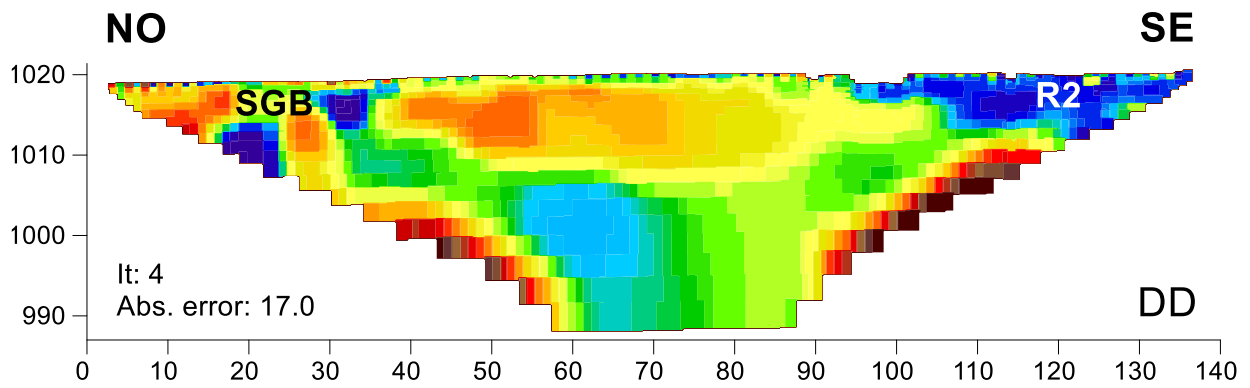
# ERT\_36



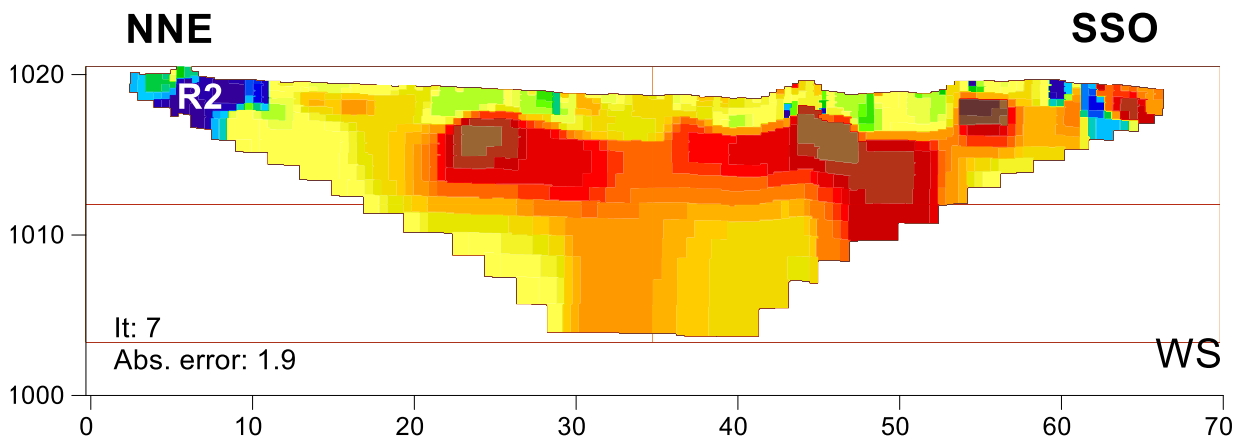
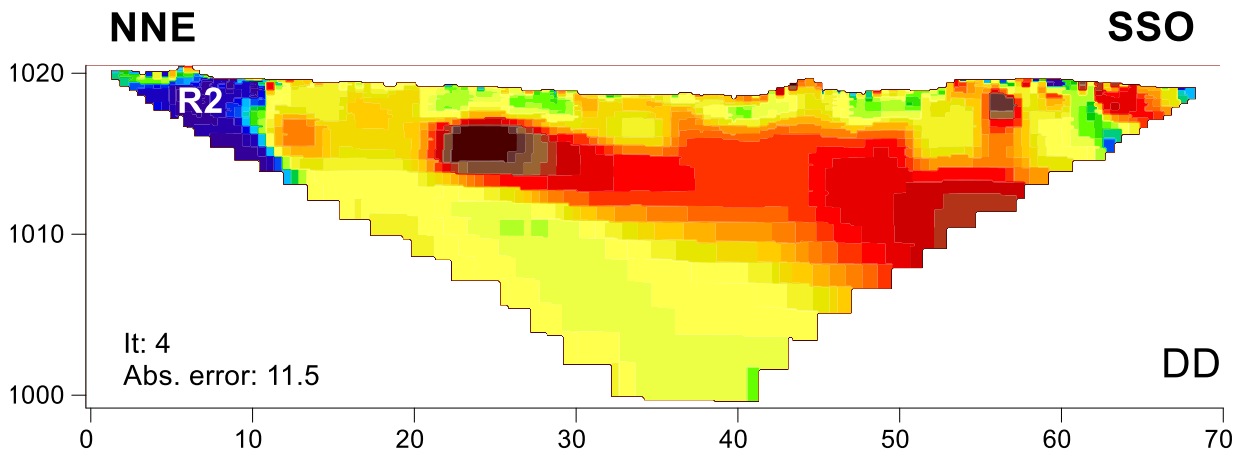
# ERT\_37



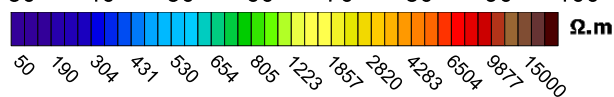
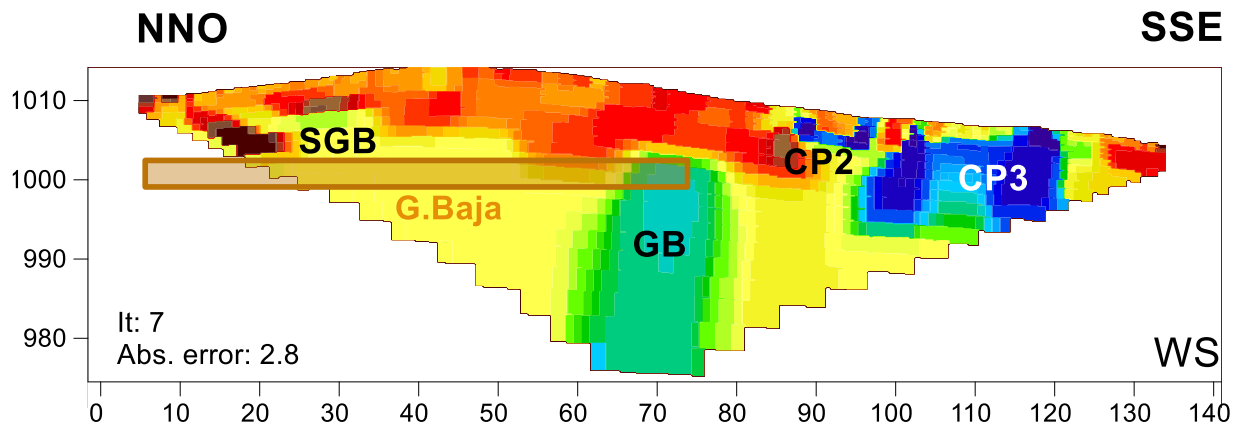
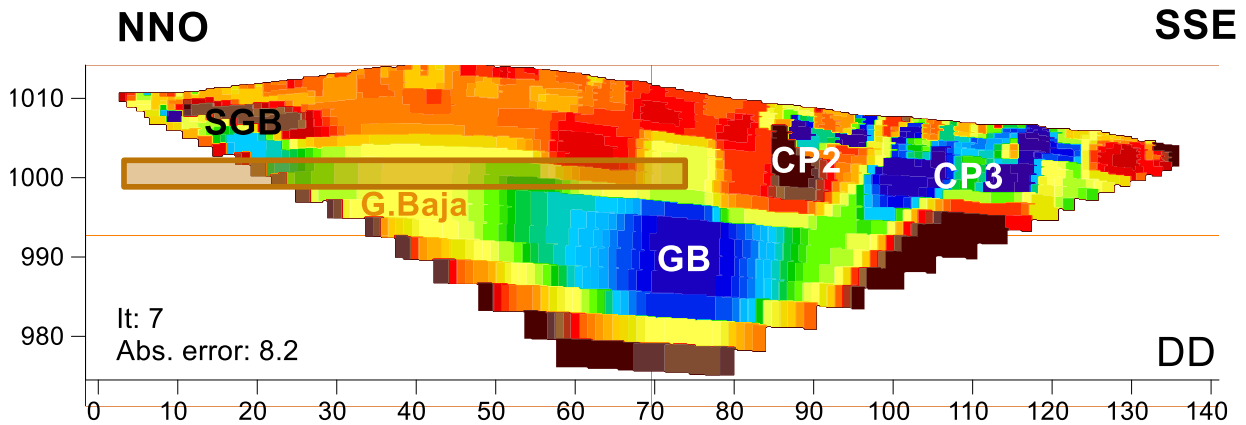
# ERT\_38



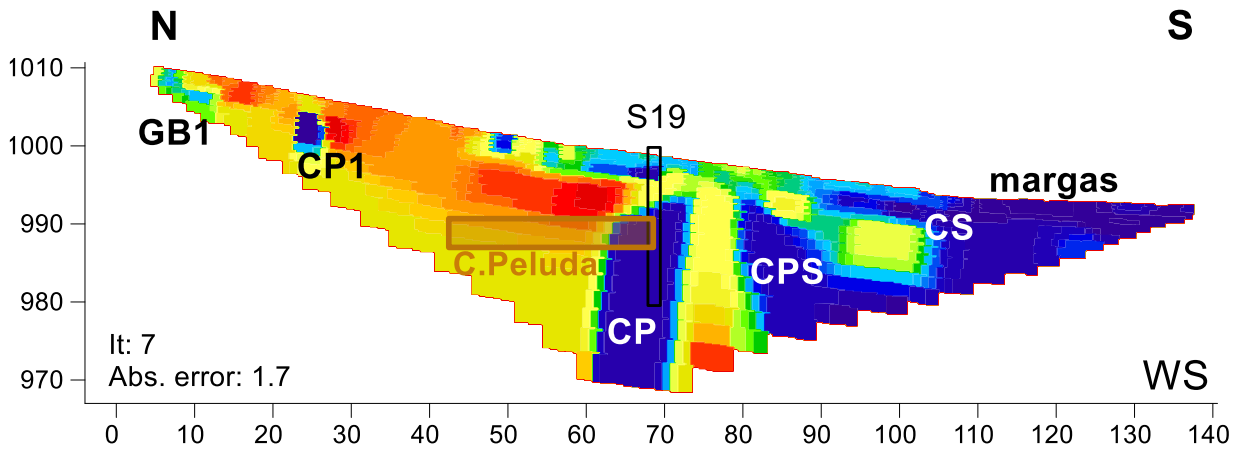
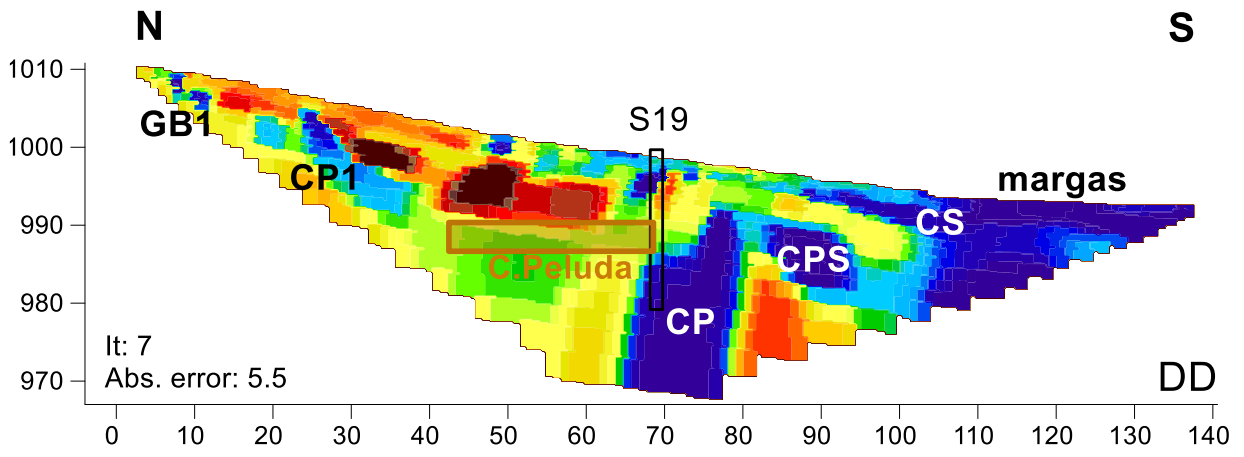
# ERT\_39



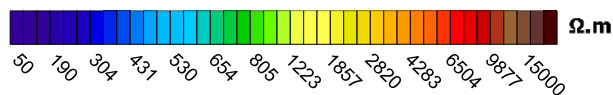
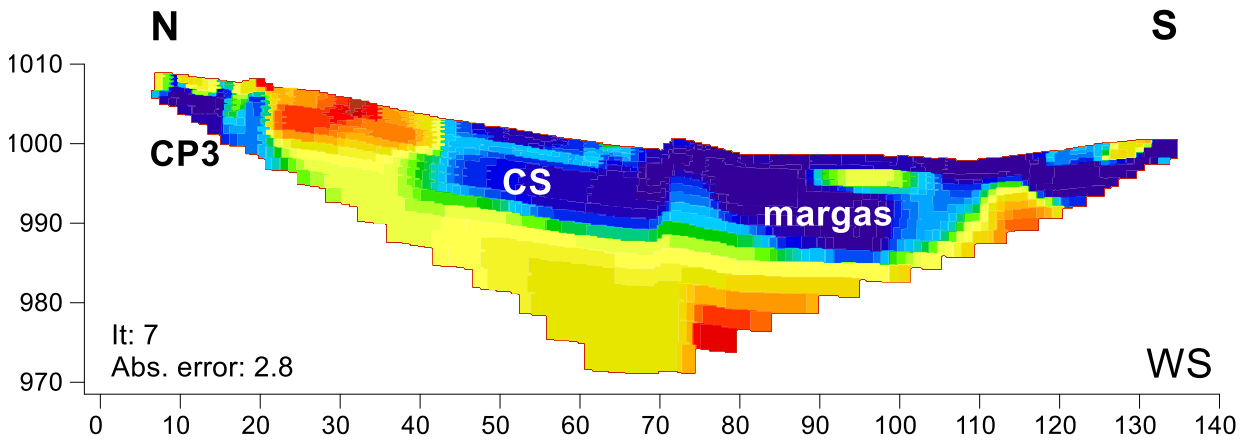
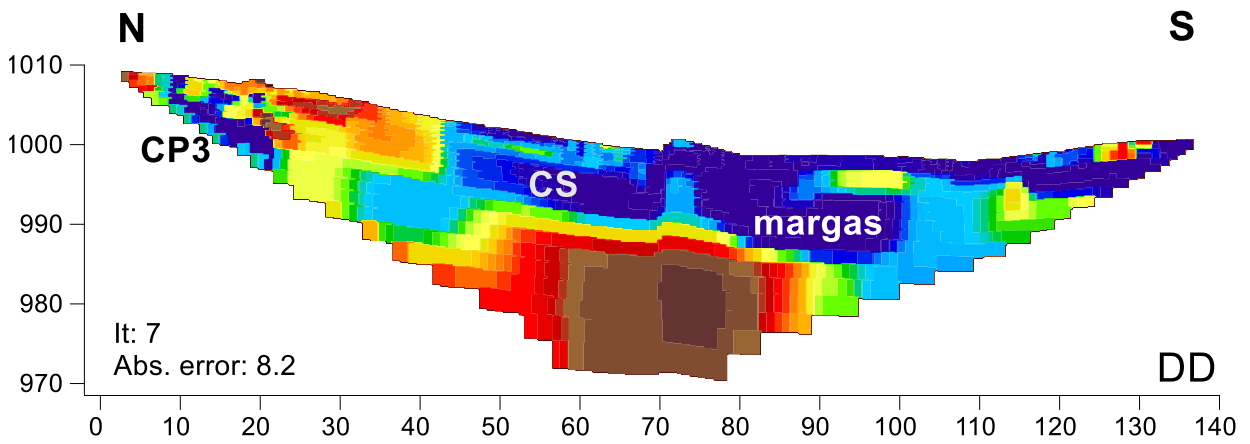
# ERT\_40



### ERT\_41

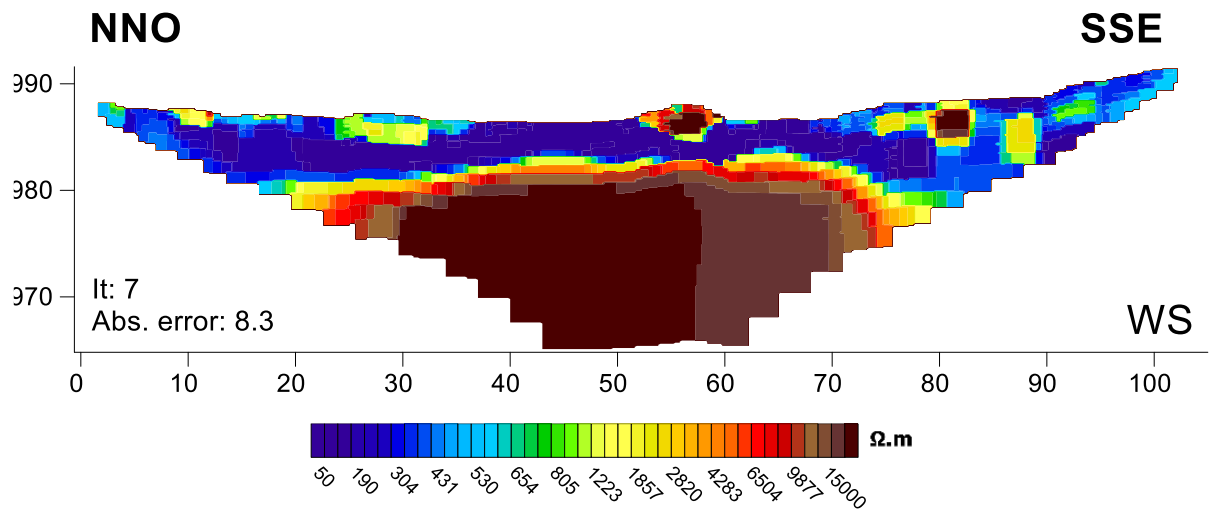
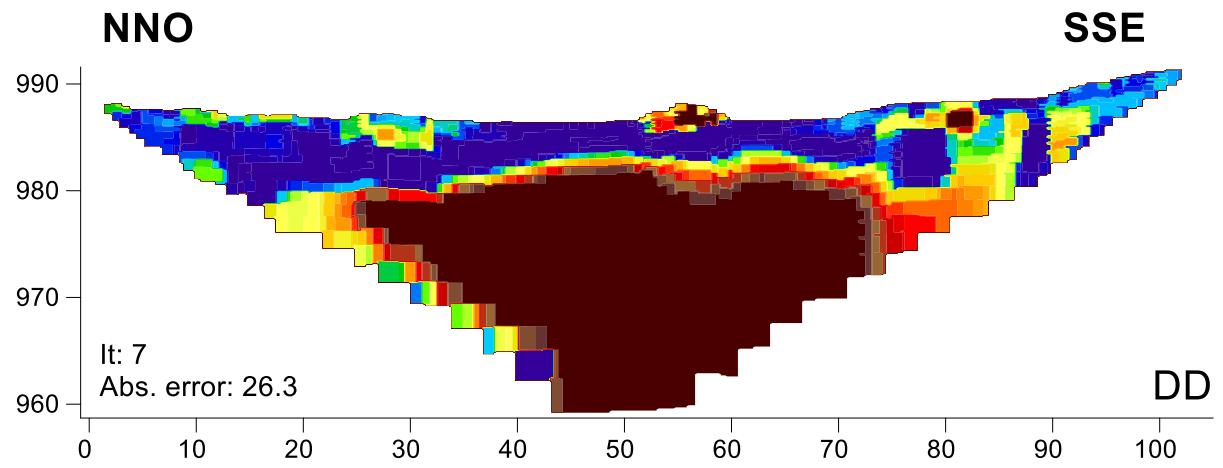


### ERT\_42

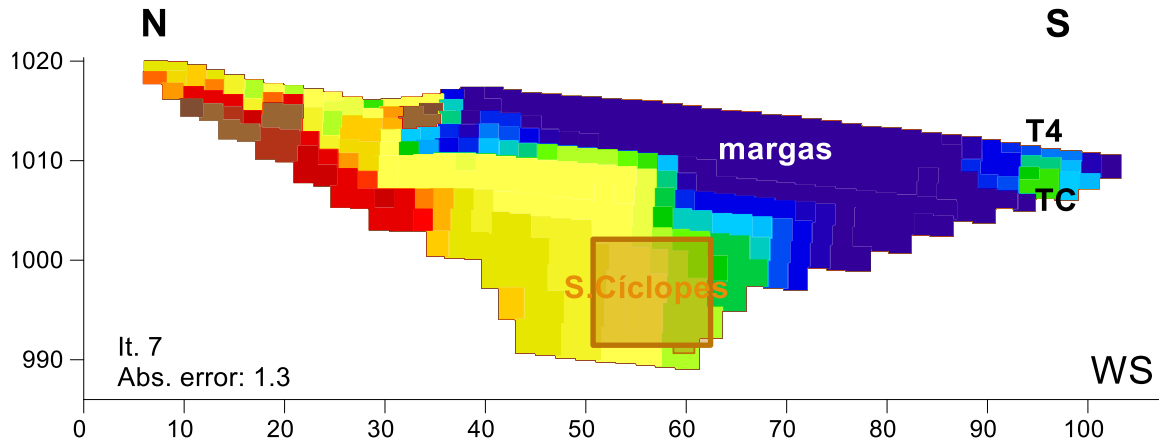
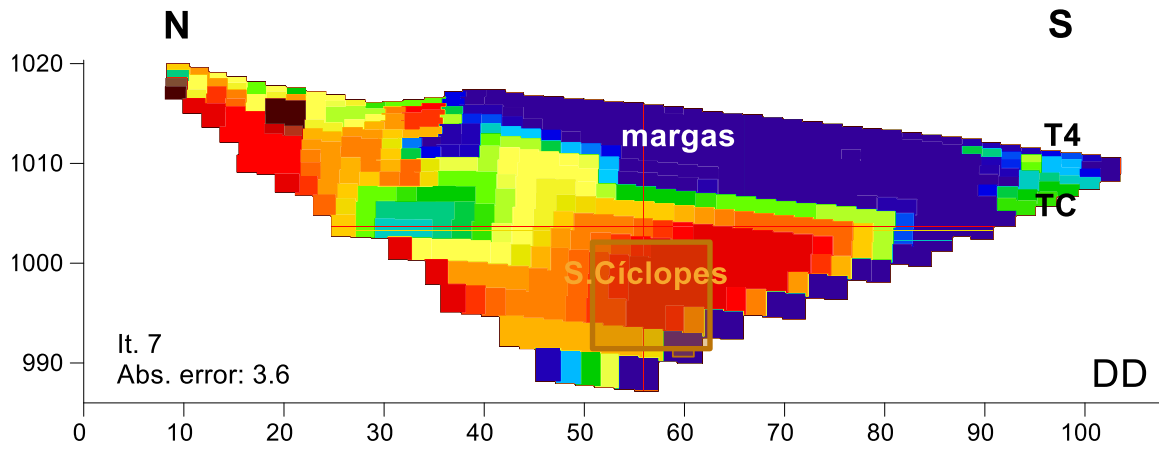




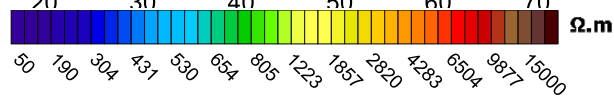
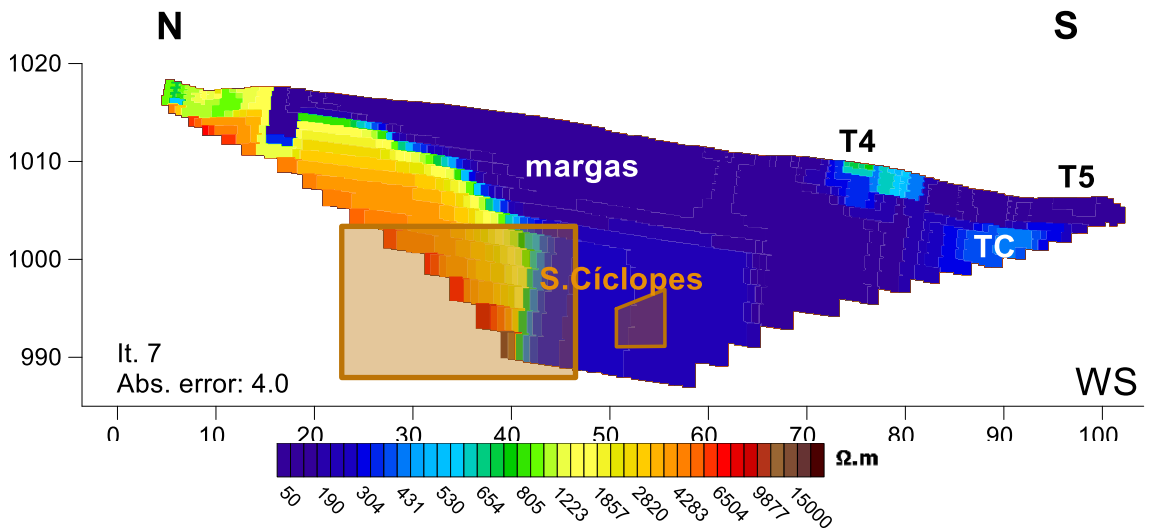
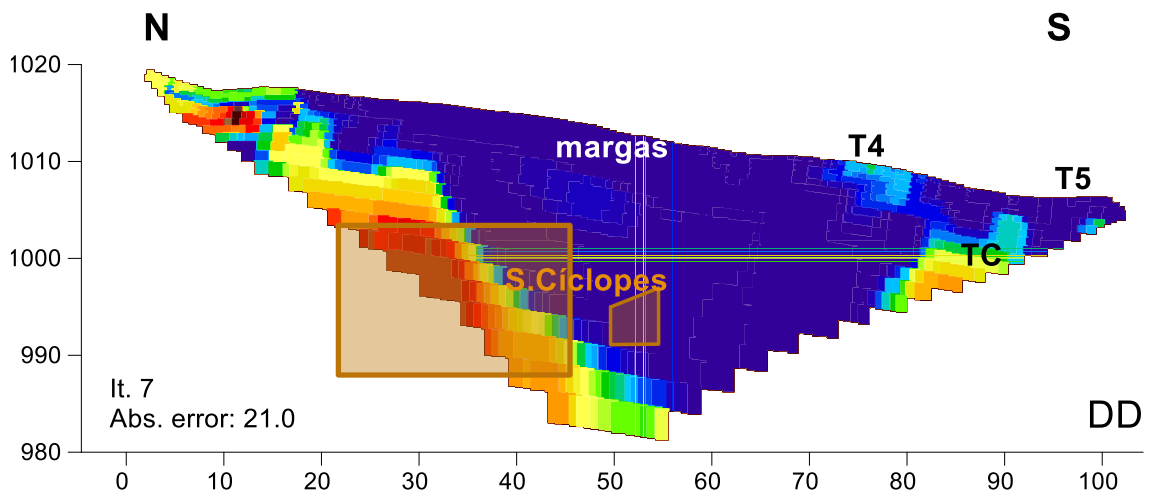
# ERT\_43



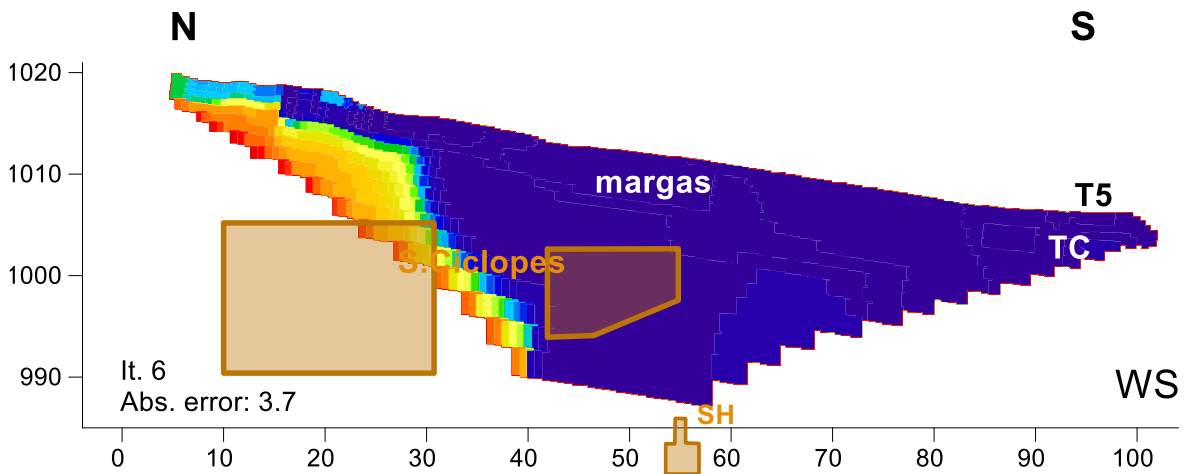
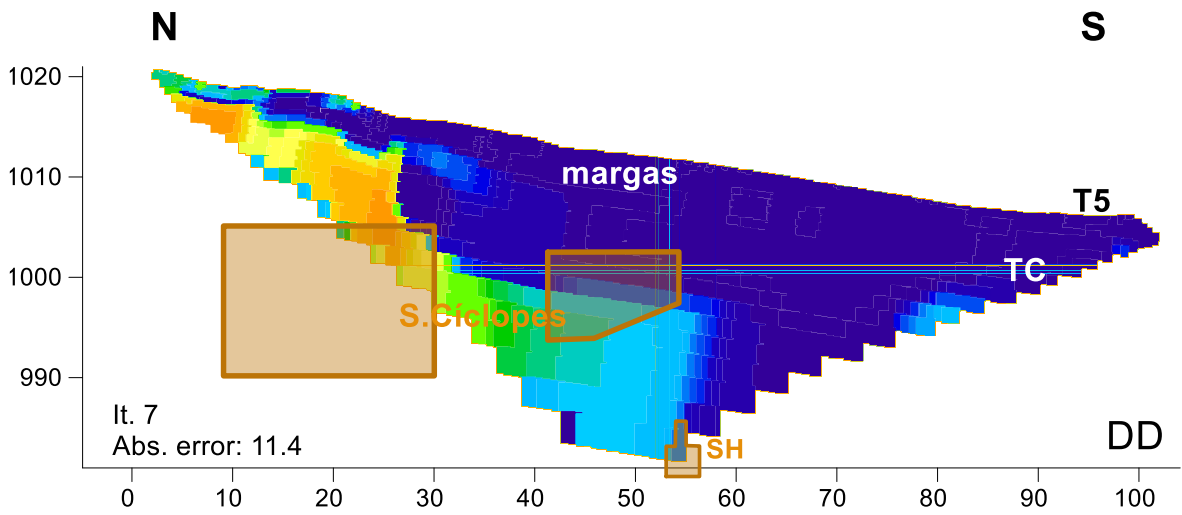
# ERT\_44



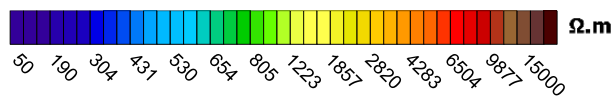
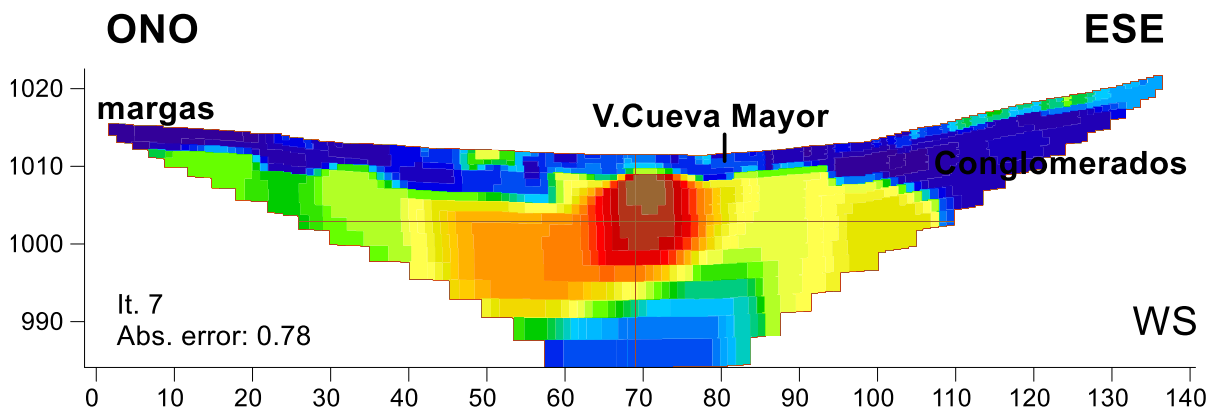
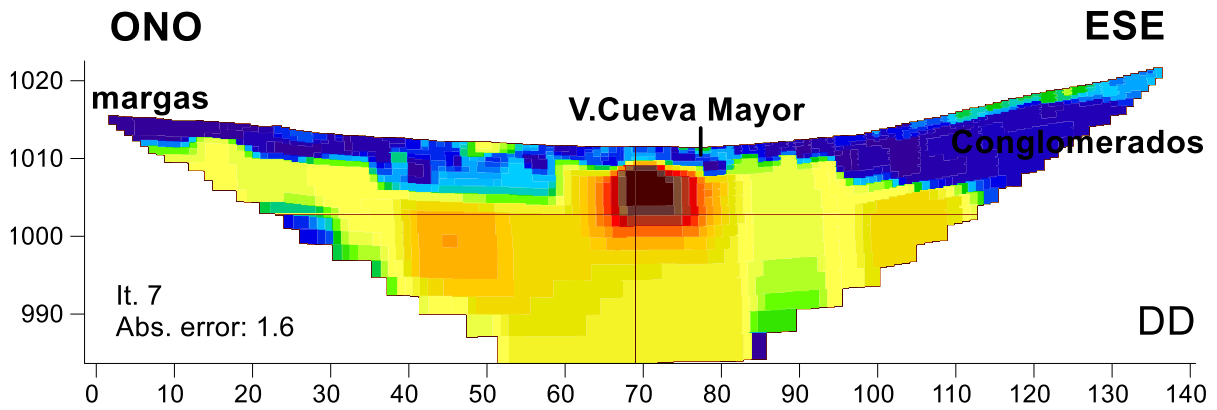
# ERT\_45



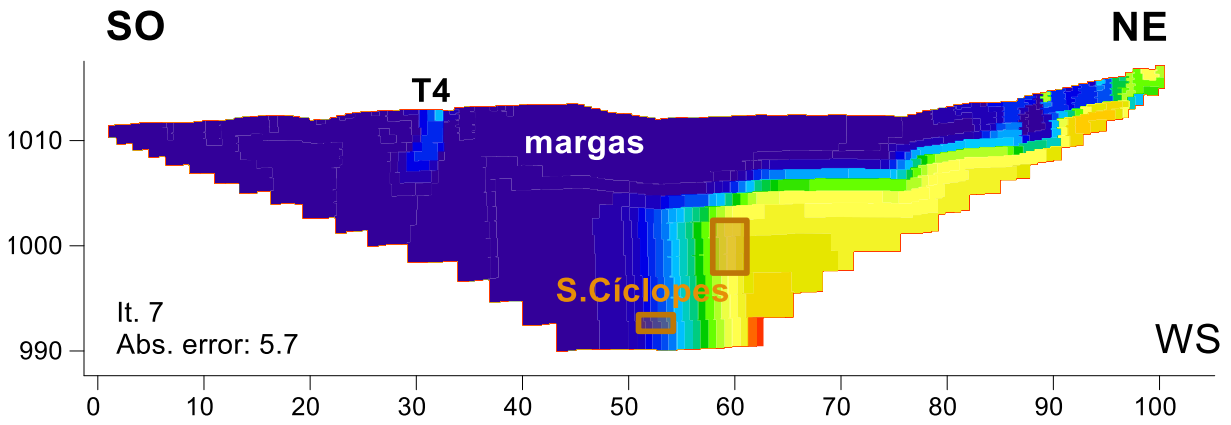
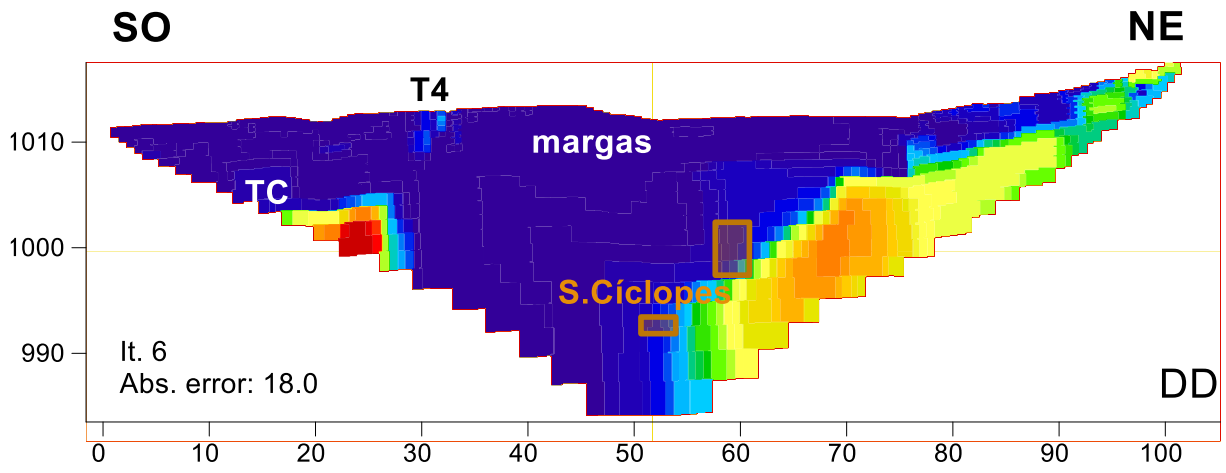
### ERT\_46



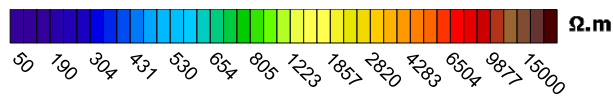
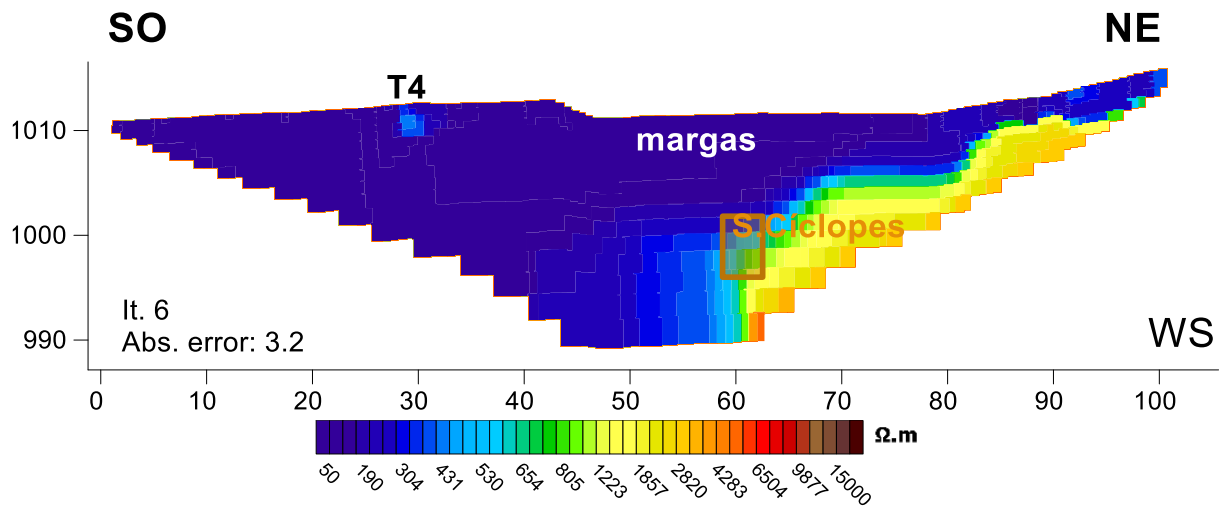
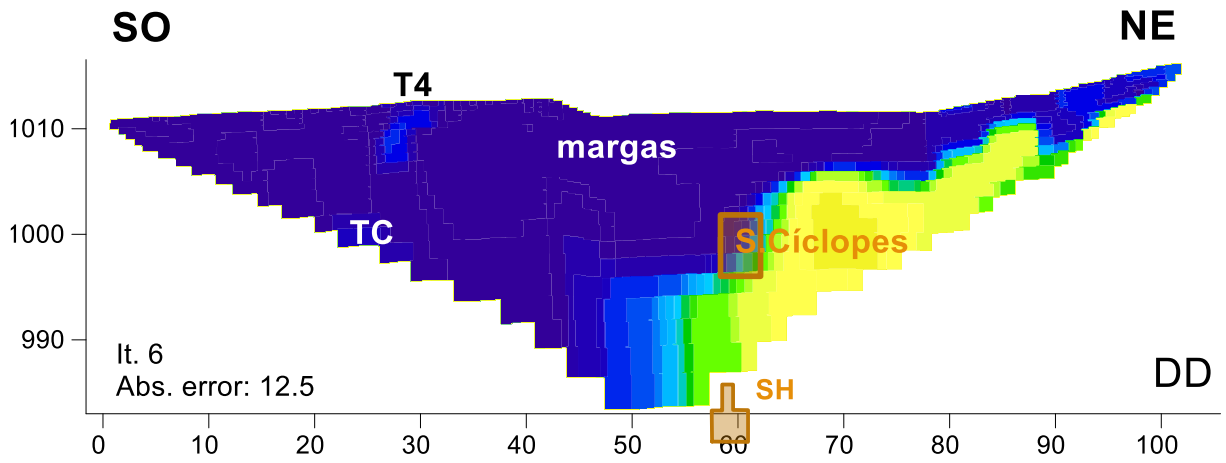
### ERT\_47



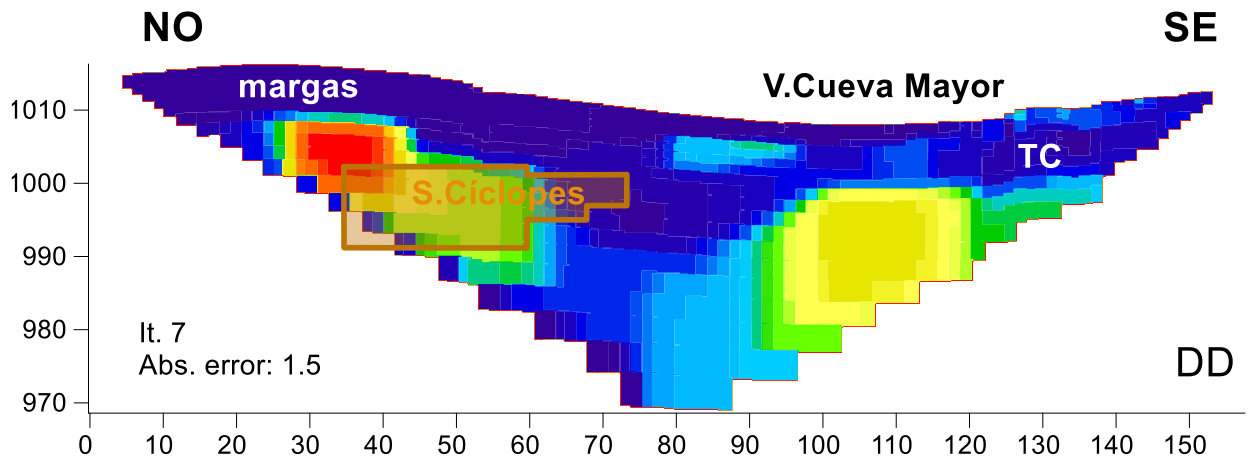
# ERT\_48



# ERT\_49

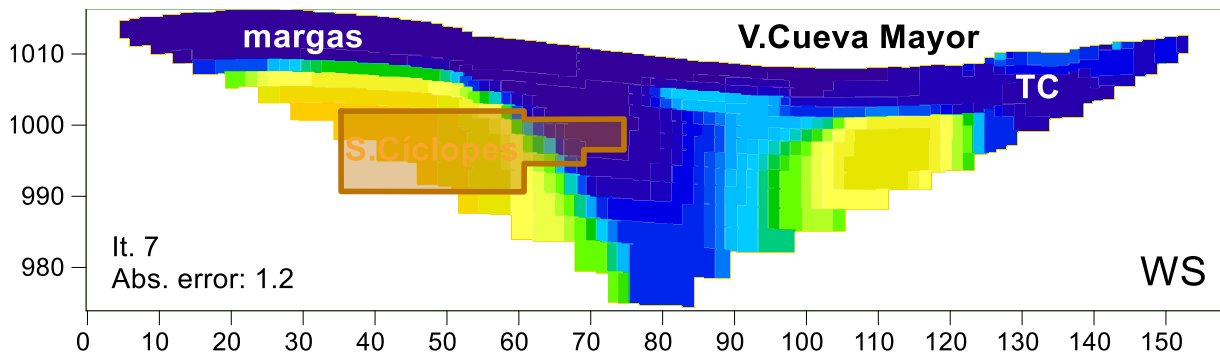


# ERT\_50

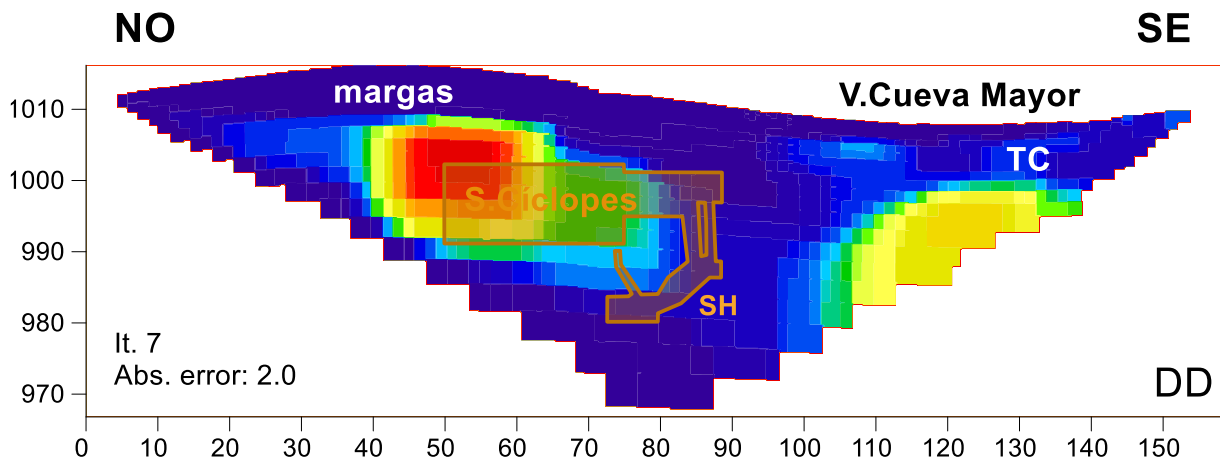


NO

SE

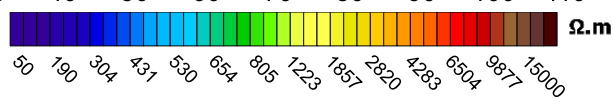
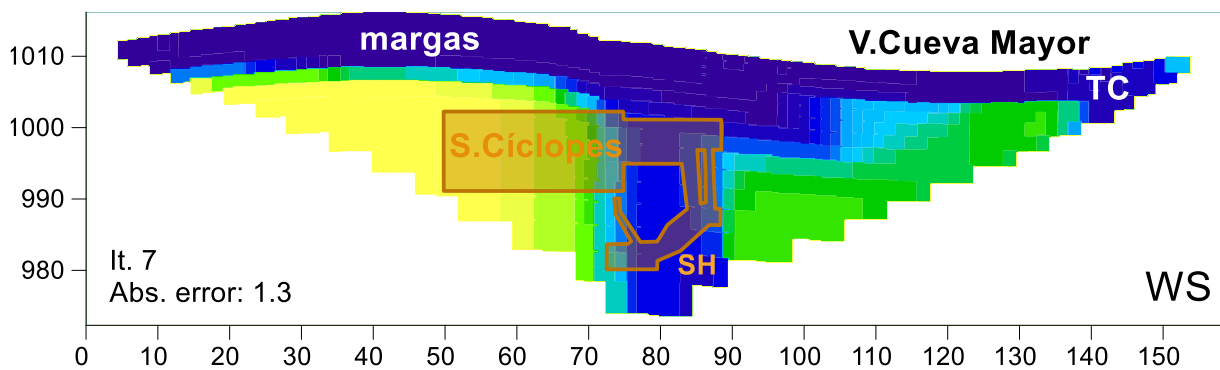


# ERT\_51



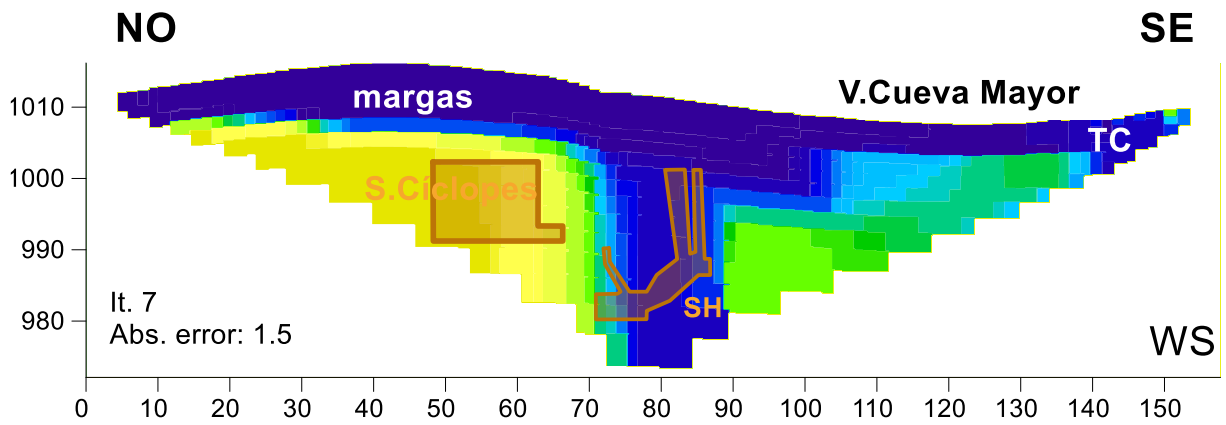
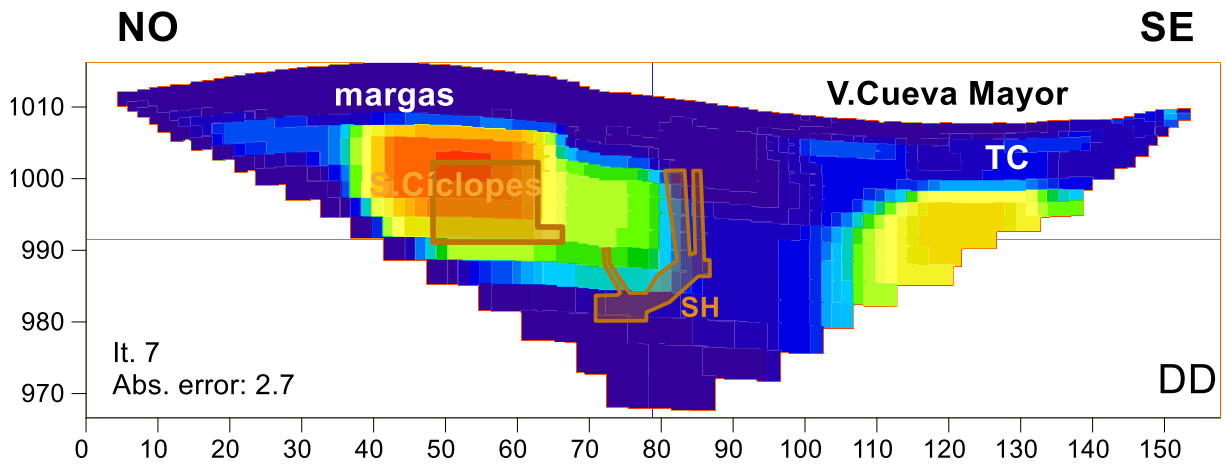
NO

SE

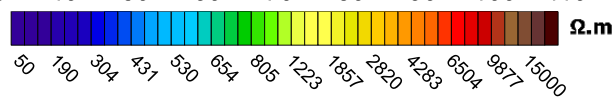
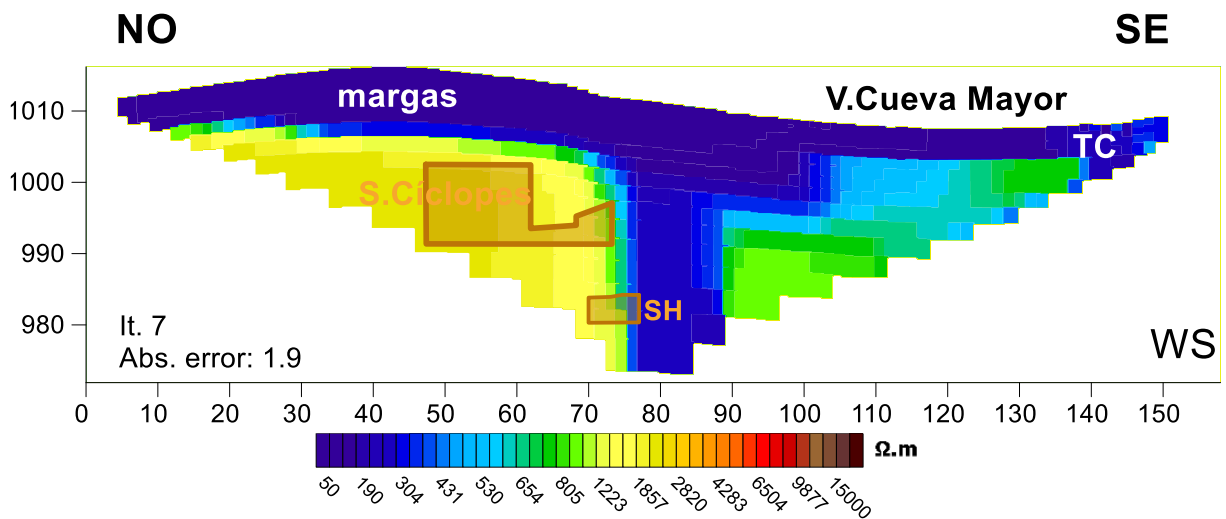
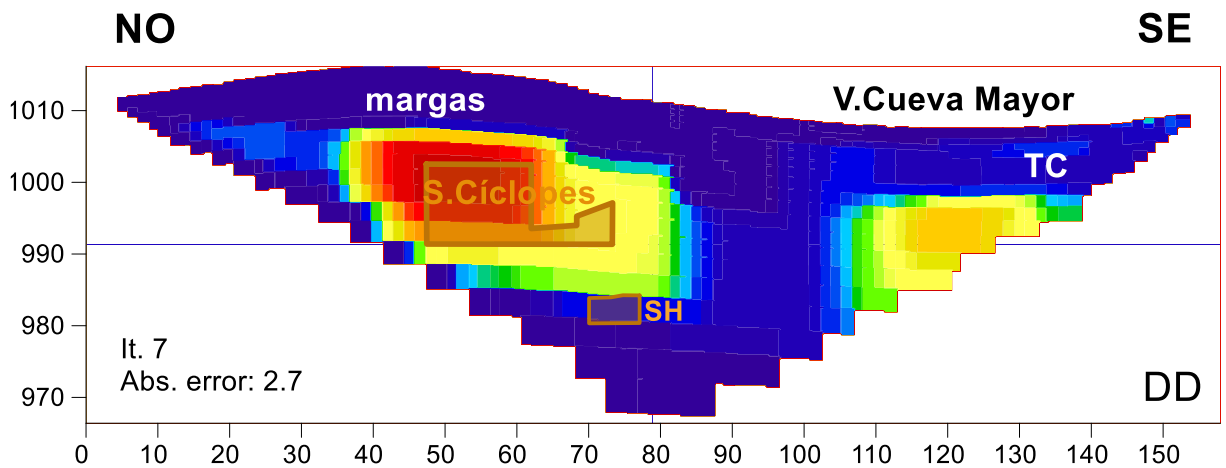




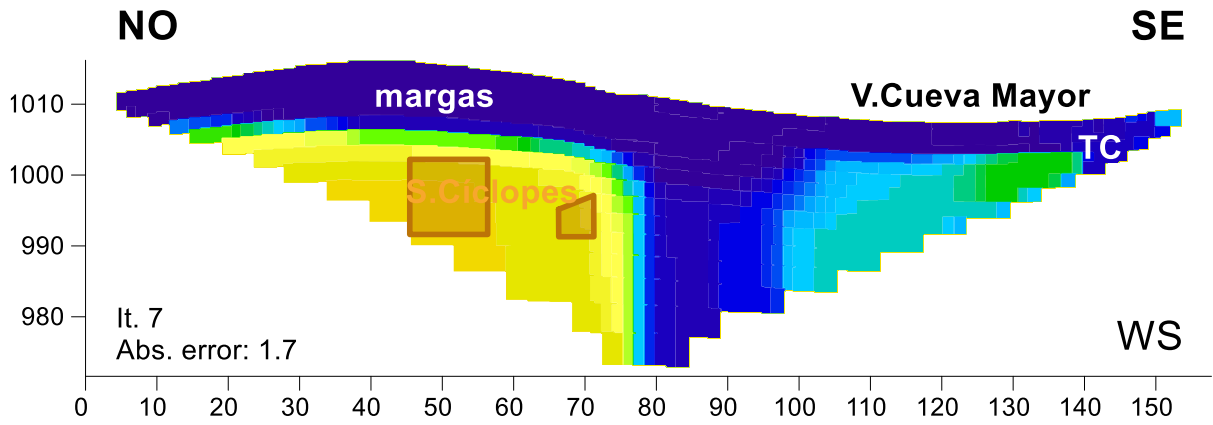
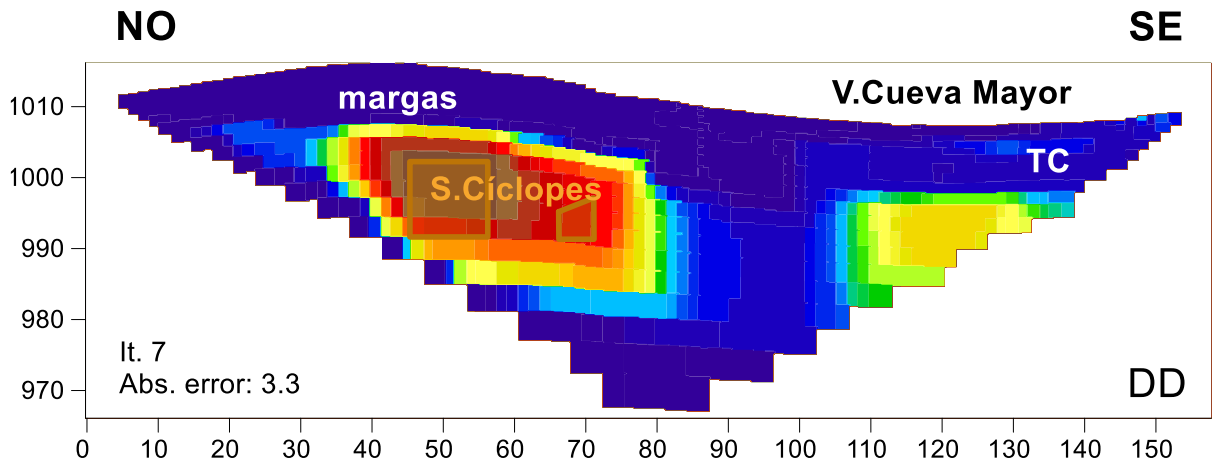
# ERT\_52



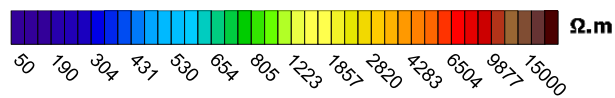
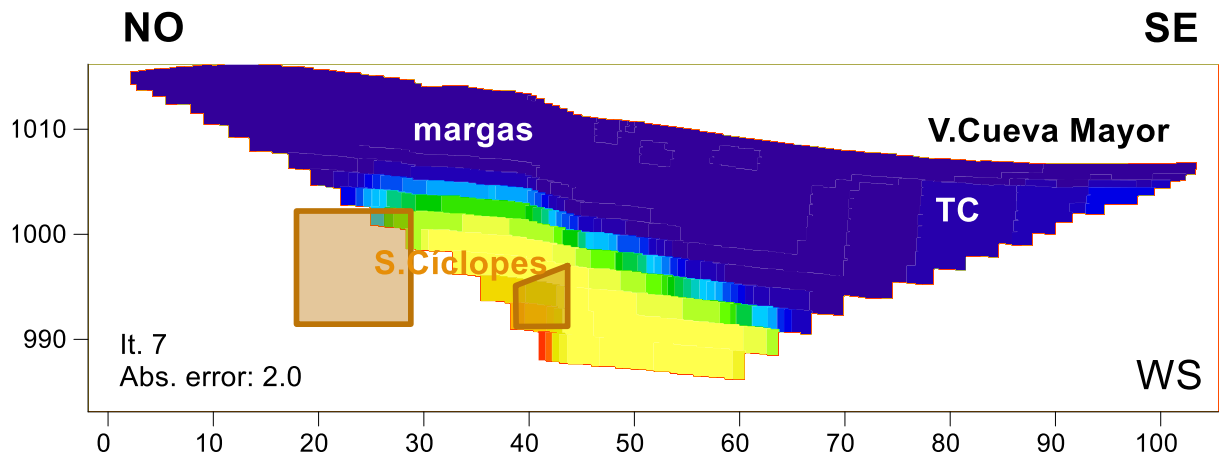
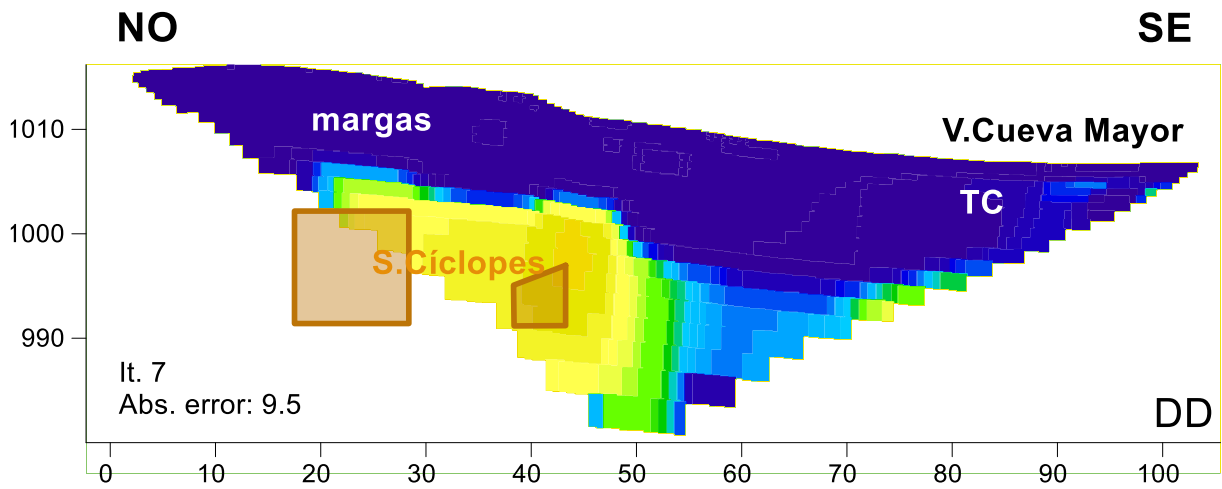
# ERT\_53



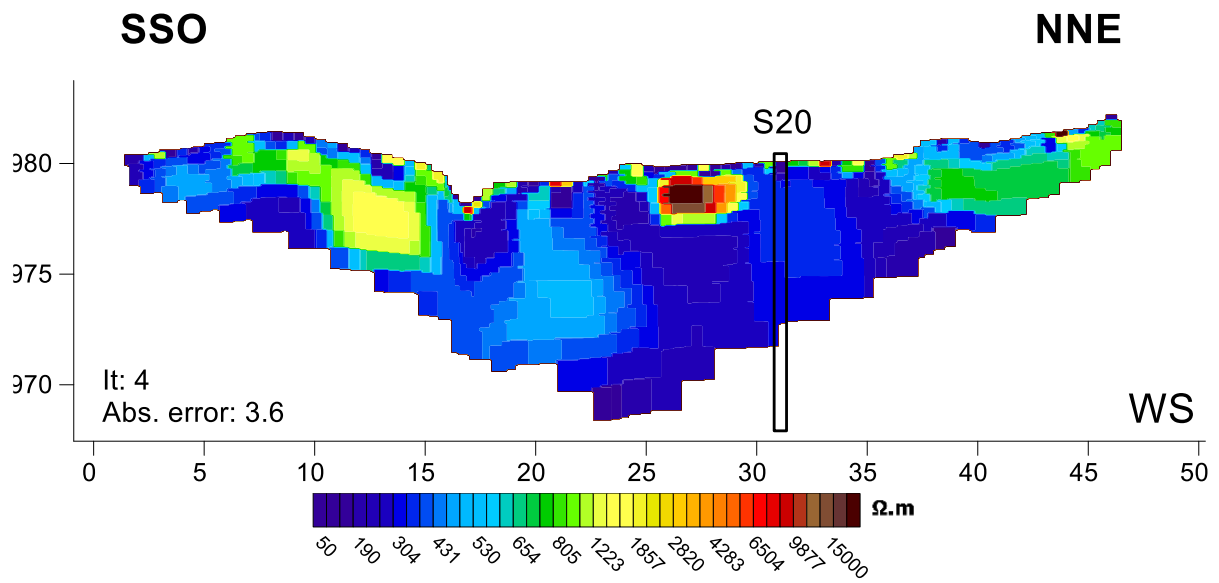
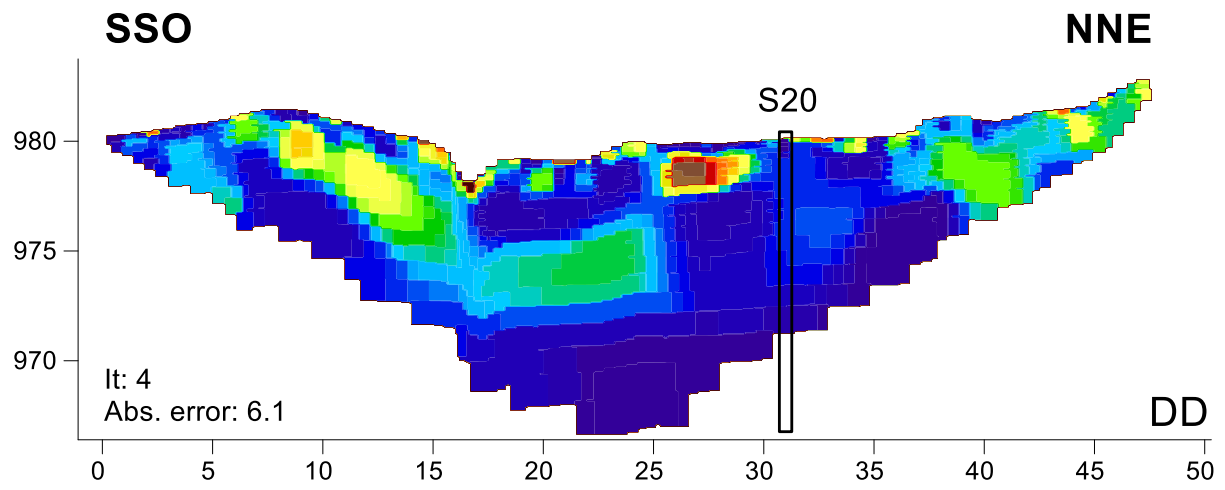
# ERT\_54



# ERT\_55



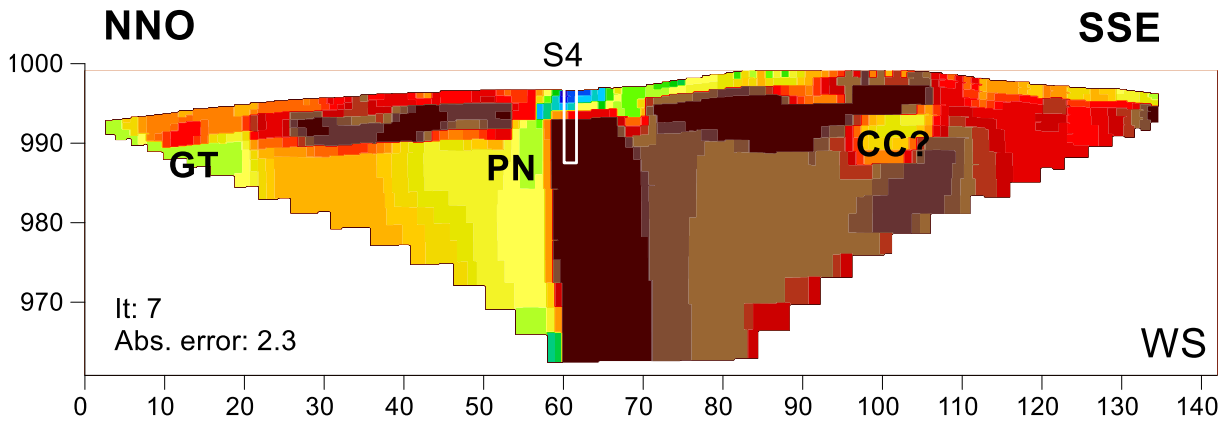
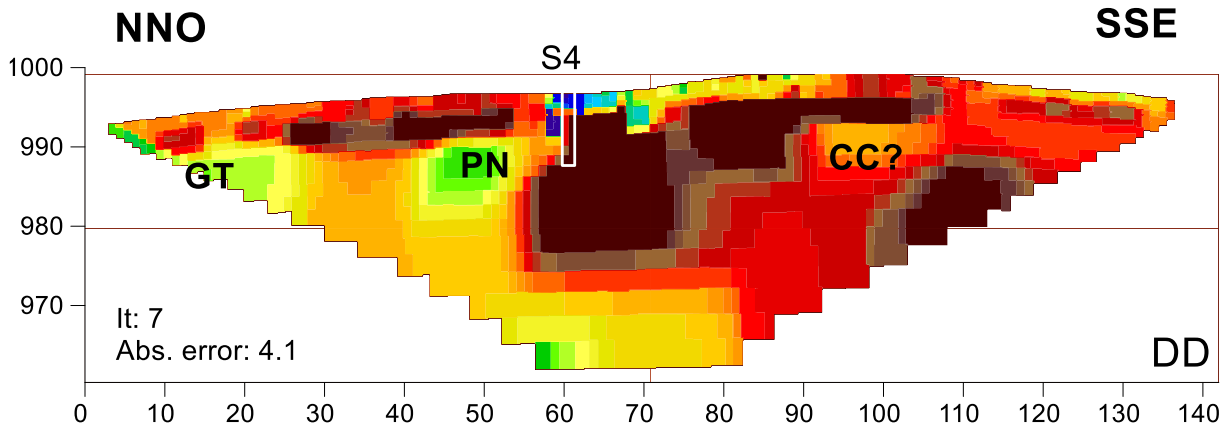
# ERT\_56



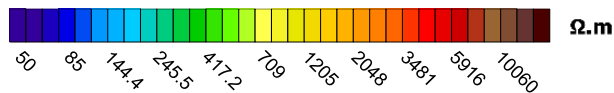
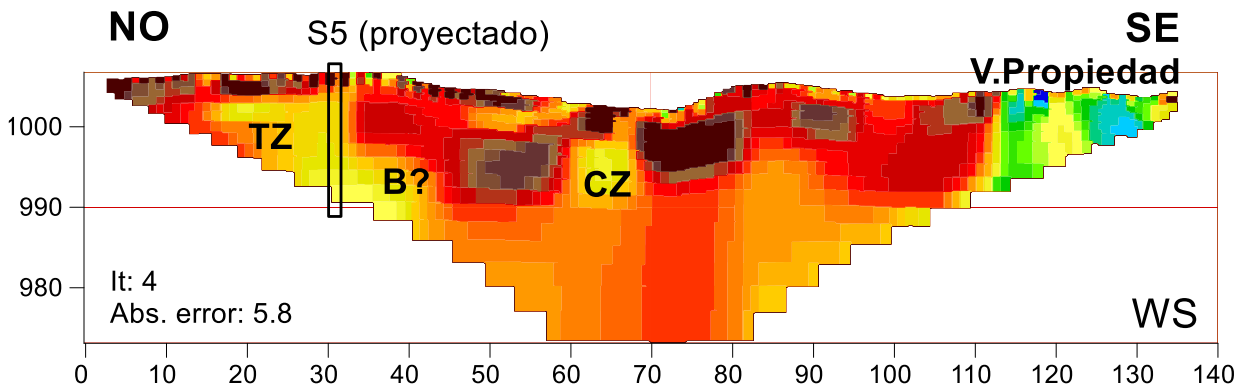
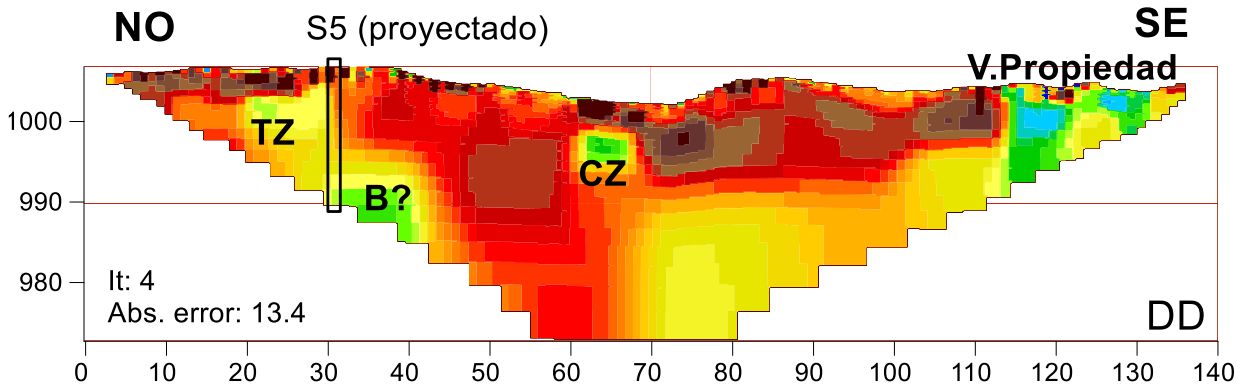
## **ANEXO II.2**

### **Escala baja resistividad**

### ERT\_5

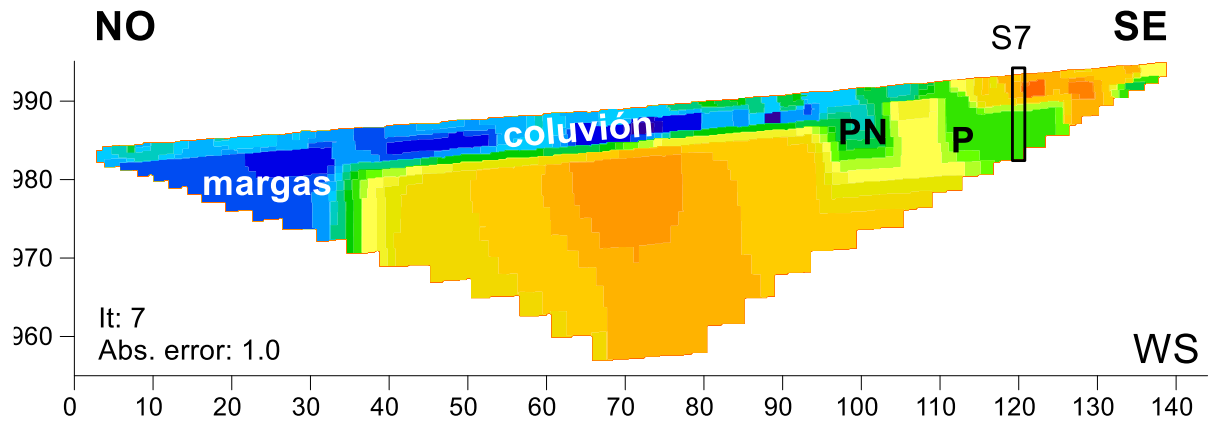
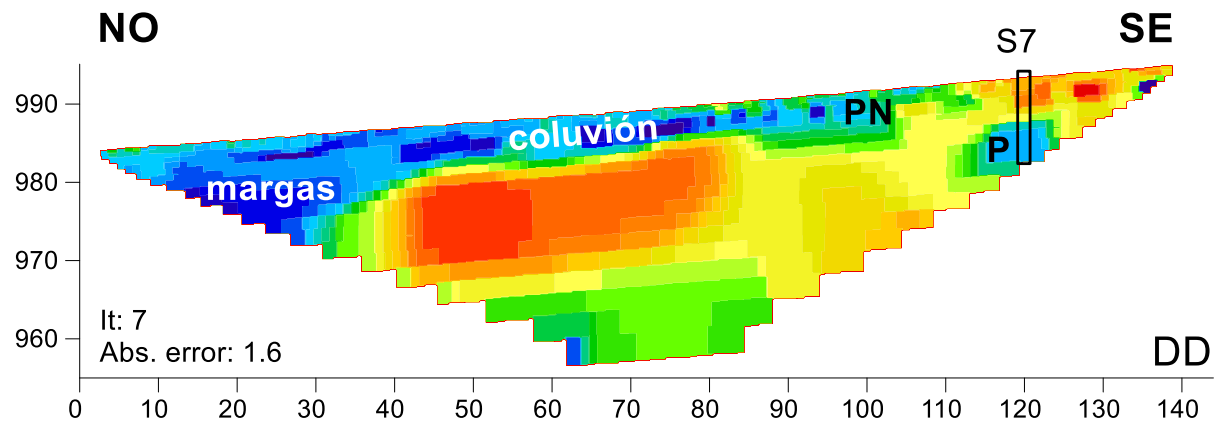


### ERT\_8

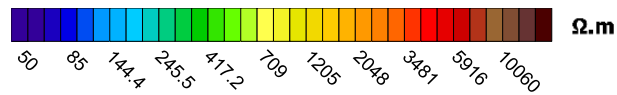
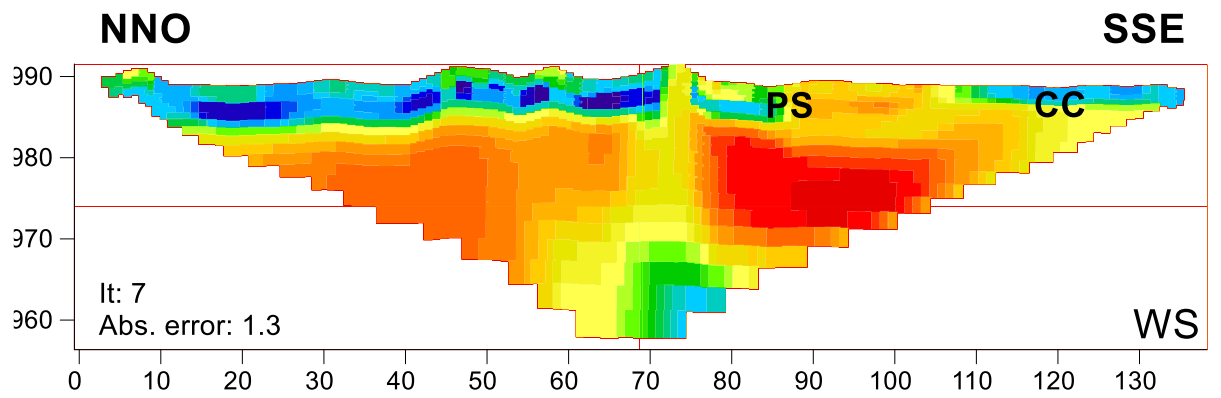
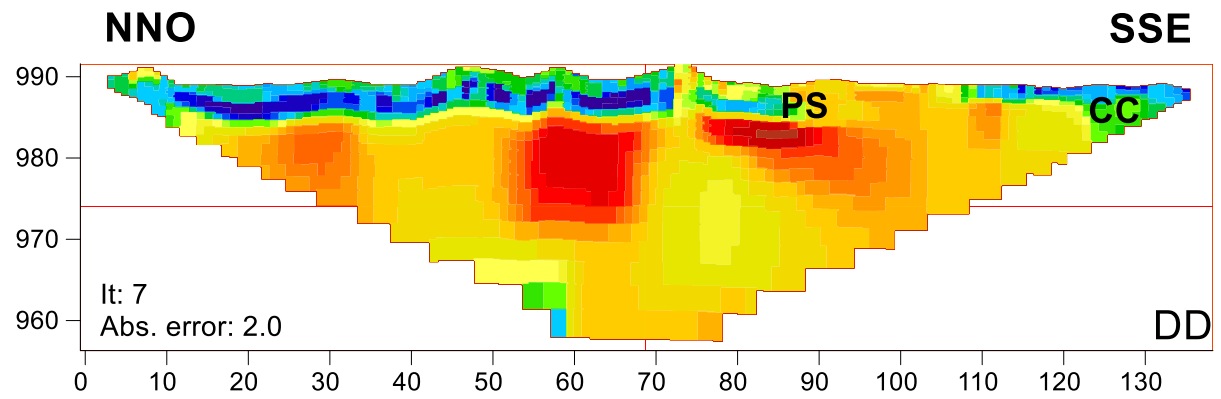




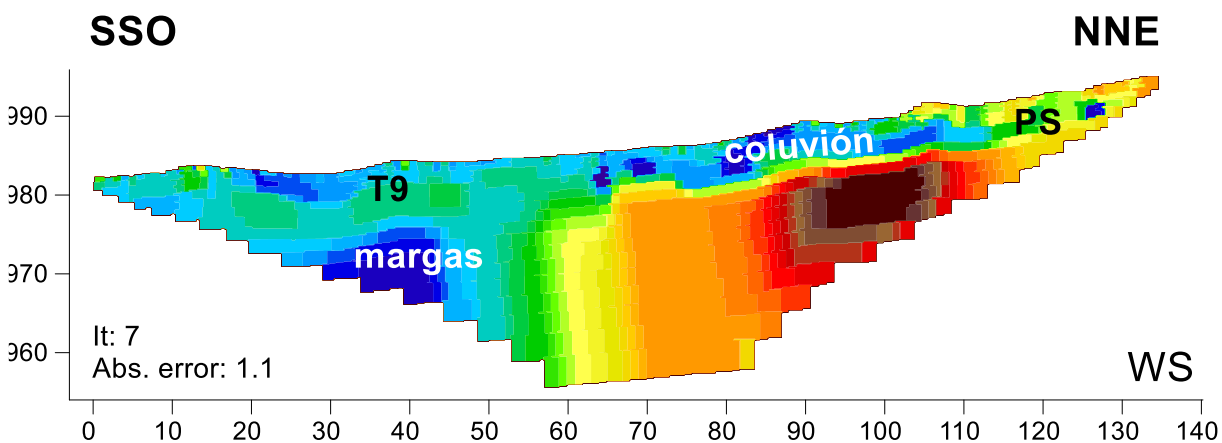
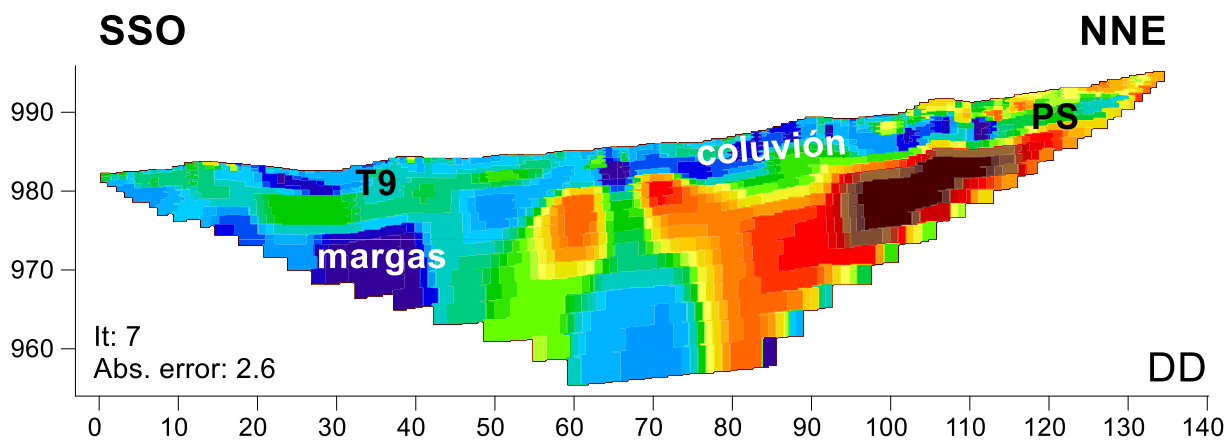
# ERT\_9



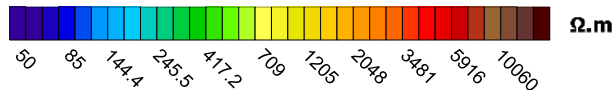
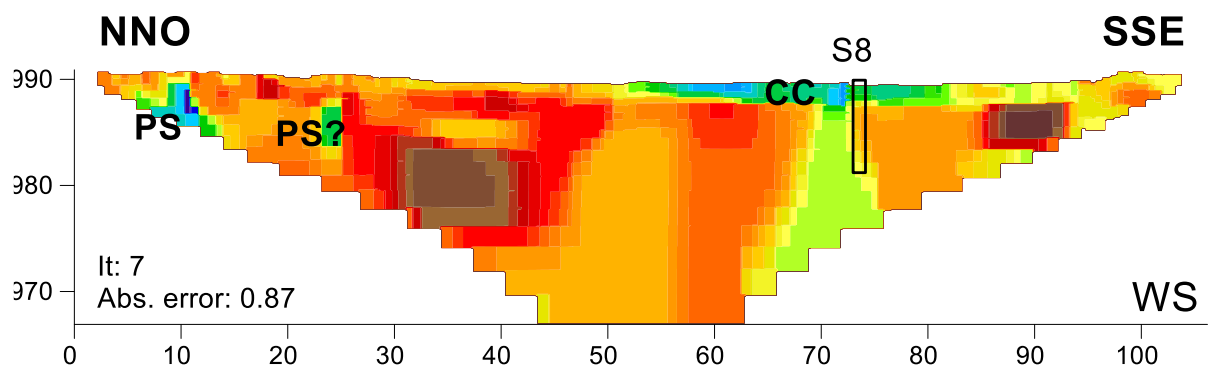
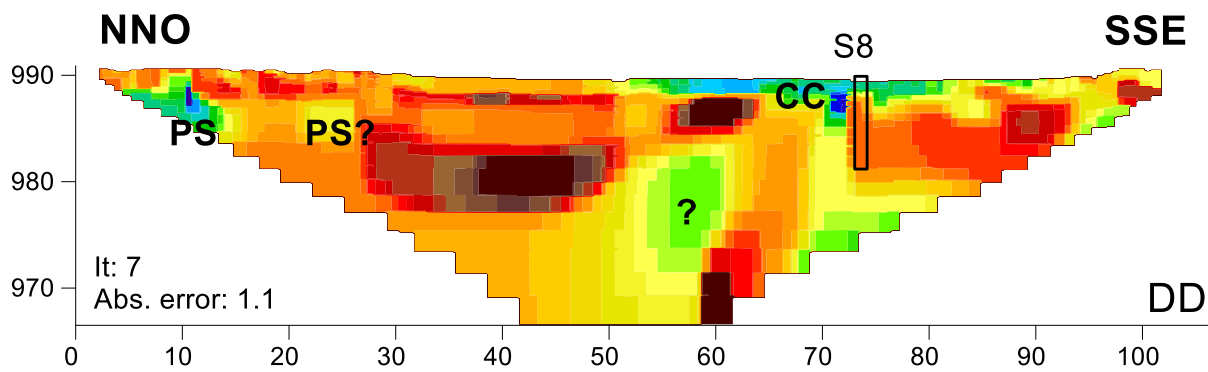
# ERT\_10



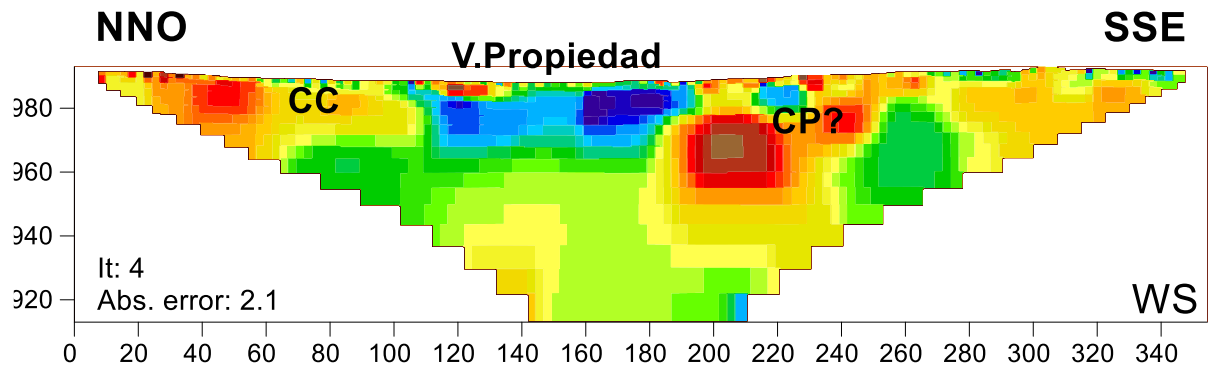
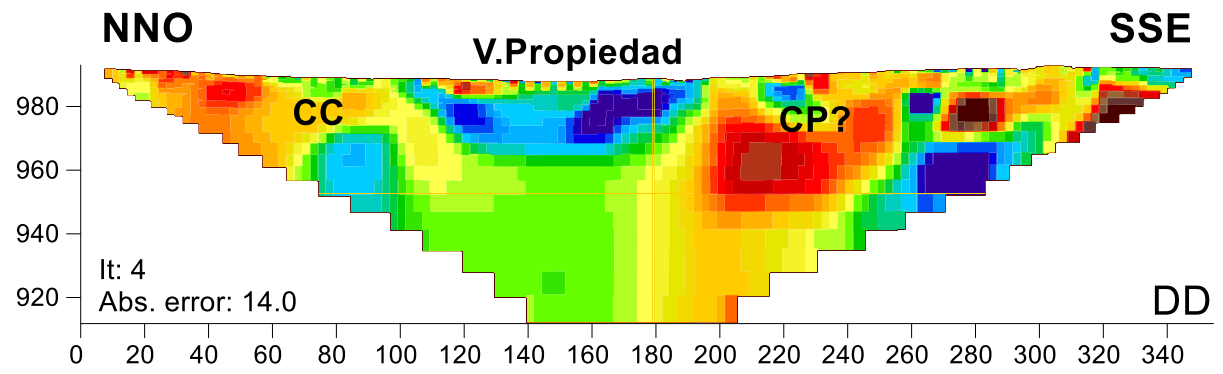
# ERT\_11



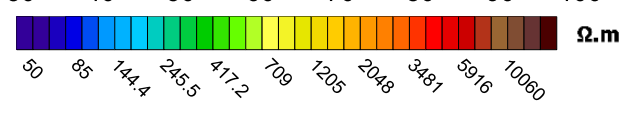
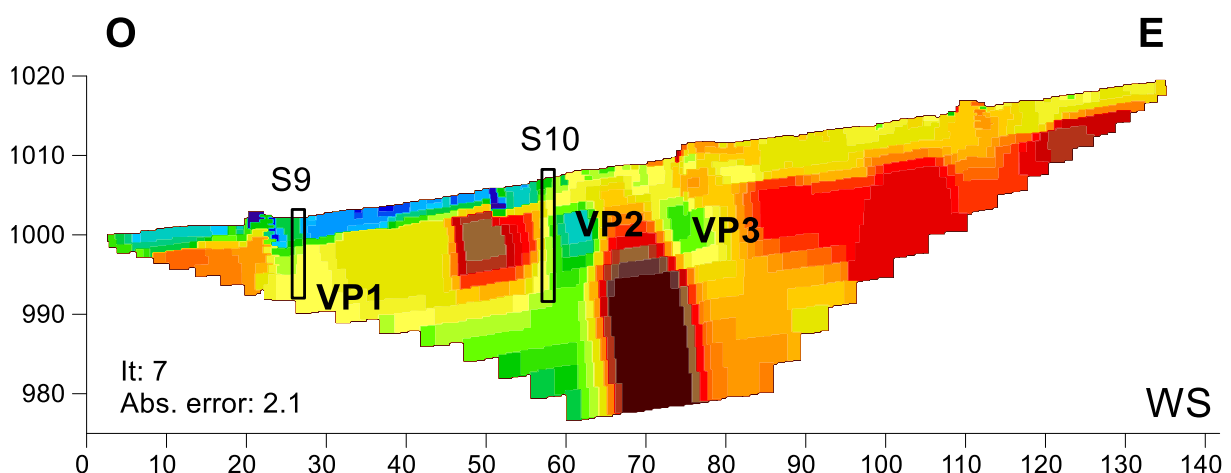
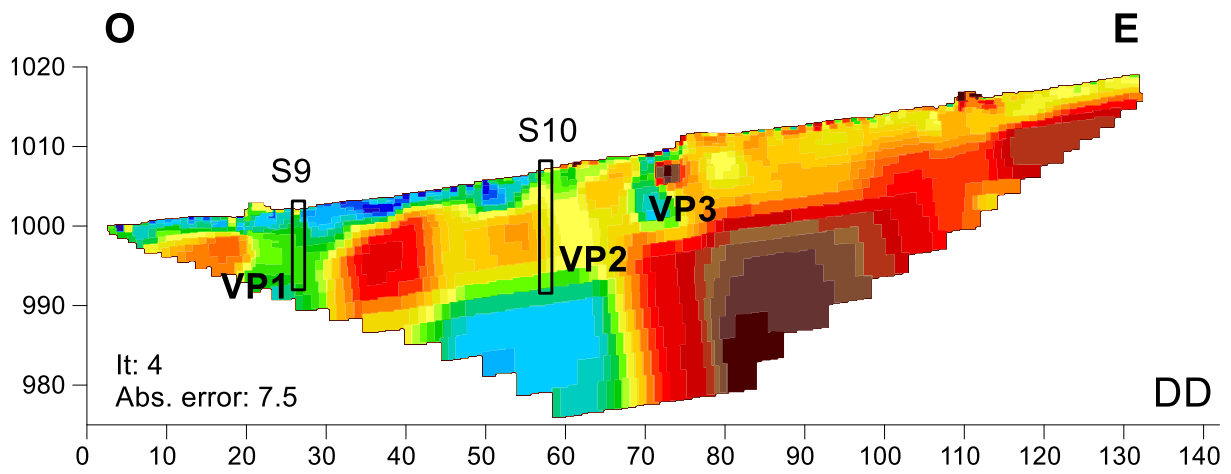
# ERT\_12



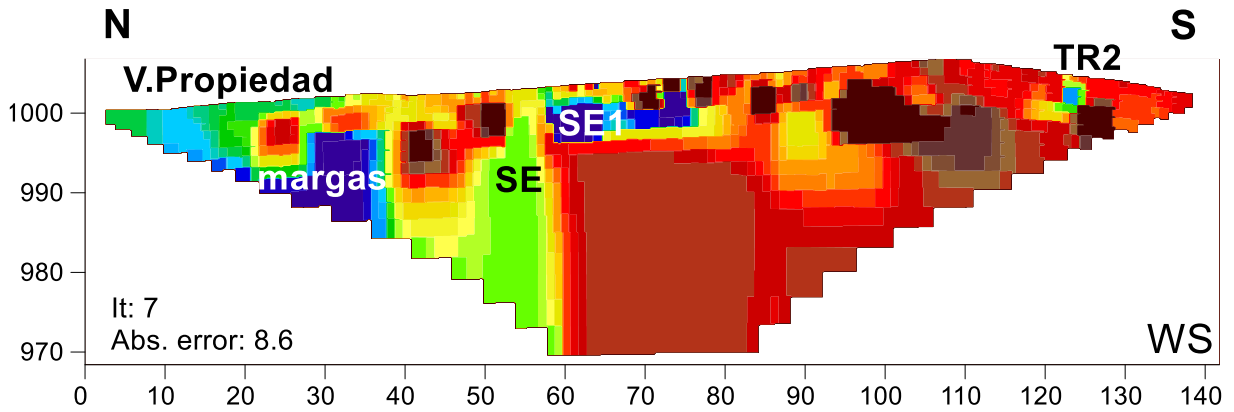
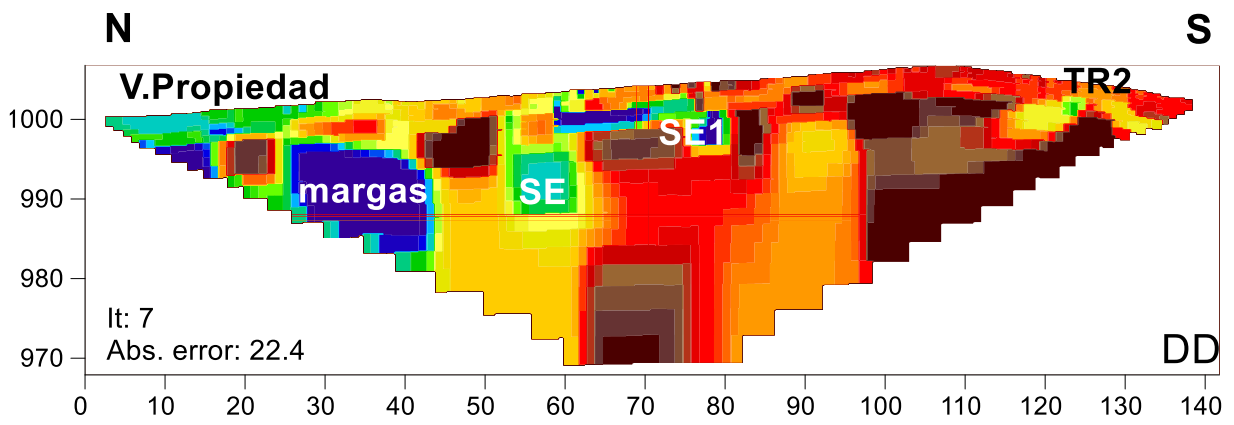
# ERT\_13



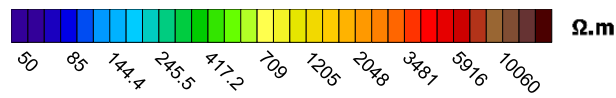
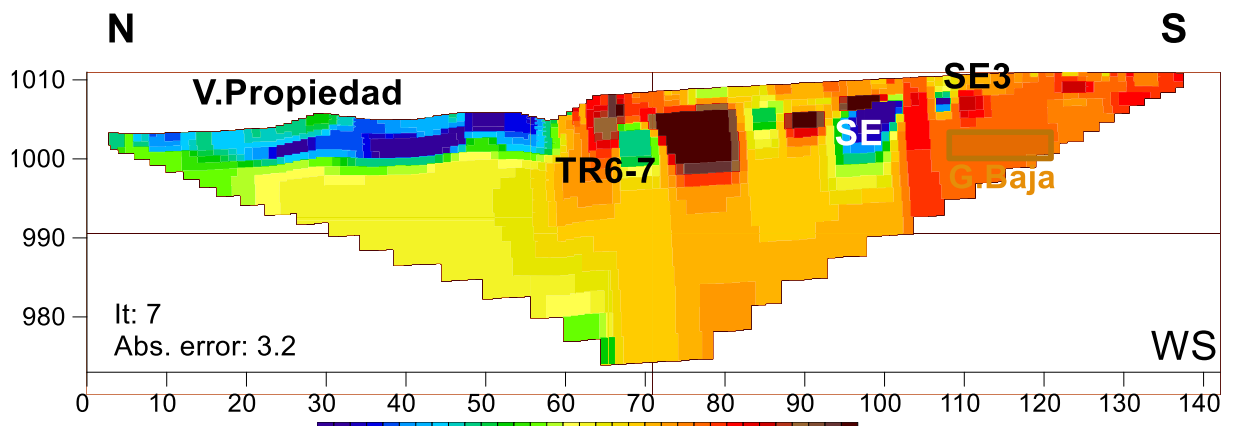
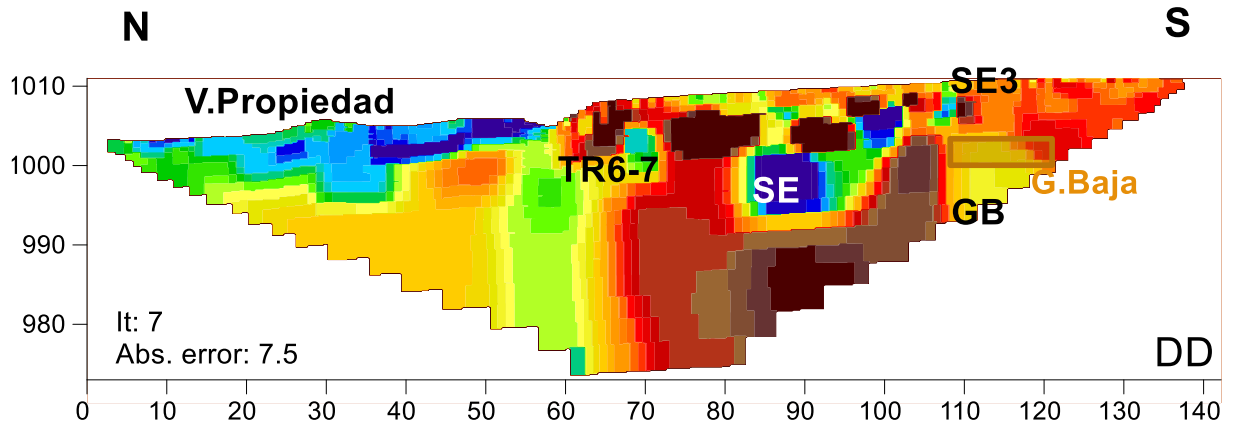
# ERT\_14



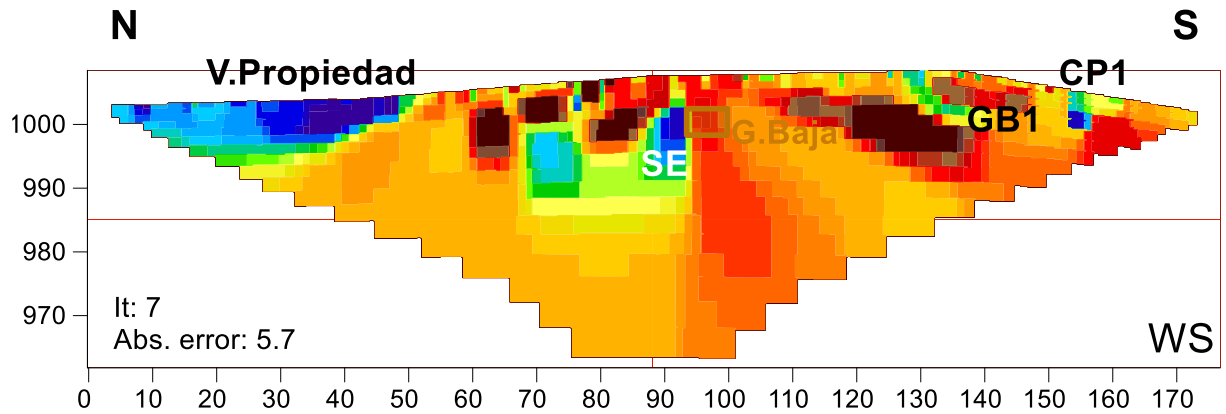
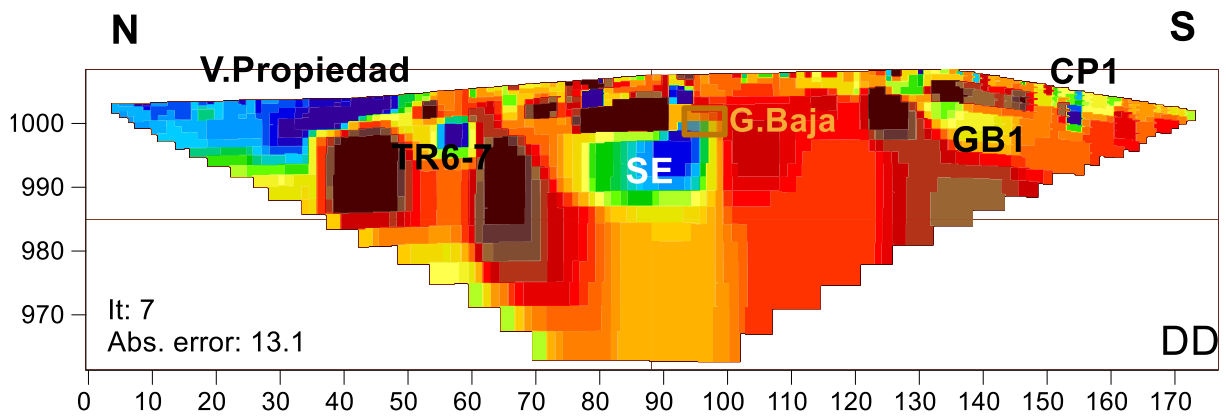
# ERT\_15



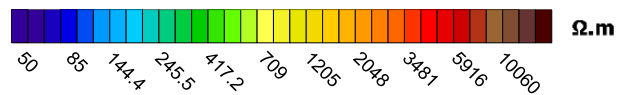
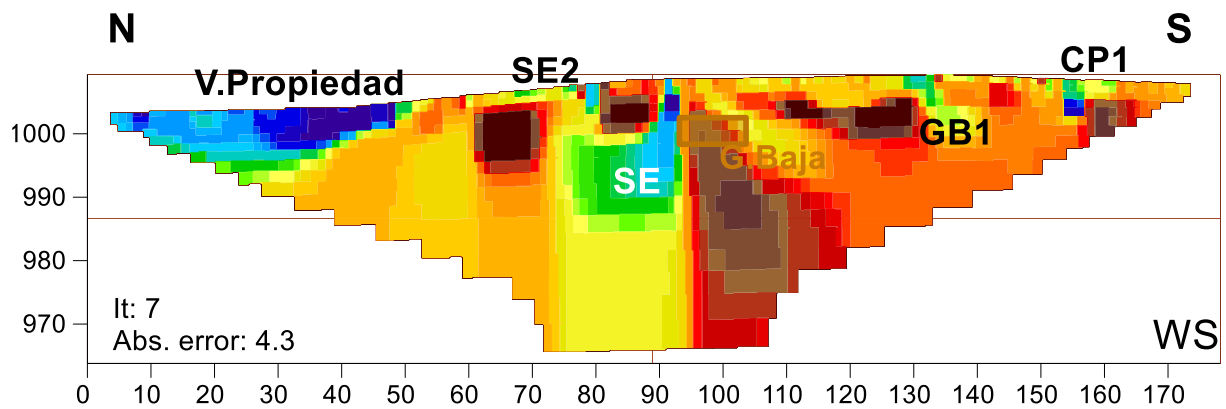
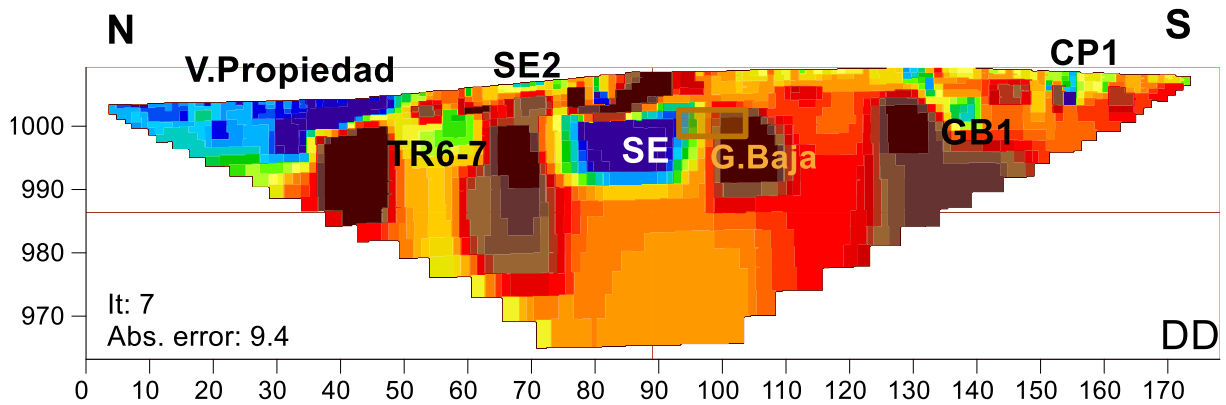
# ERT\_16



### ERT\_17

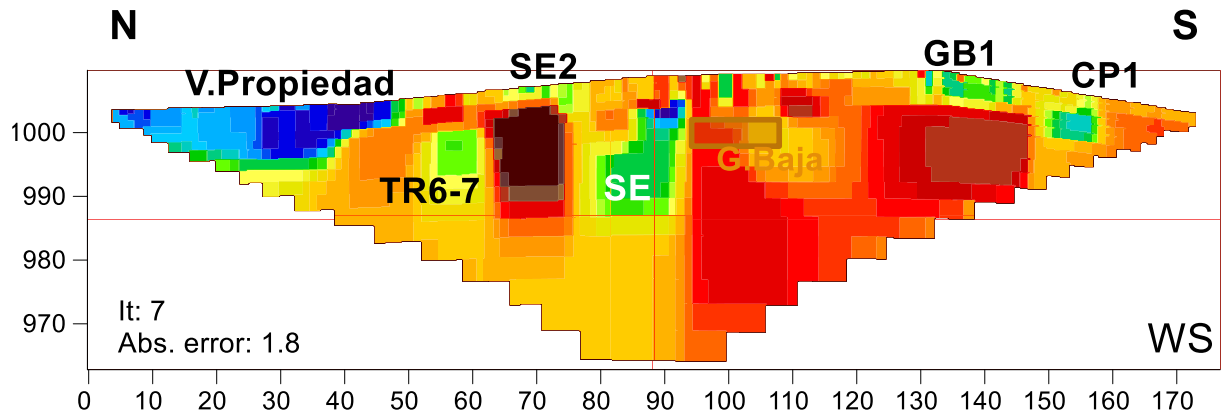
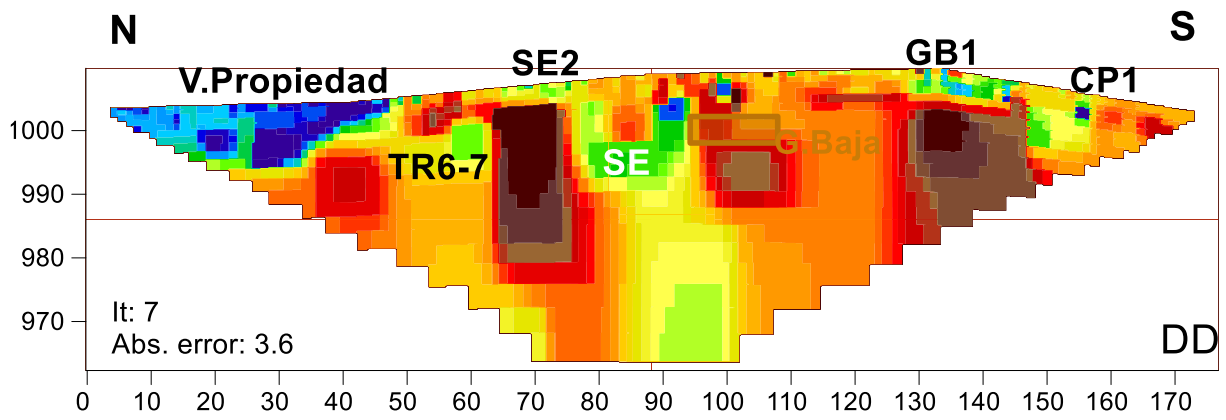


### ERT\_18

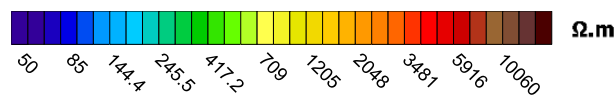
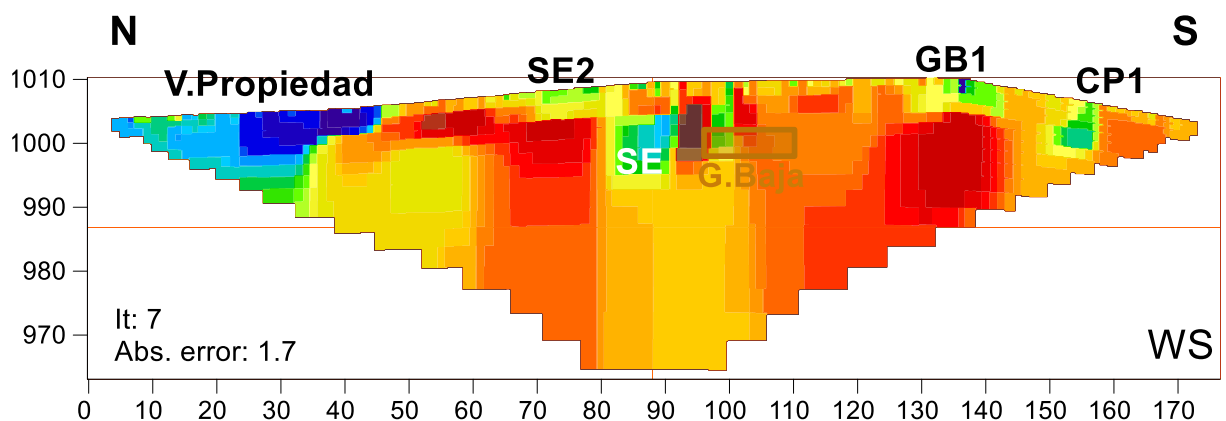
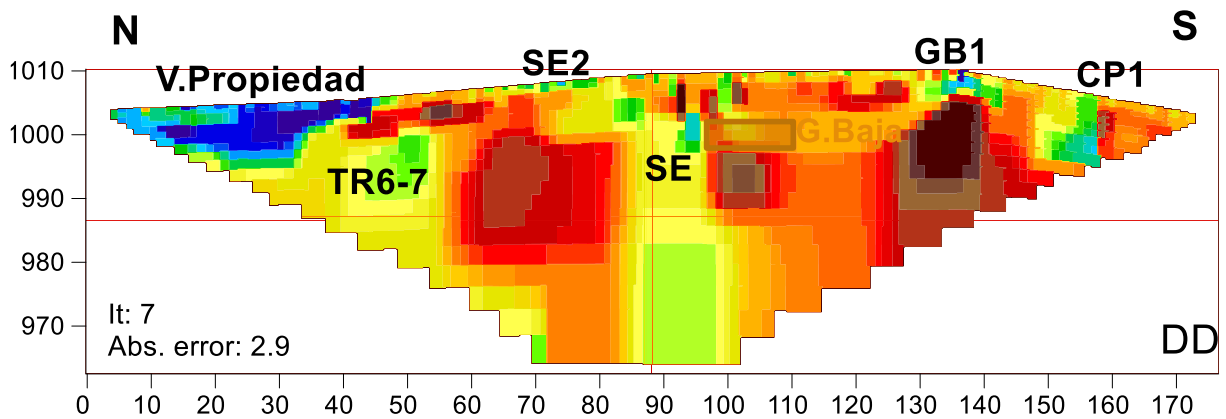




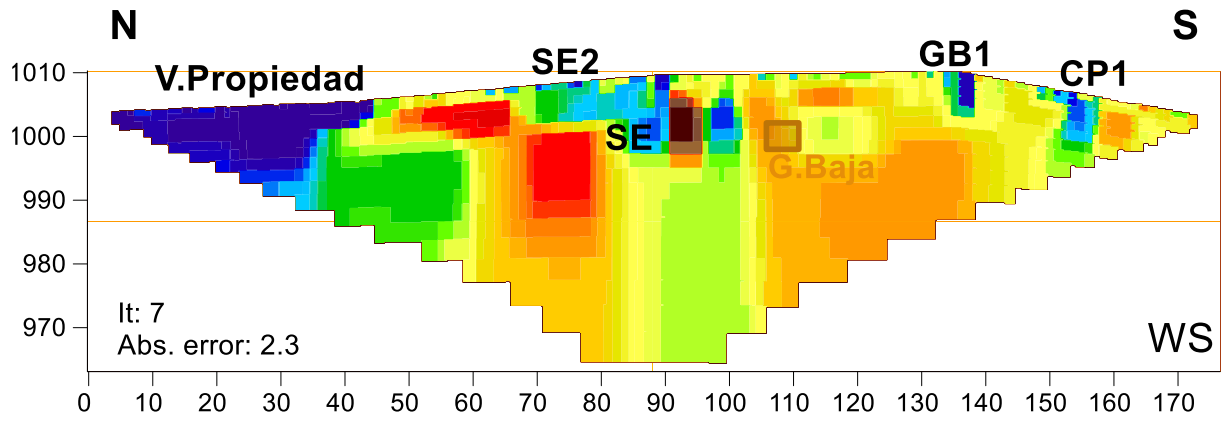
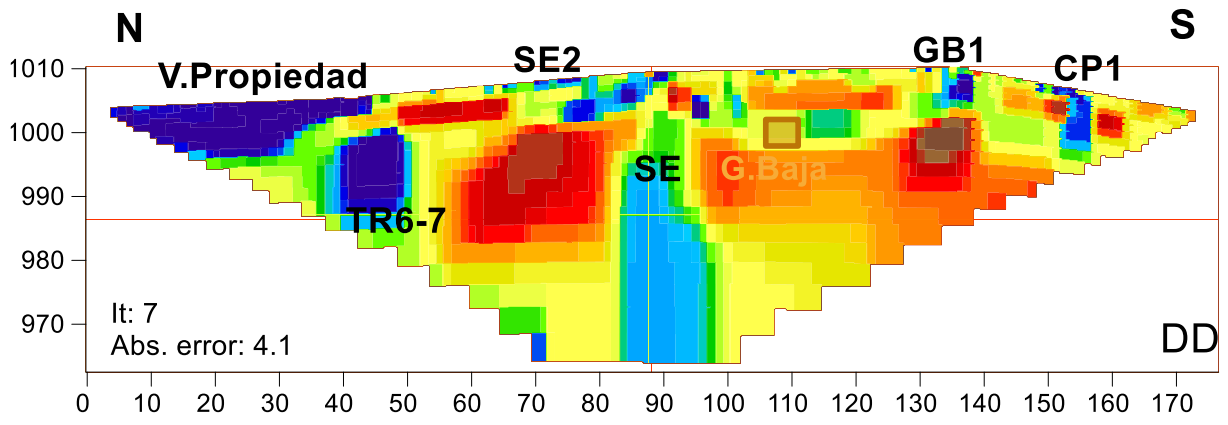
# ERT\_19



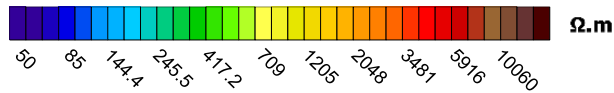
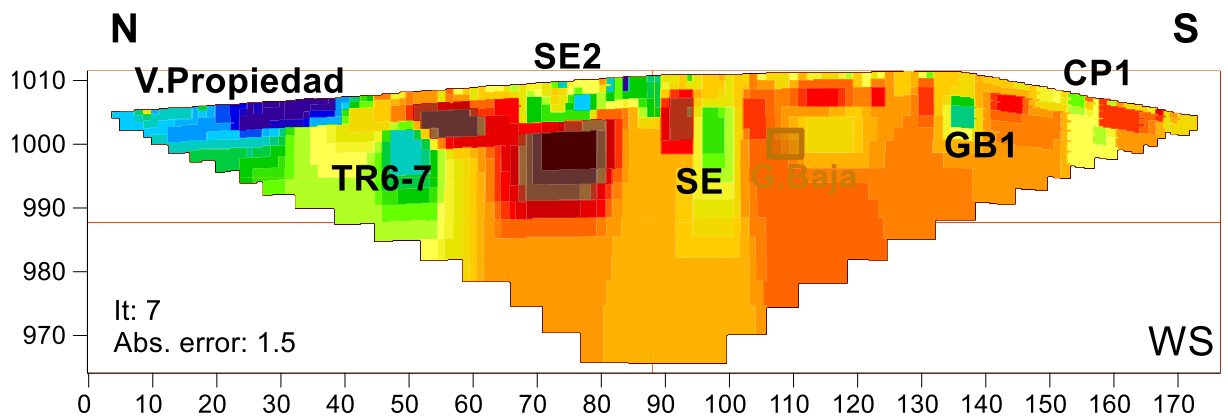
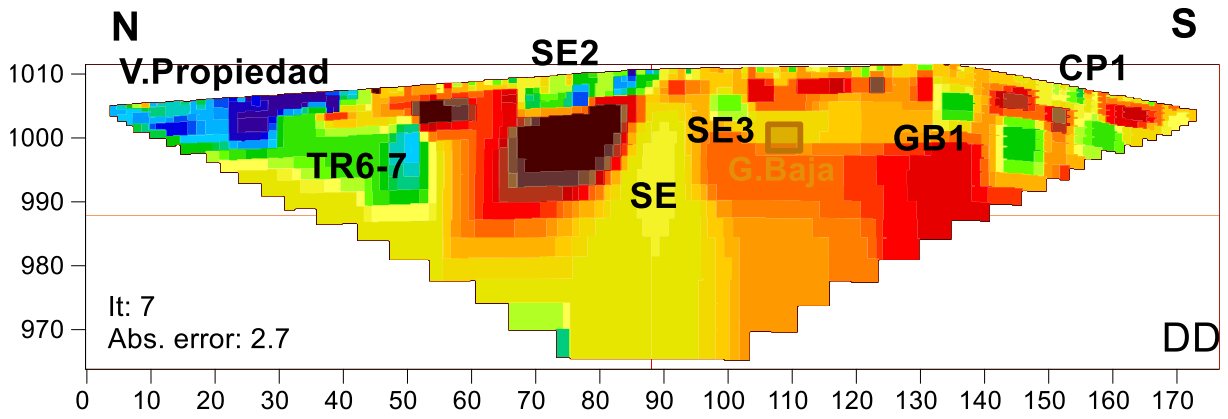
# ERT\_20



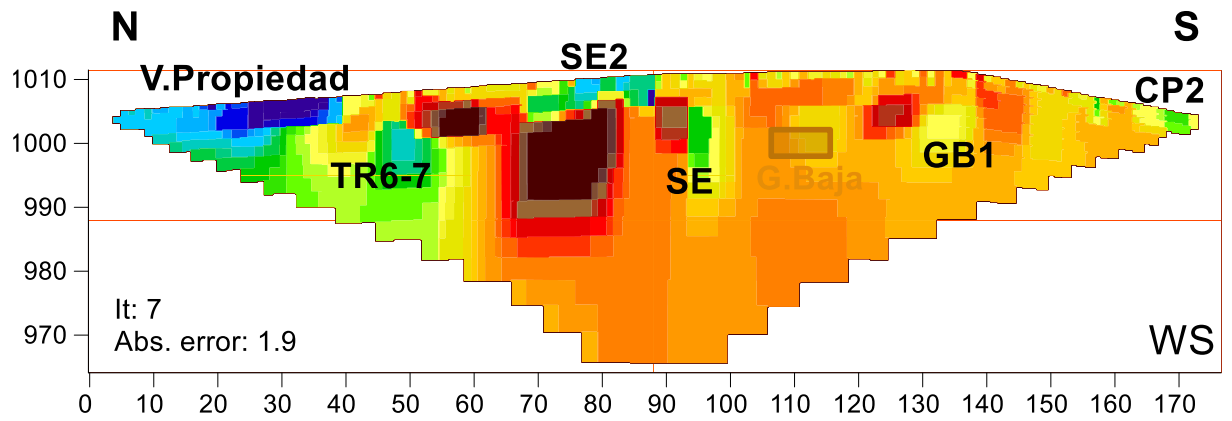
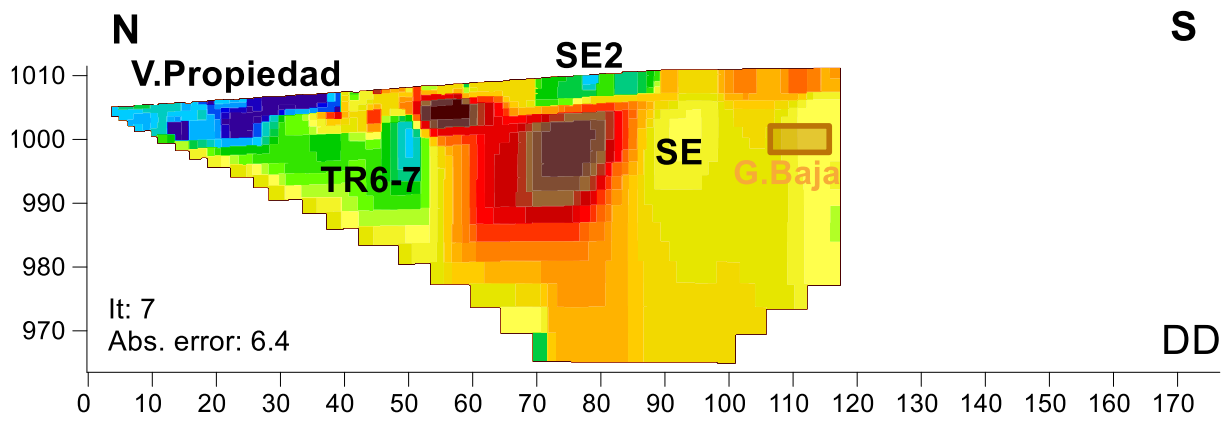
### ERT\_21



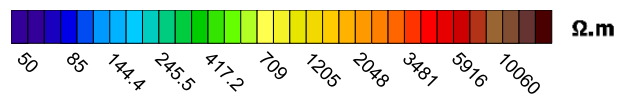
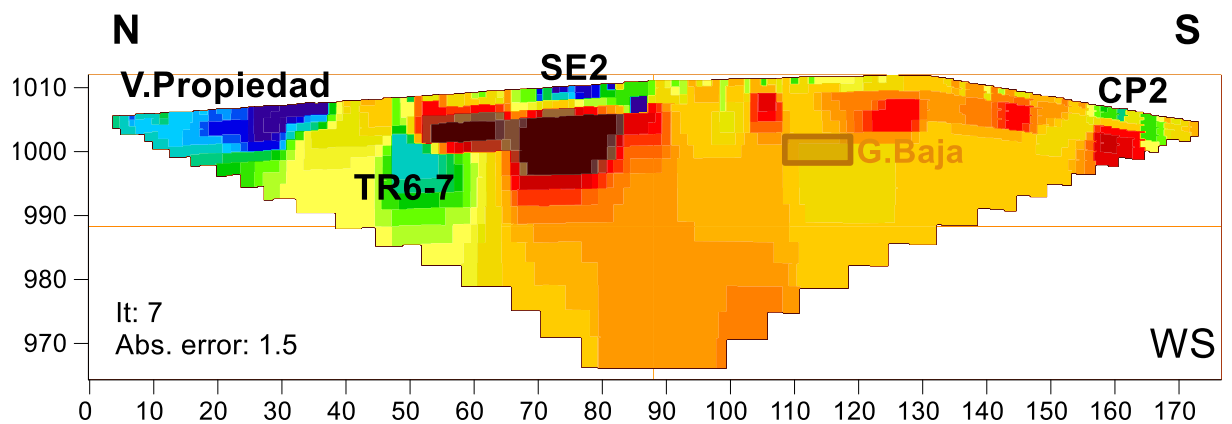
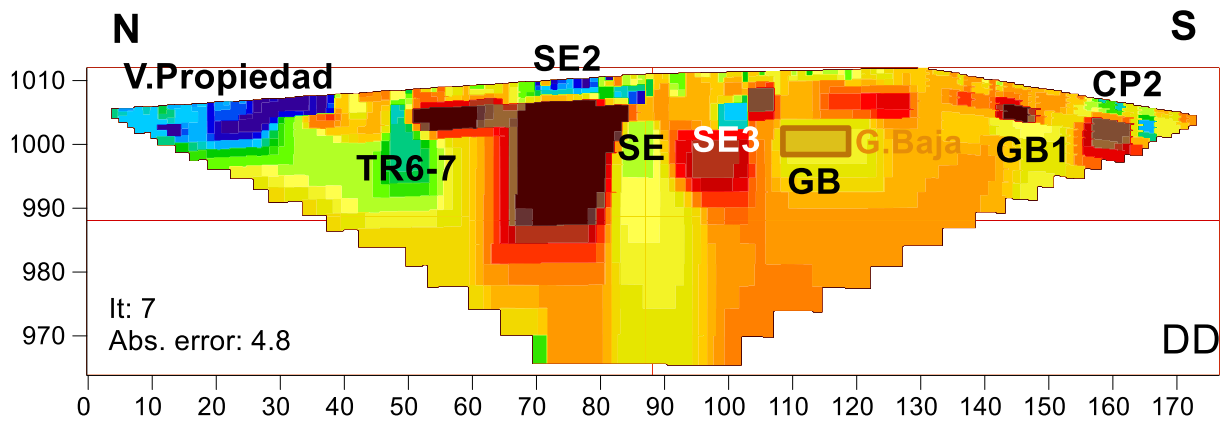
### ERT\_22



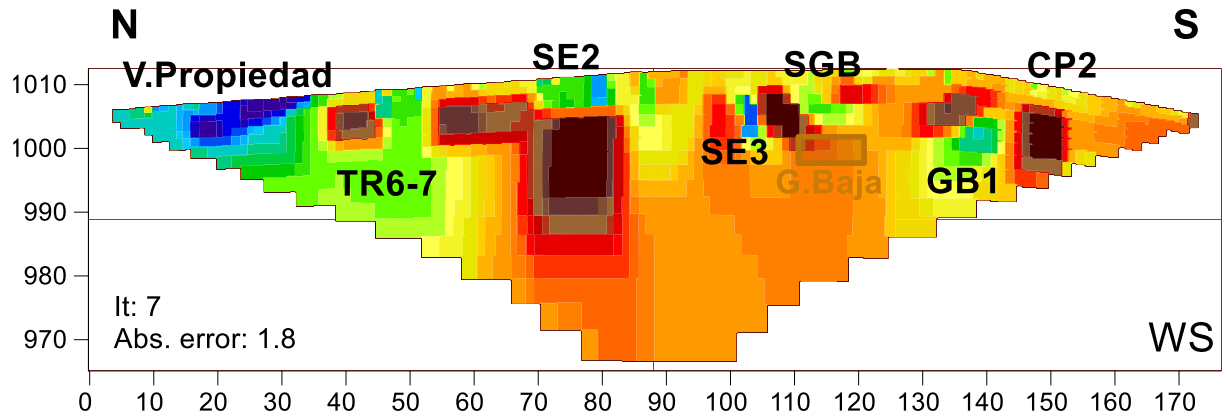
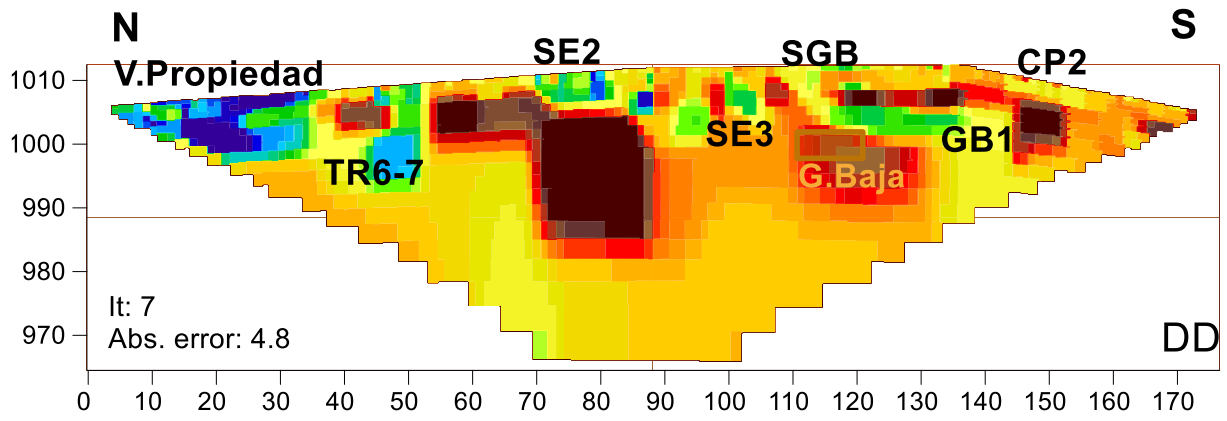
### ERT\_23



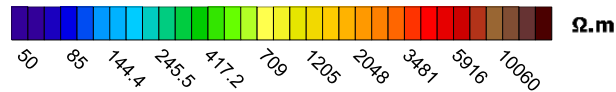
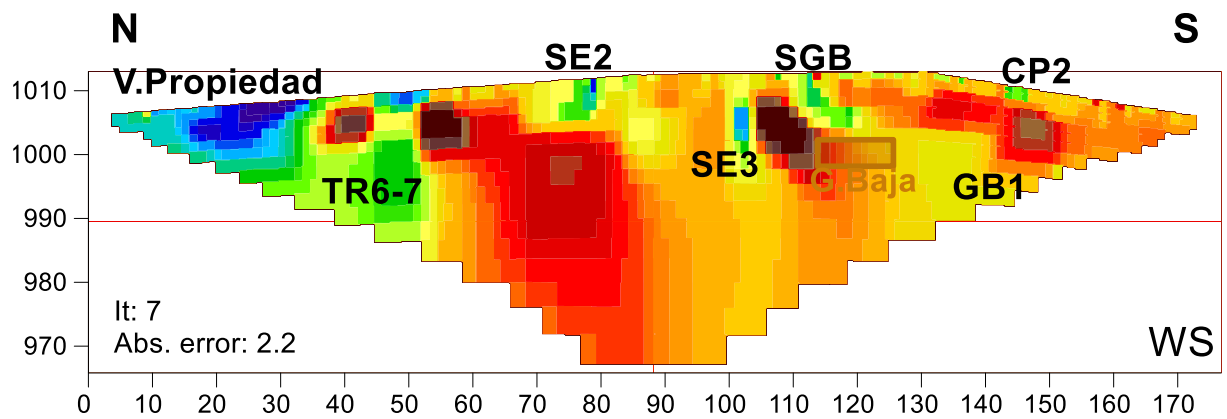
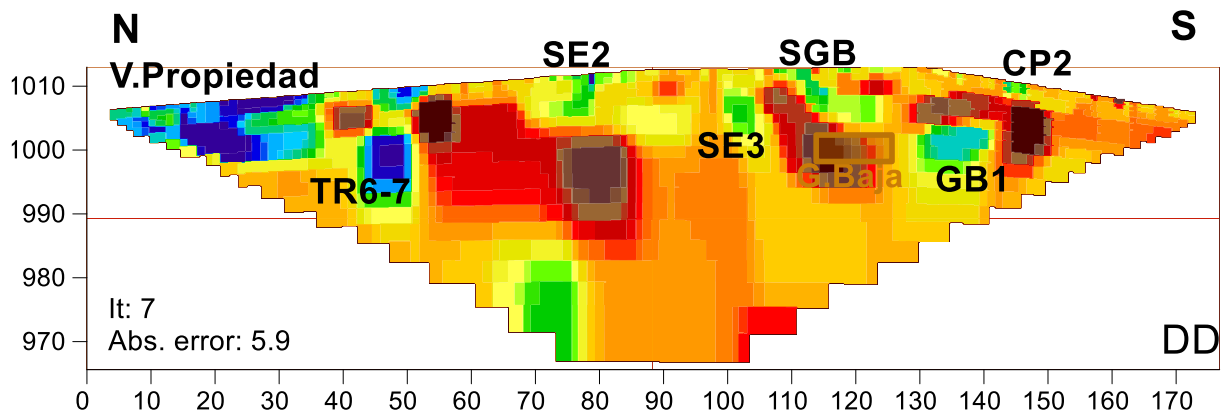
### ERT\_24



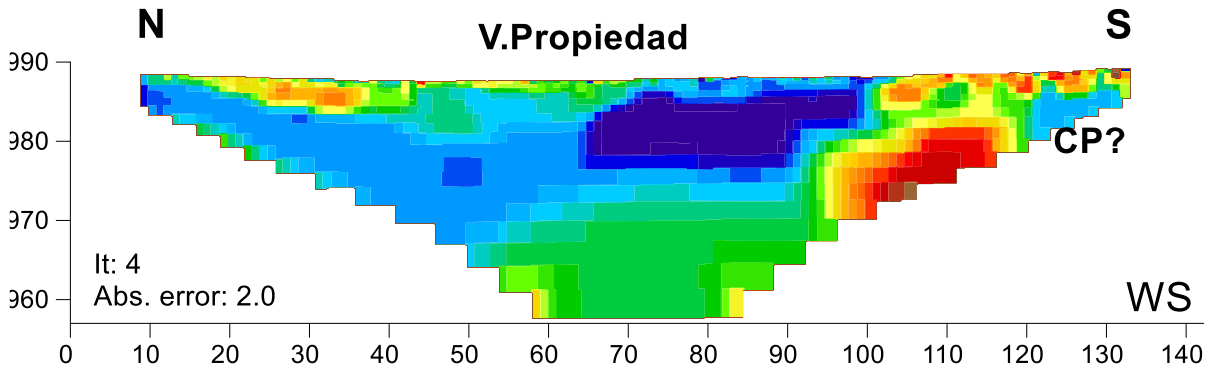
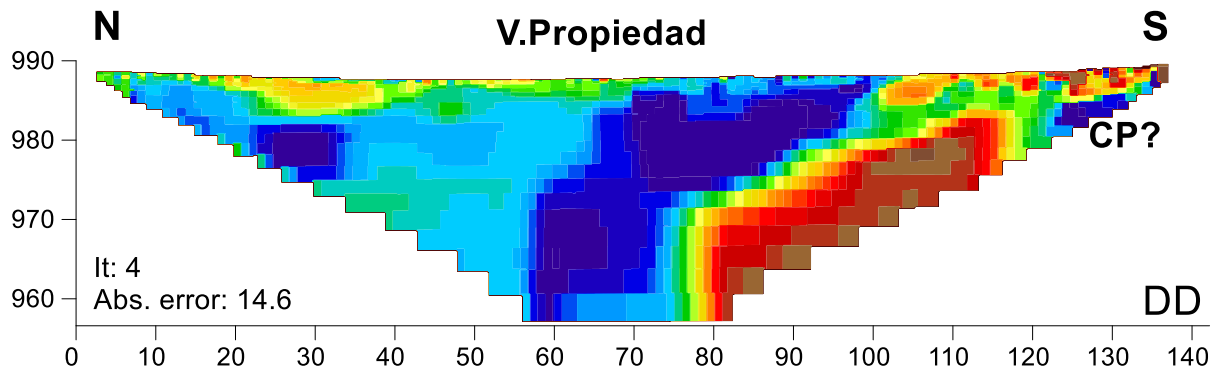
### ERT\_25



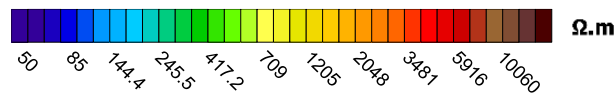
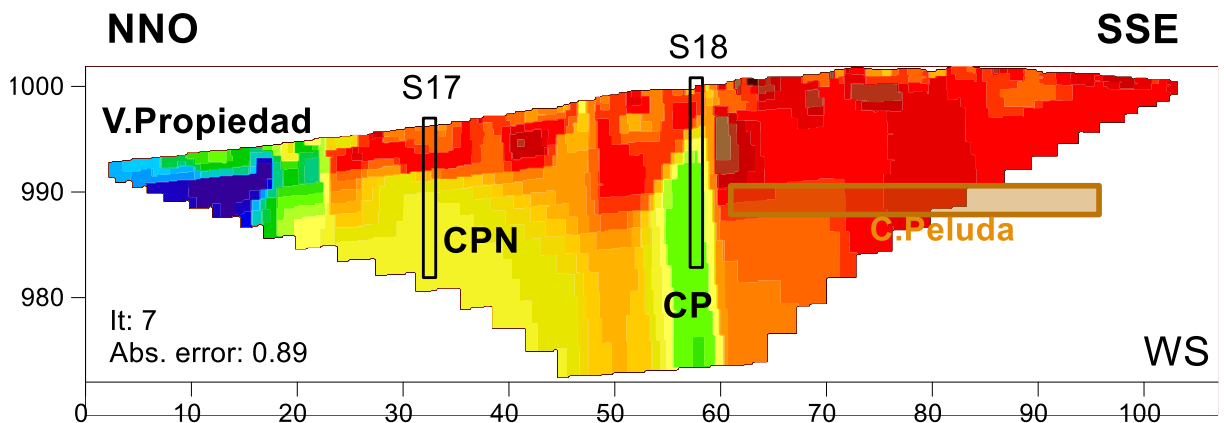
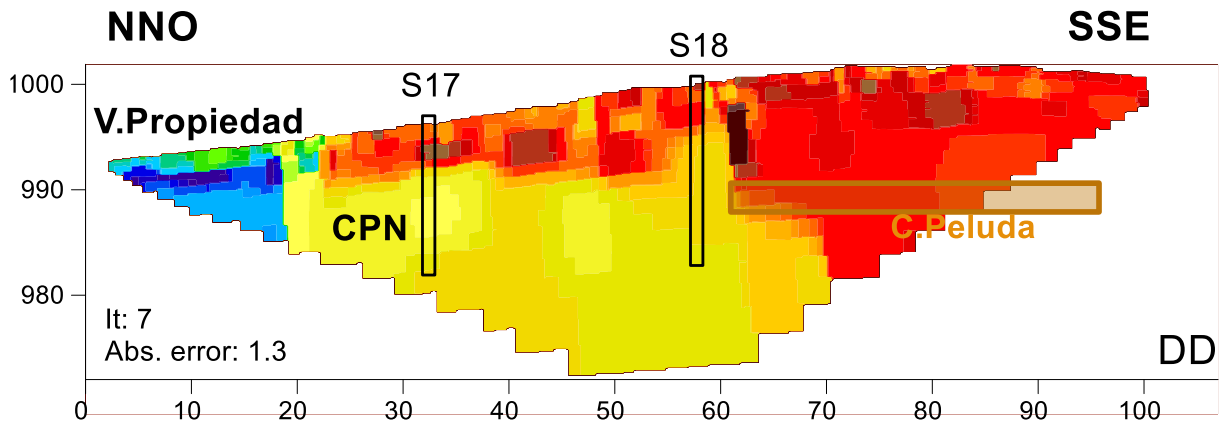
### ERT\_26



### ERT\_27

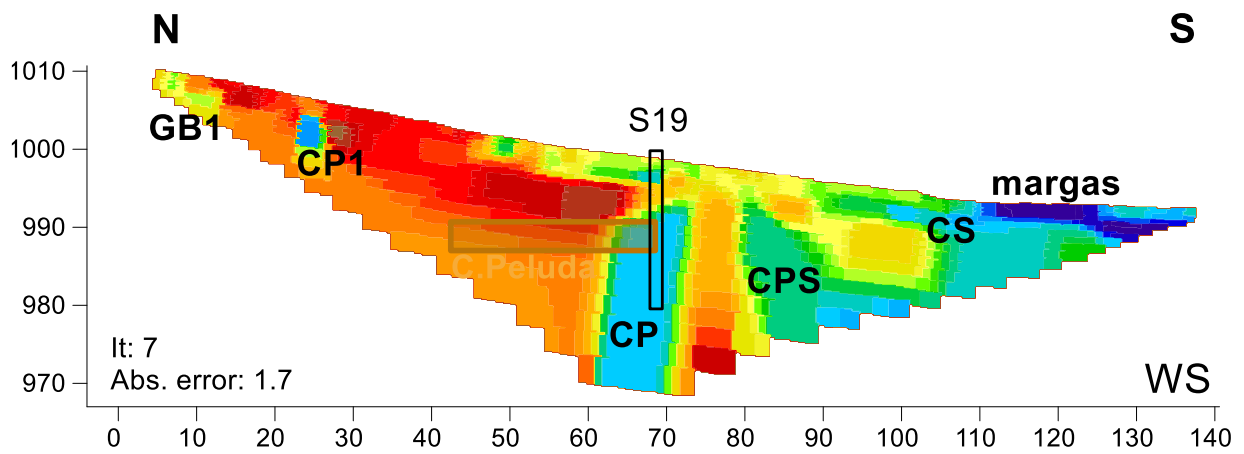
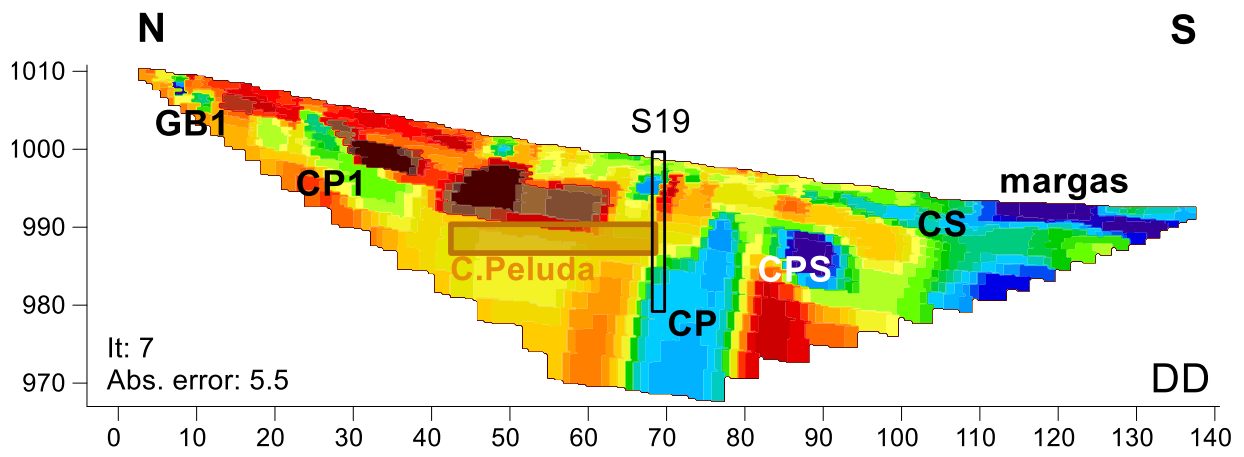


### ERT\_28

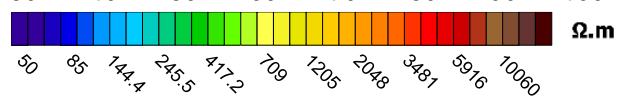
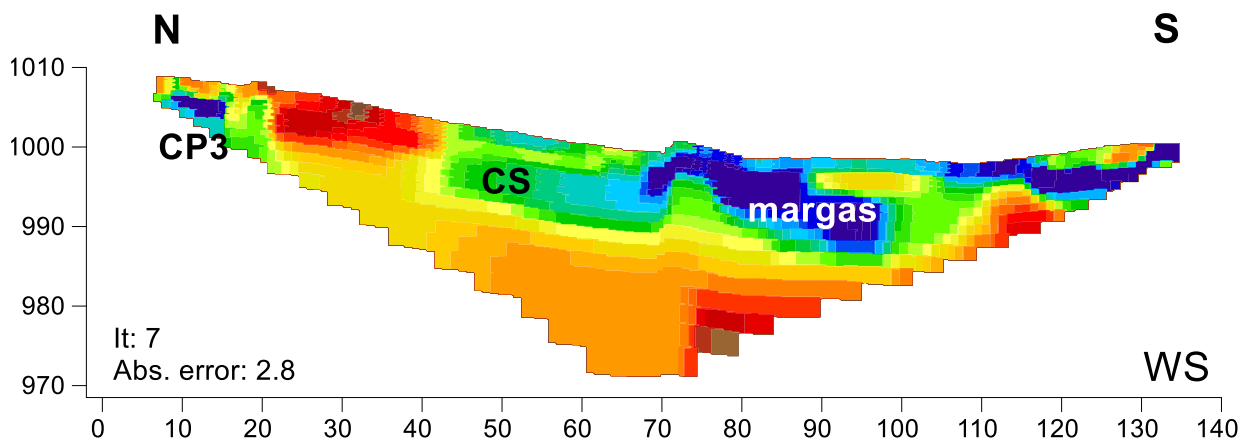
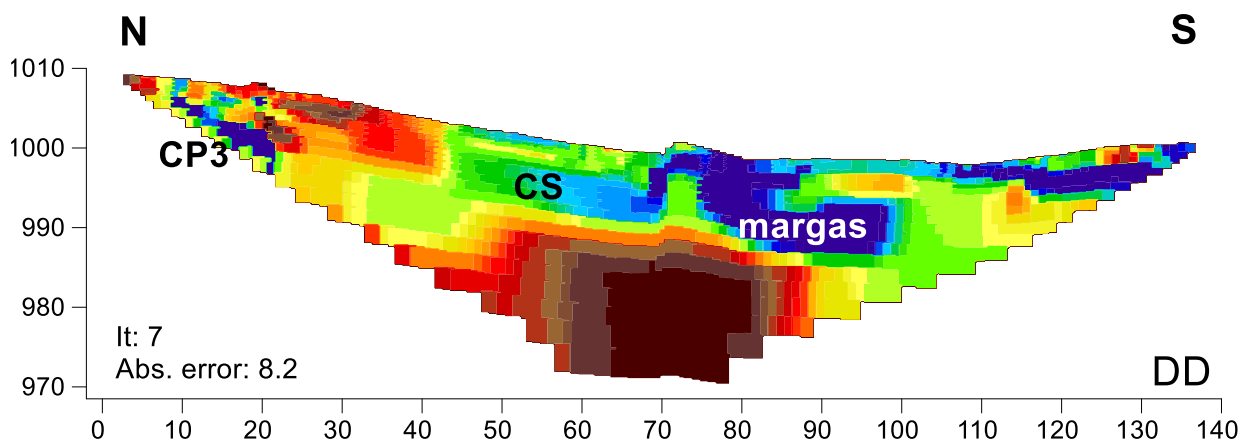




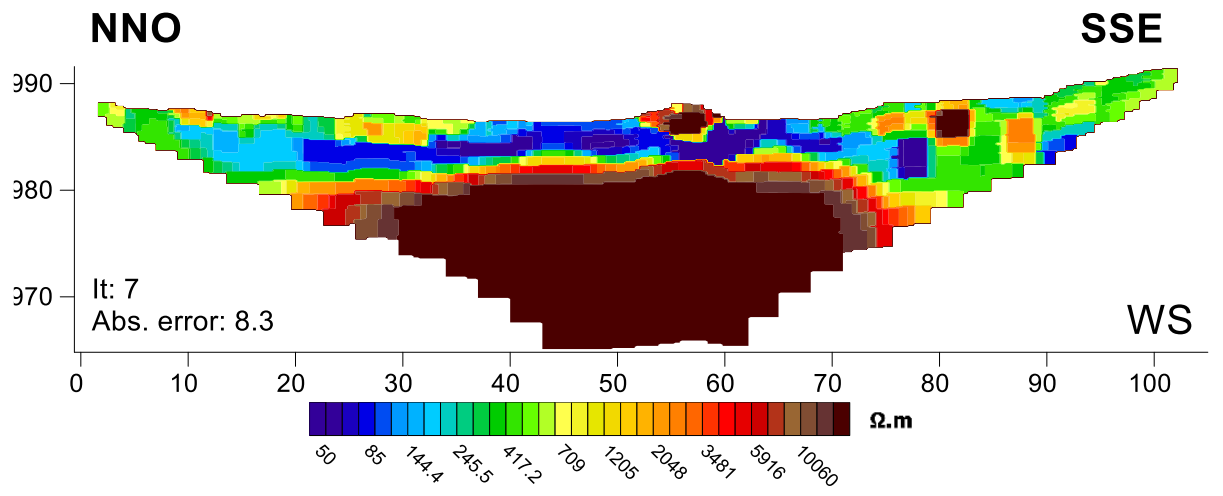
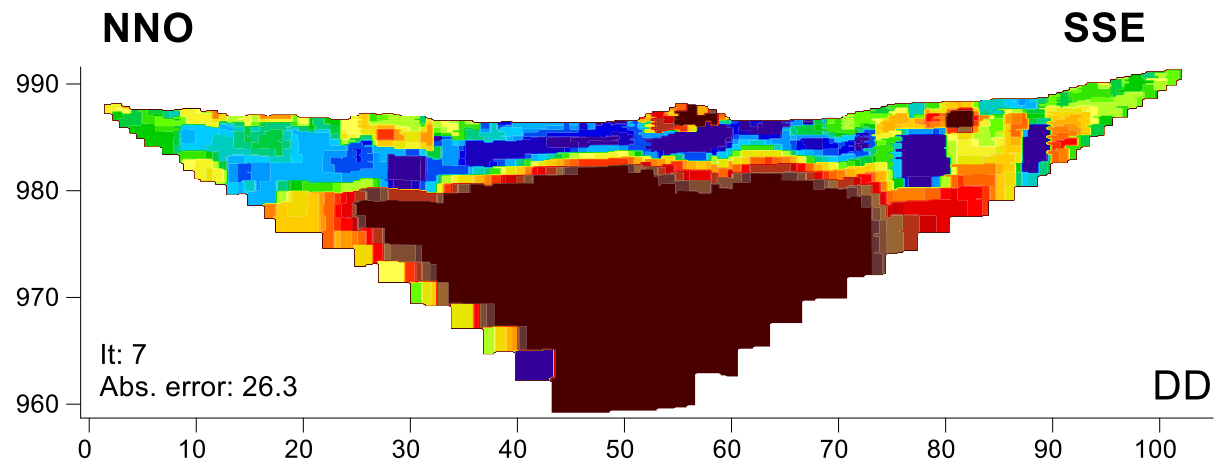
### ERT\_41



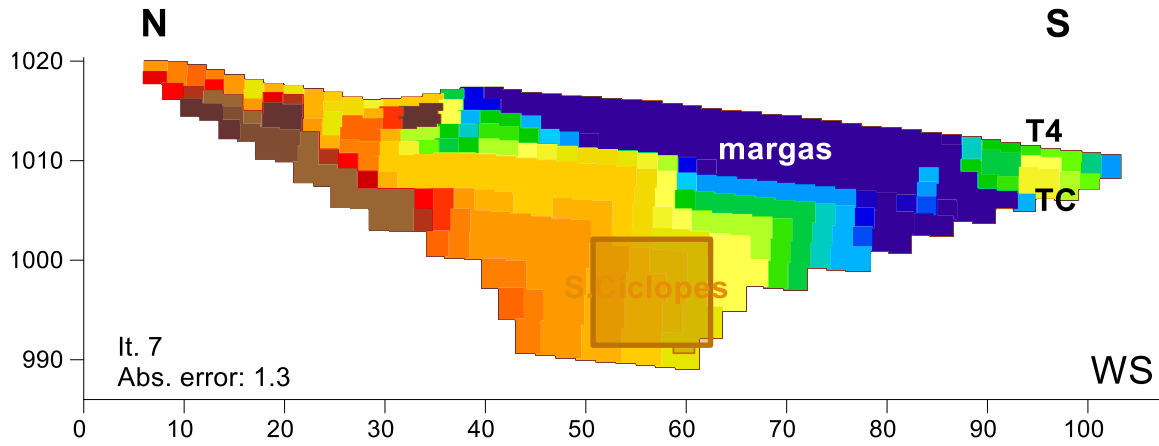
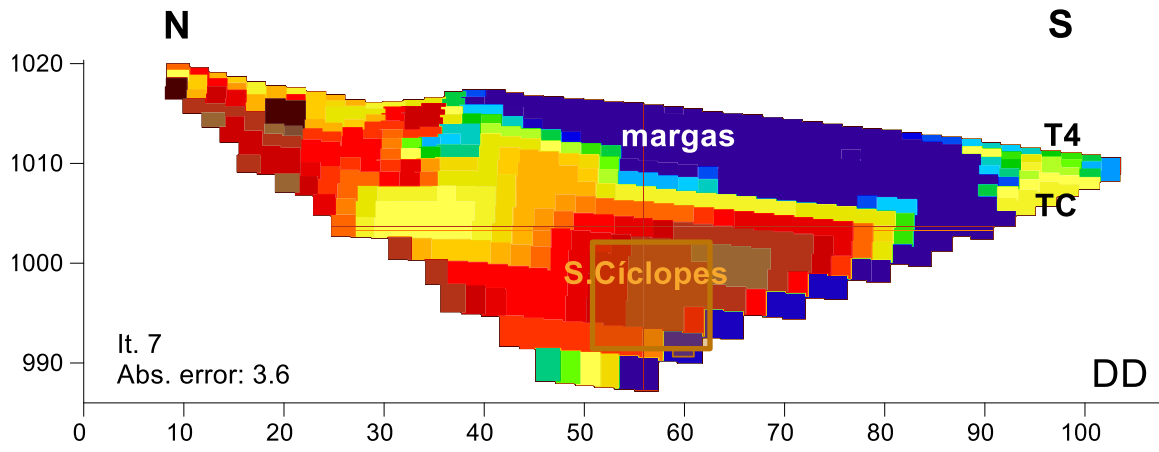
### ERT\_42



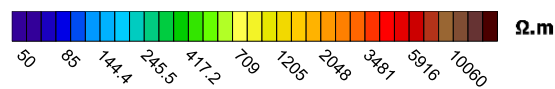
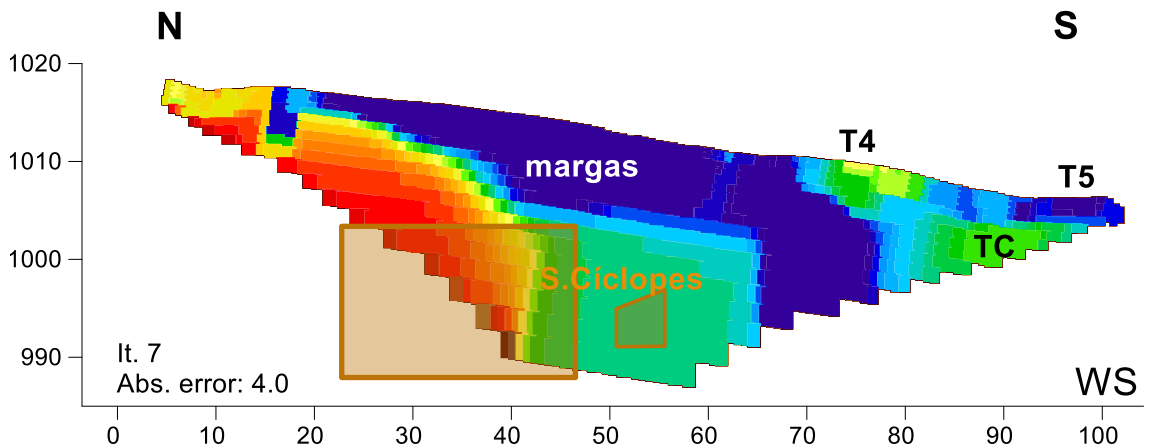
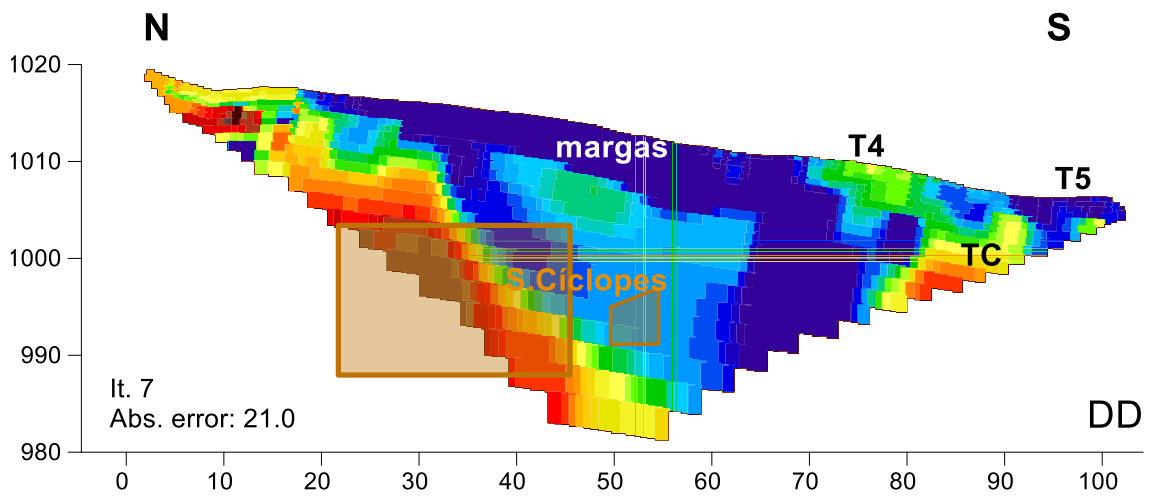
# ERT\_43



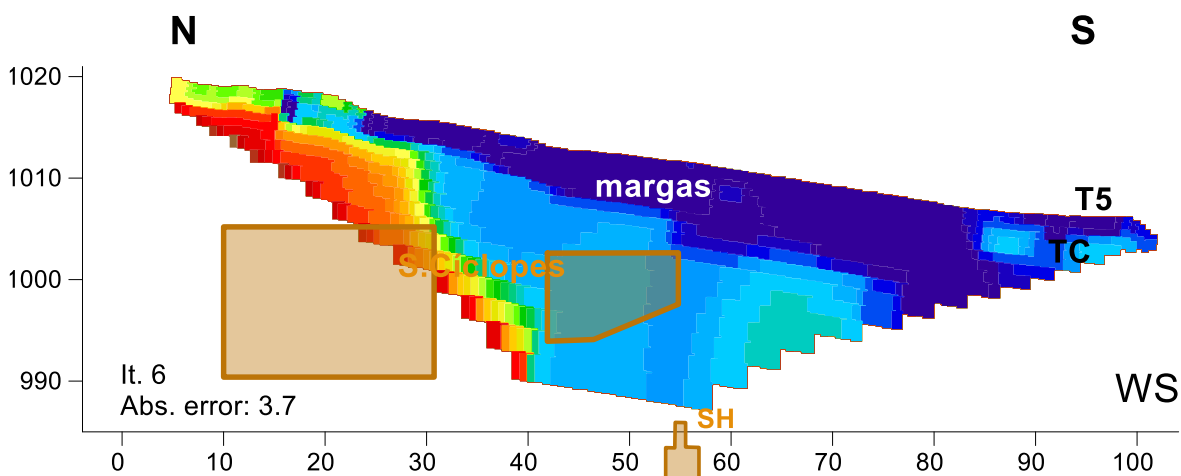
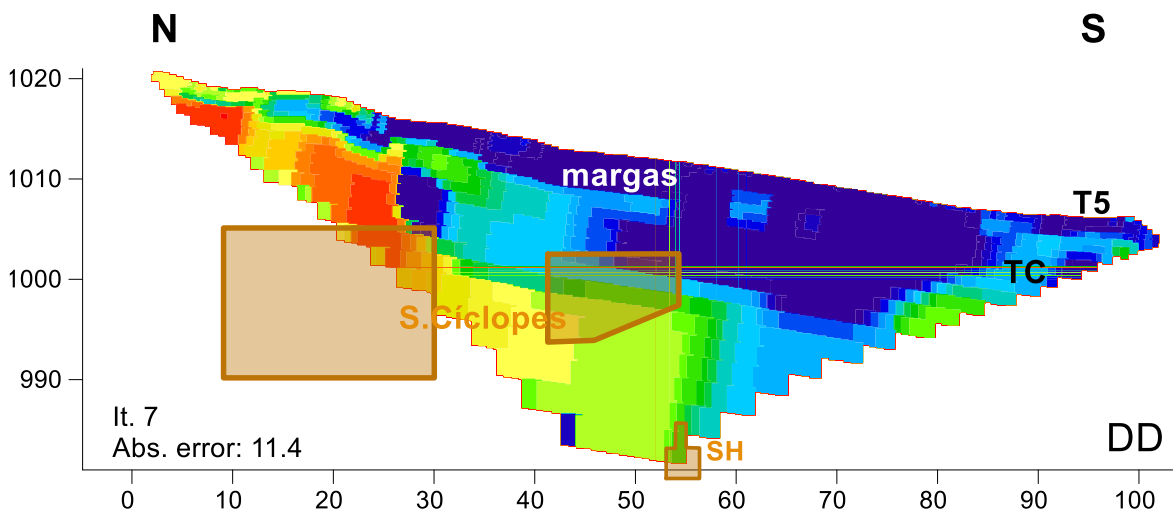
# ERT\_44



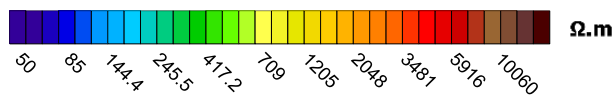
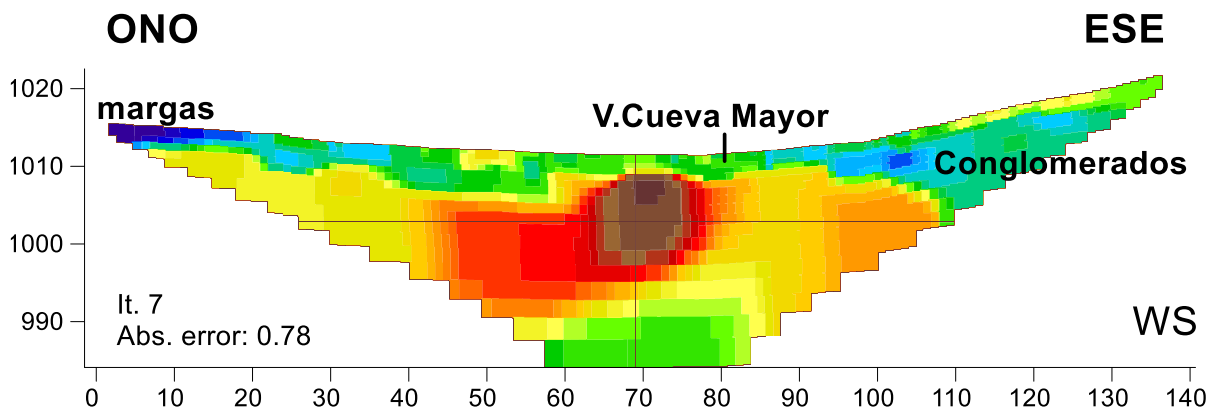
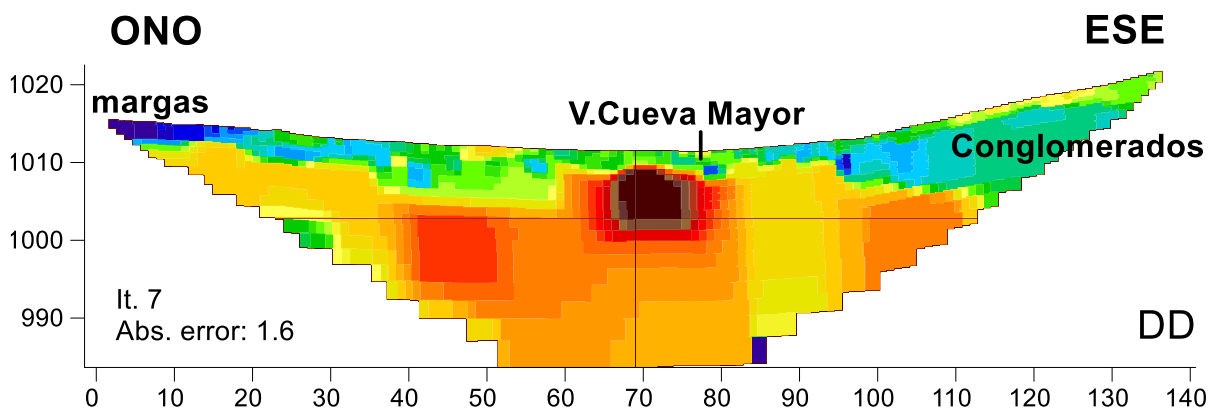
# ERT\_45



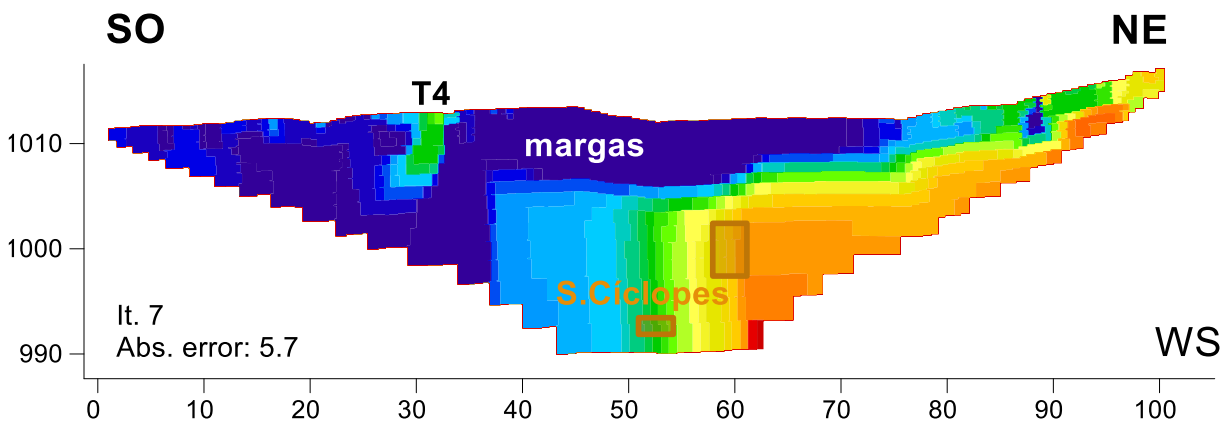
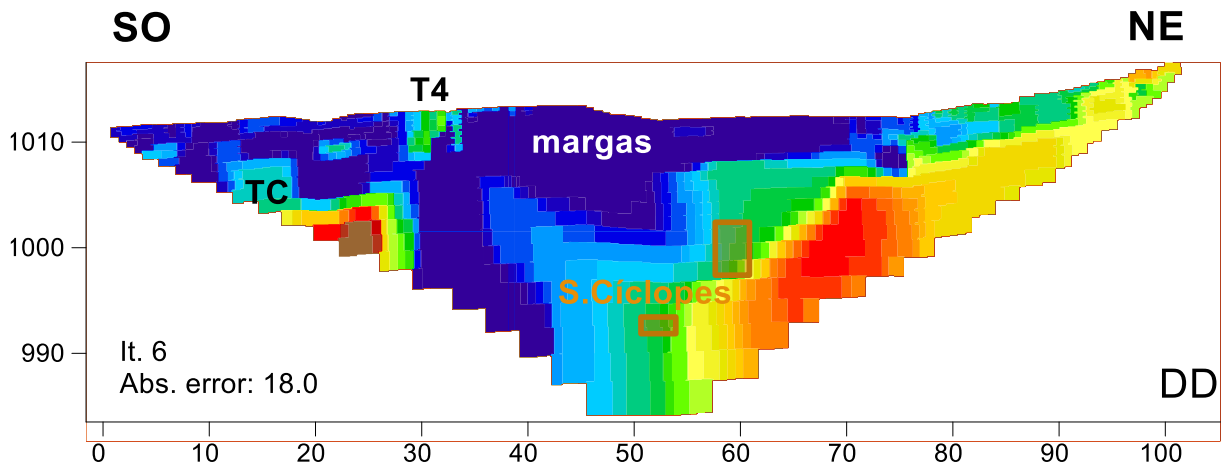
### ERT\_46



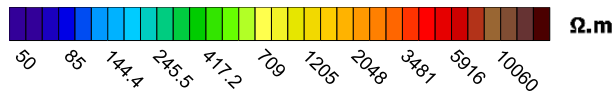
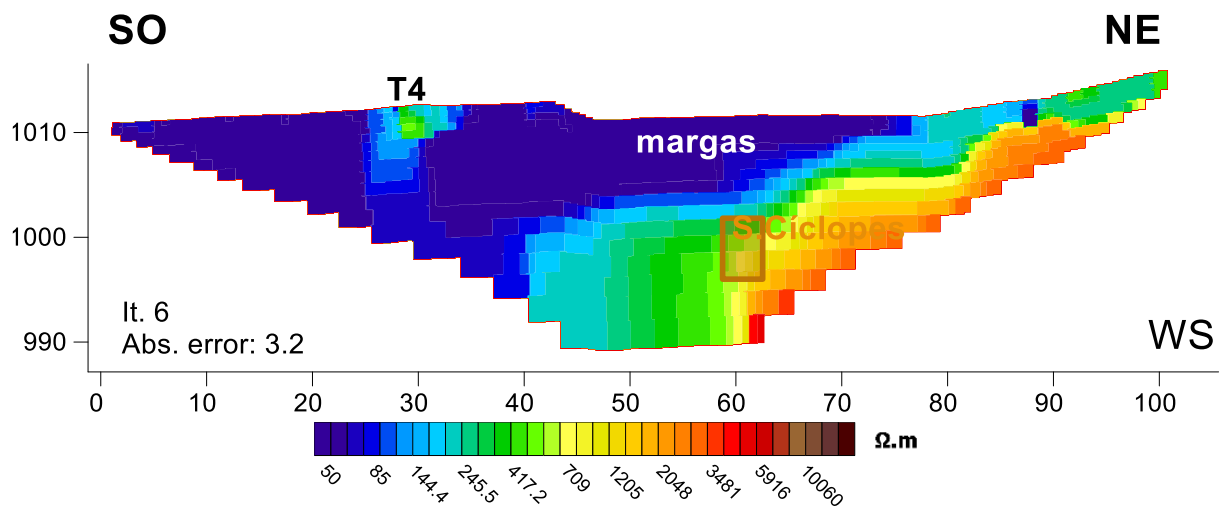
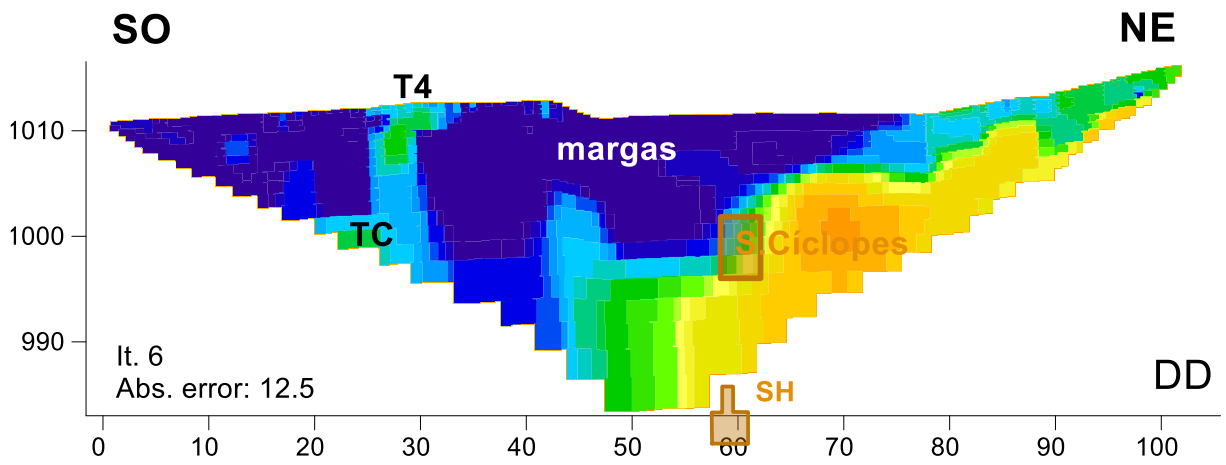
### ERT\_47



# ERT\_48

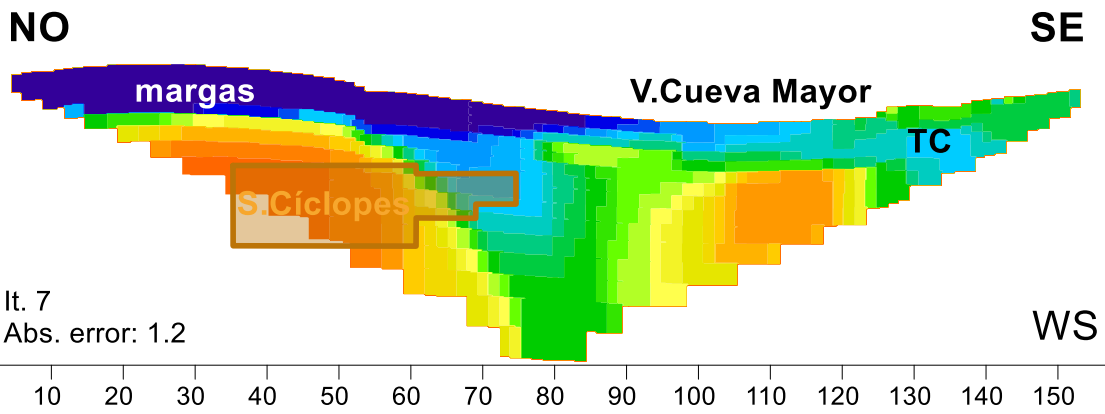
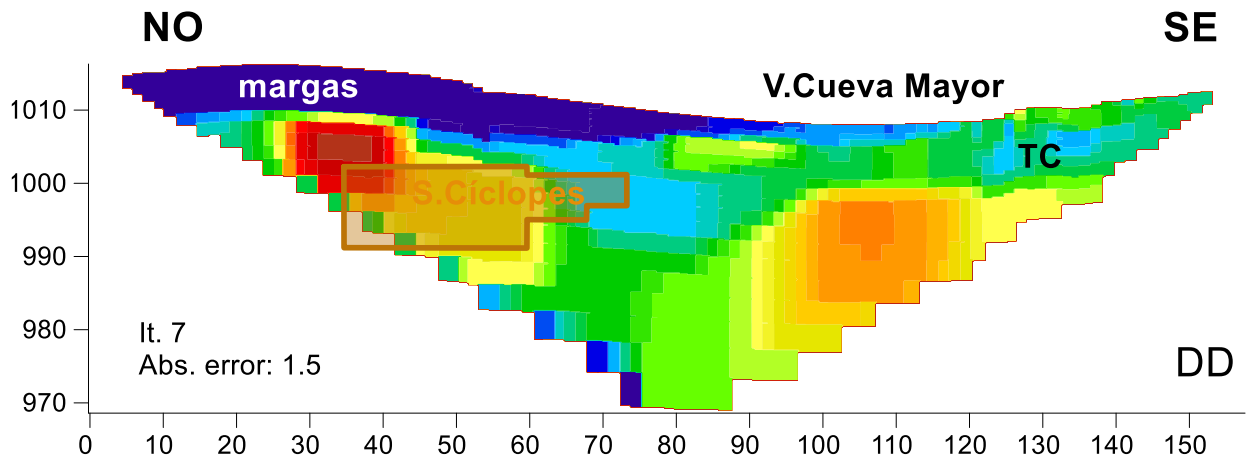


# ERT\_49

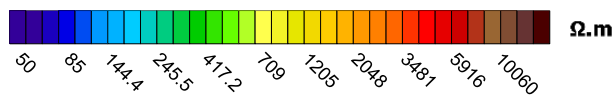
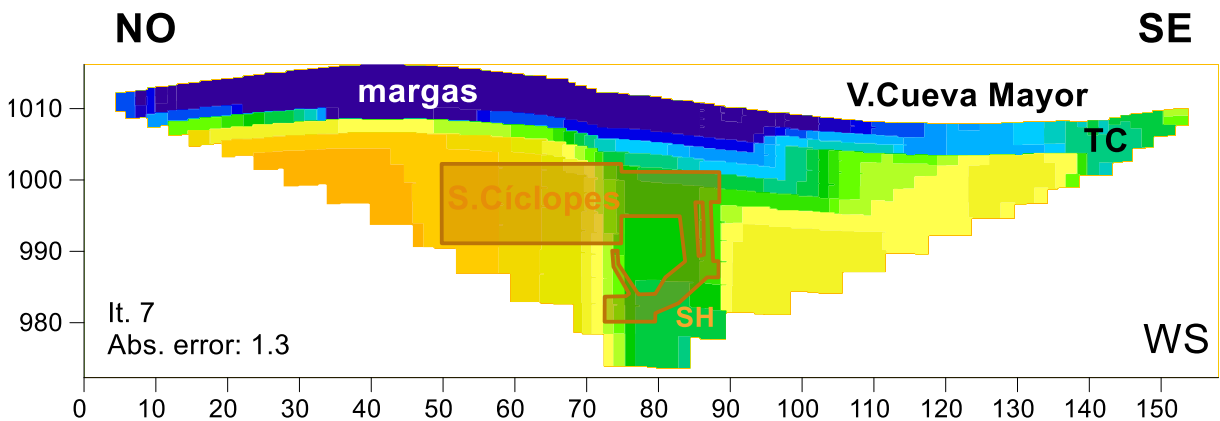
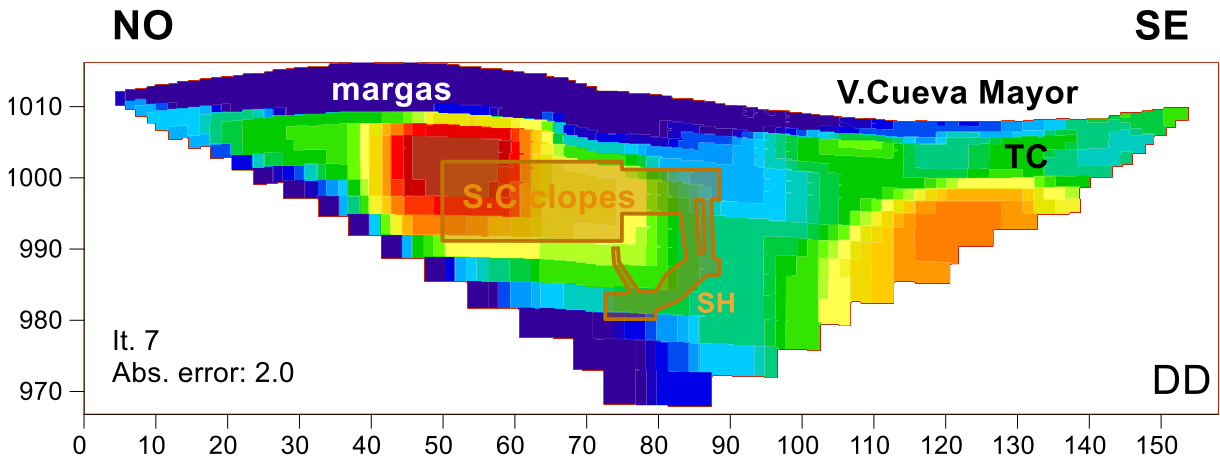




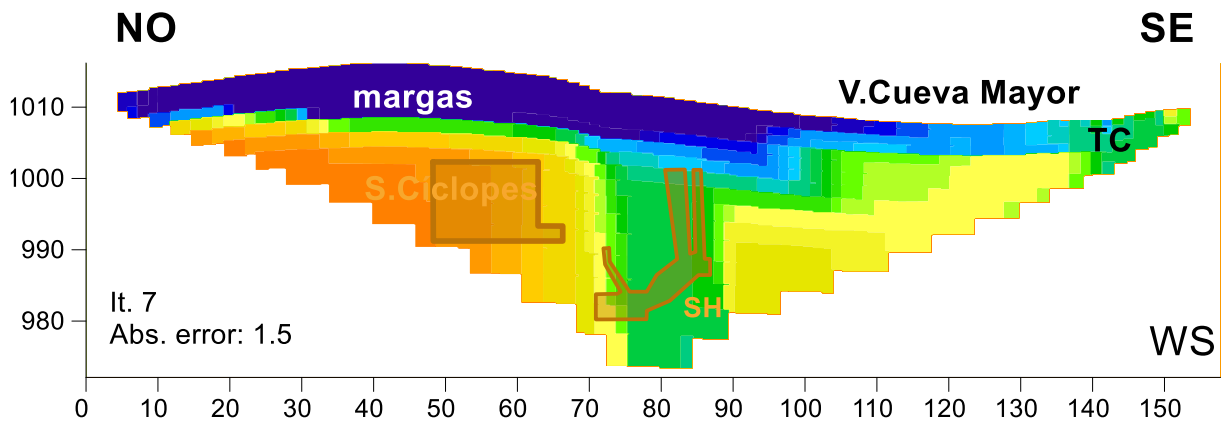
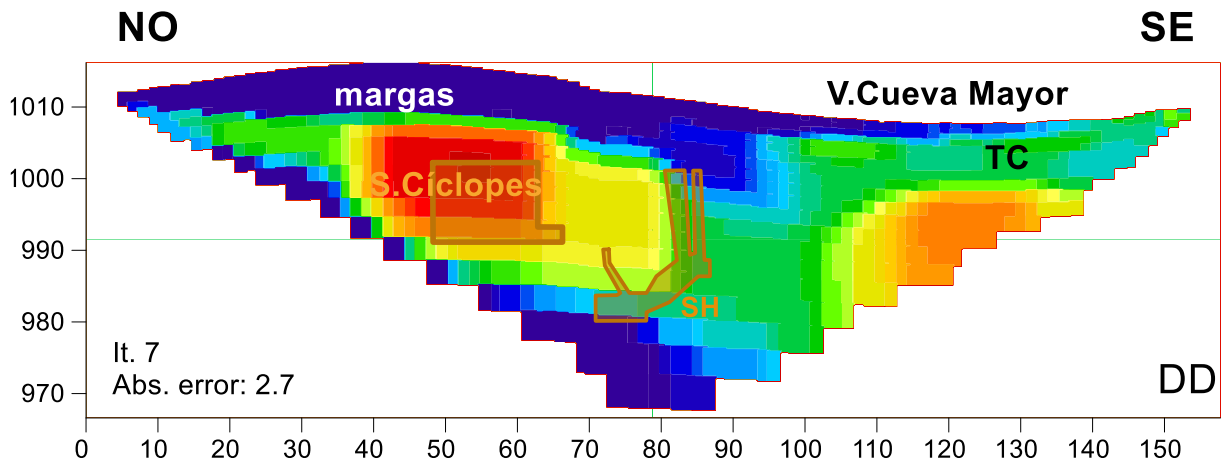
### ERT\_50



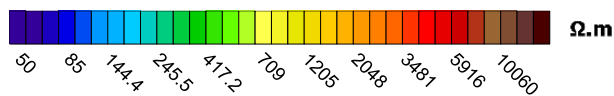
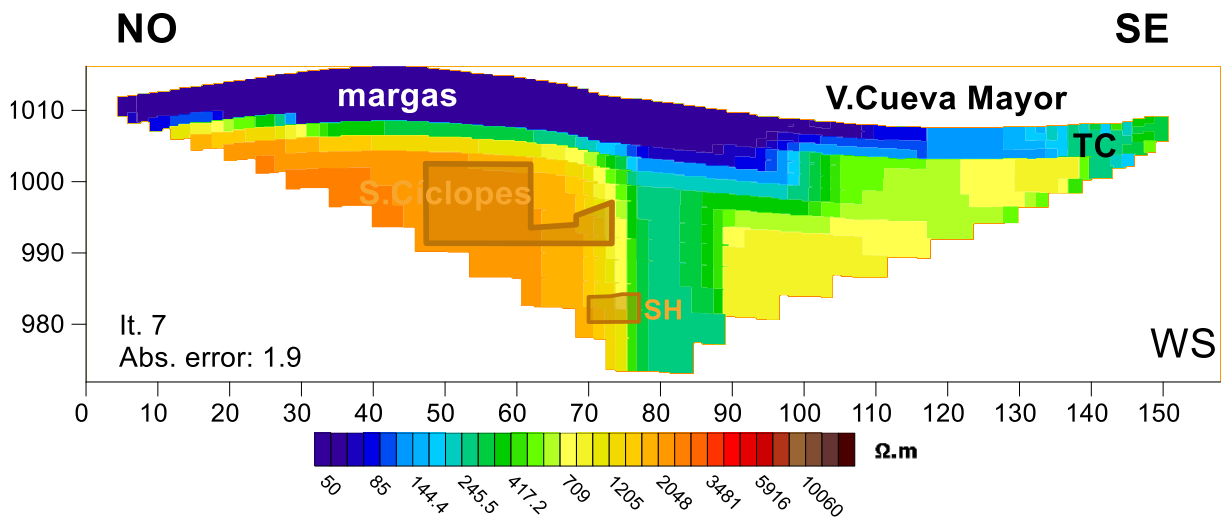
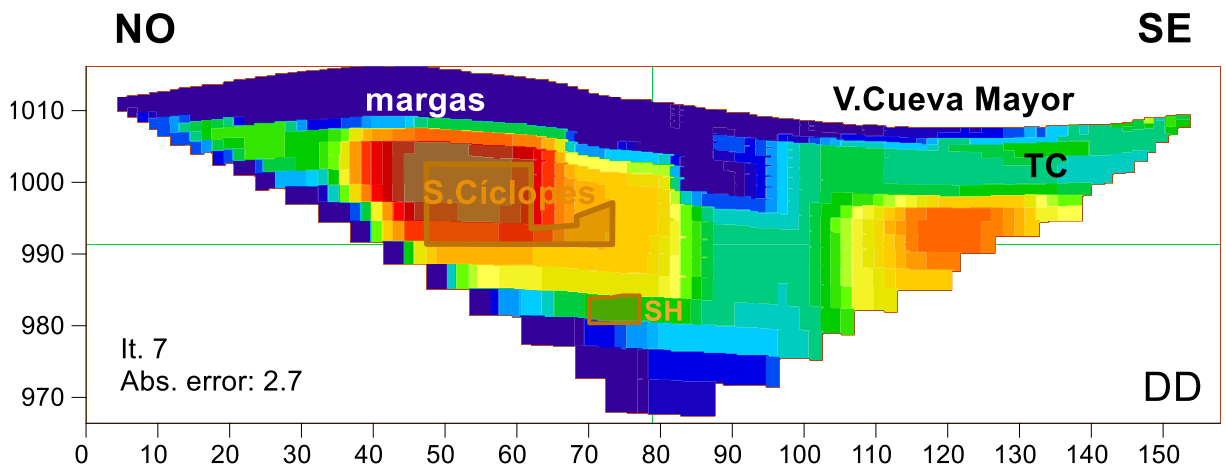
### ERT\_51



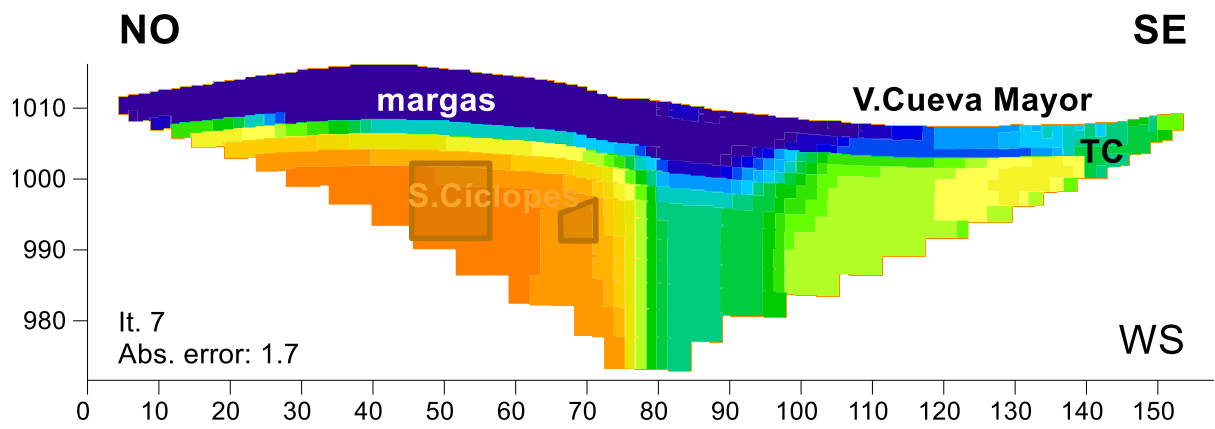
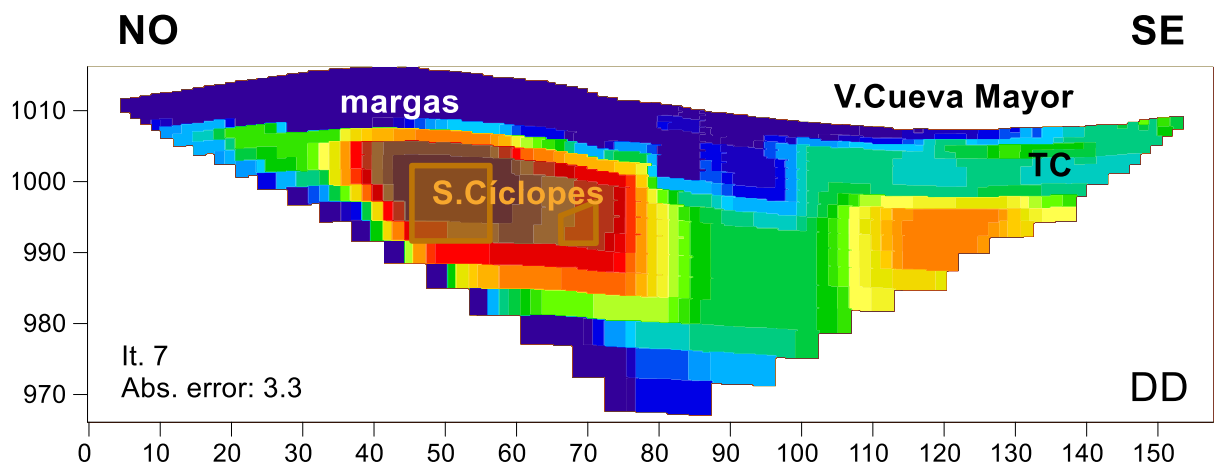
# ERT\_52



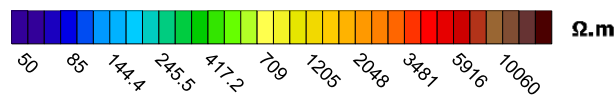
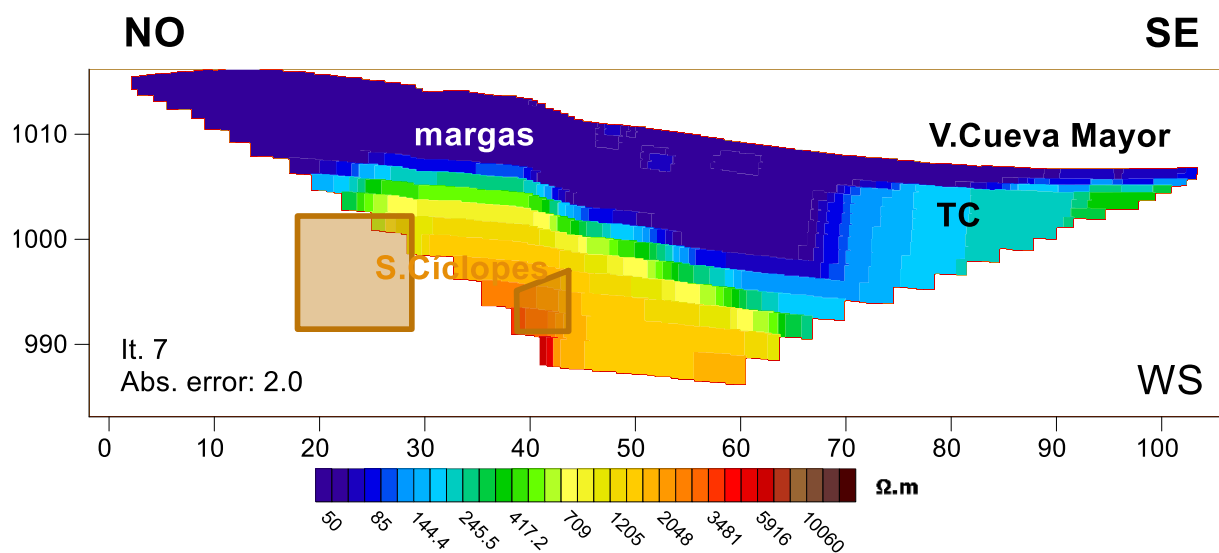
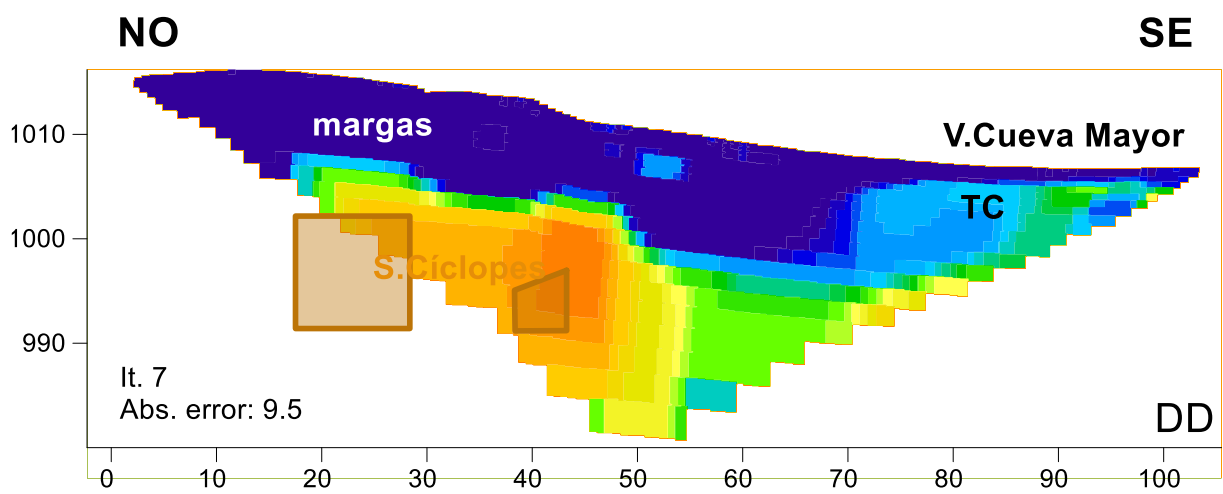
# ERT\_53



# ERT\_54



# ERT\_55



# ERT\_56

