

Aplicación de ERT (Electrical Resistivity Tomography) para la identificación de la morfología sub-superficial del yacimiento de Elefante - Sierra de Atapuerca (Burgos, España)

L. Bermejo Albarrán ^(a, b), A. I. Ortega Martínez ^(a), E. Aracil Ávila ^(c, d), R. Guérin ⁽ⁱ⁾, A. Pérez González ^(a), A. Benito Calvo ^(a), R. Huguet Pàmies ^(e, f), U. Maruri Brouard ^(d), R. Pérez Martínez ^(g), J. Vallverdú Poch ^(e, f), I. Campaña Lozano ^(a), J. A. Porres Benito ^(c), J. M. Bermúdez de Castro Risueño ^(a) y E. Carbonell Roura ^(e, f)

^(a) Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana, CENIEH. Burgos, España. lucia.bermejo@eb.cenieh.es

^(b) Departamento de Ciencias Históricas y Geografía, Universidad de Burgos, Burgos, España

^(c) Área de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e I.C.T. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos, Burgos, España

^(d) Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. Pozuelo de Alarcón, Madrid

^(e) IPHES, Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social. Campus Sescelades URV, Tarragona, España

^(f) Universitat Rovira i Virgili, Campus Catalunya, Tarragona, España

^(g) TAUP, Seu d'Urgel, Lleida, España

⁽ⁱ⁾ Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, Francia

PALABRAS CLAVE: Geofísica, ERT (Electrical Resistivity Tomography), Arqueología, Pleistoceno, Karst

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.

1. 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; Martínón-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 geoelectrica 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.

2. Situación y contexto geológico:

La Sierra de Atapuerca, a 15 km al este de Burgos (Figura 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.

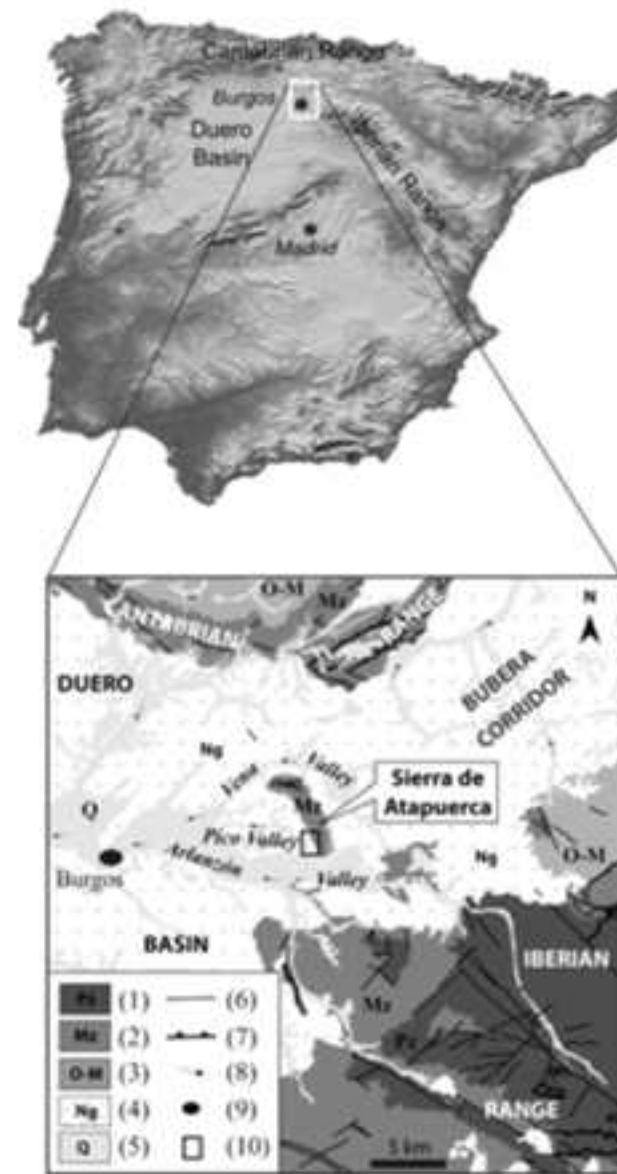


Figura 1. Situación geográfica de la Sierra de Atapuerca (Ortega *et al.* 2013)

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 (Figura 2).

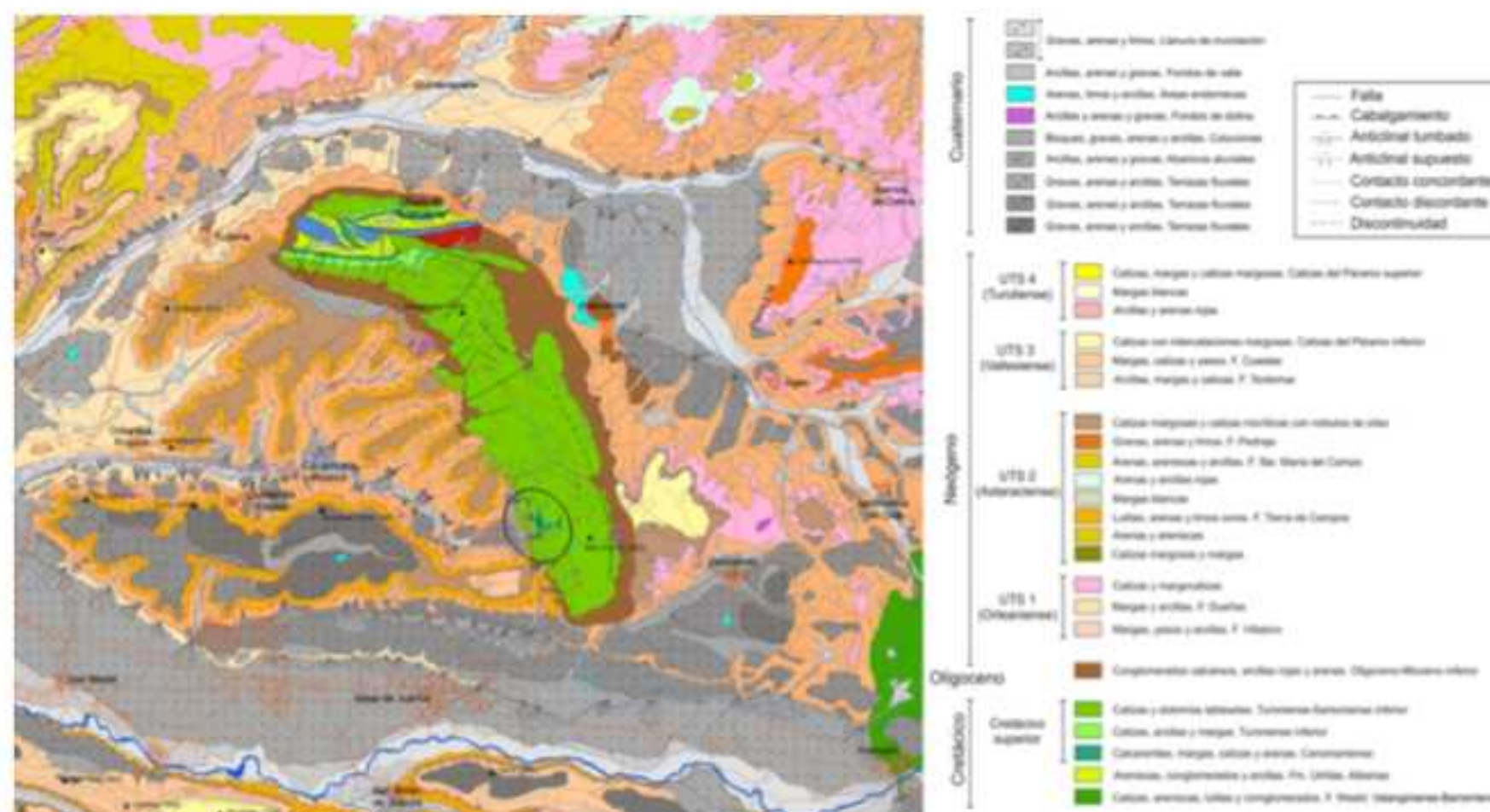


Figura 2. Mapa geomorfológico de la Sierra de Atapuerca (Benito-Calvo, 2004). El círculo negro señala la situación del karst de la Sierra de Atapuerca.

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 (Figura 3) (Ortega, 2009). Esta fracturación es por lo tanto importante en la interpretación de los perfiles geofísicos.

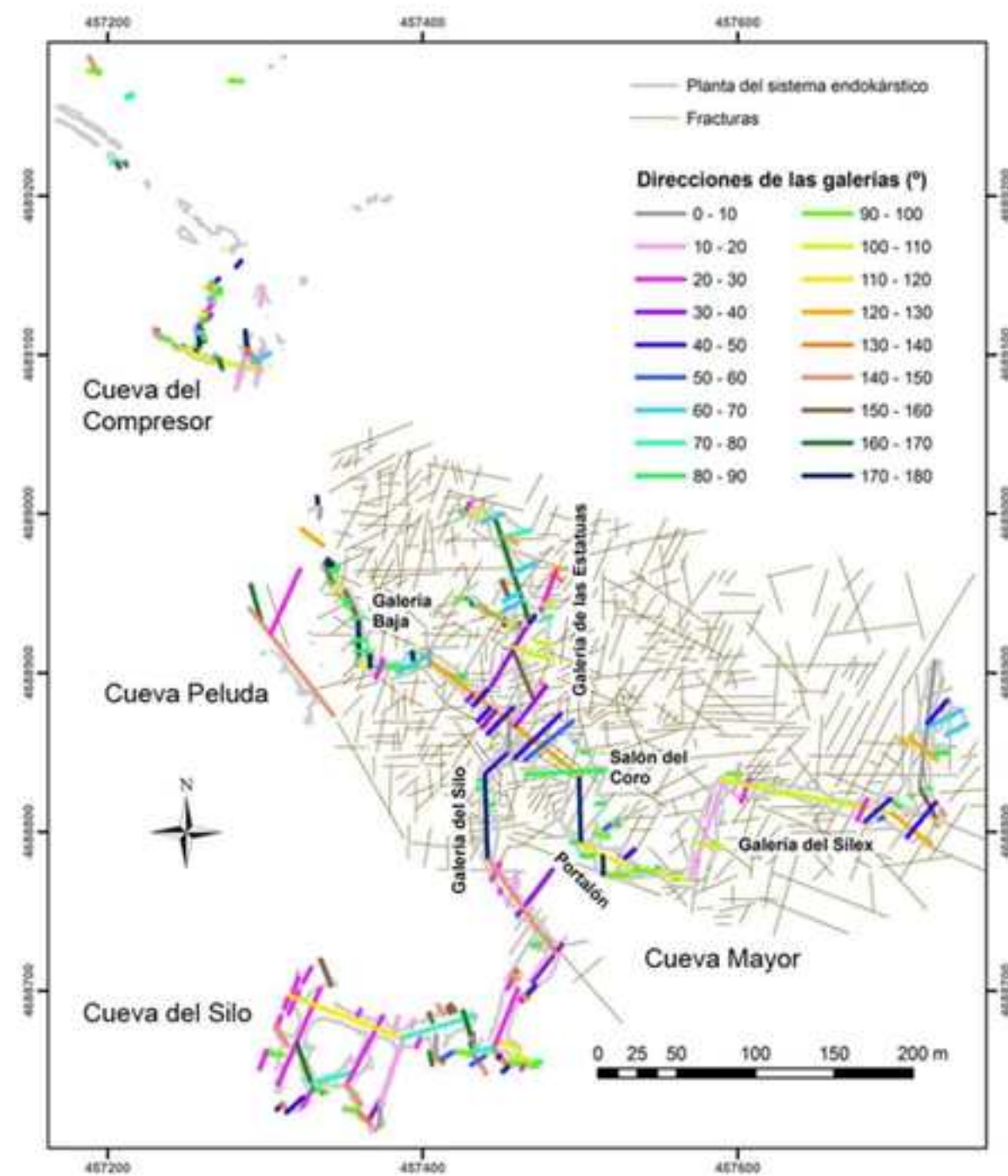


Figura 3. Mapa de fracturación y control estructural de los conductos del karst de la Sierra de Atapuerca (Ortega, 2009)

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.

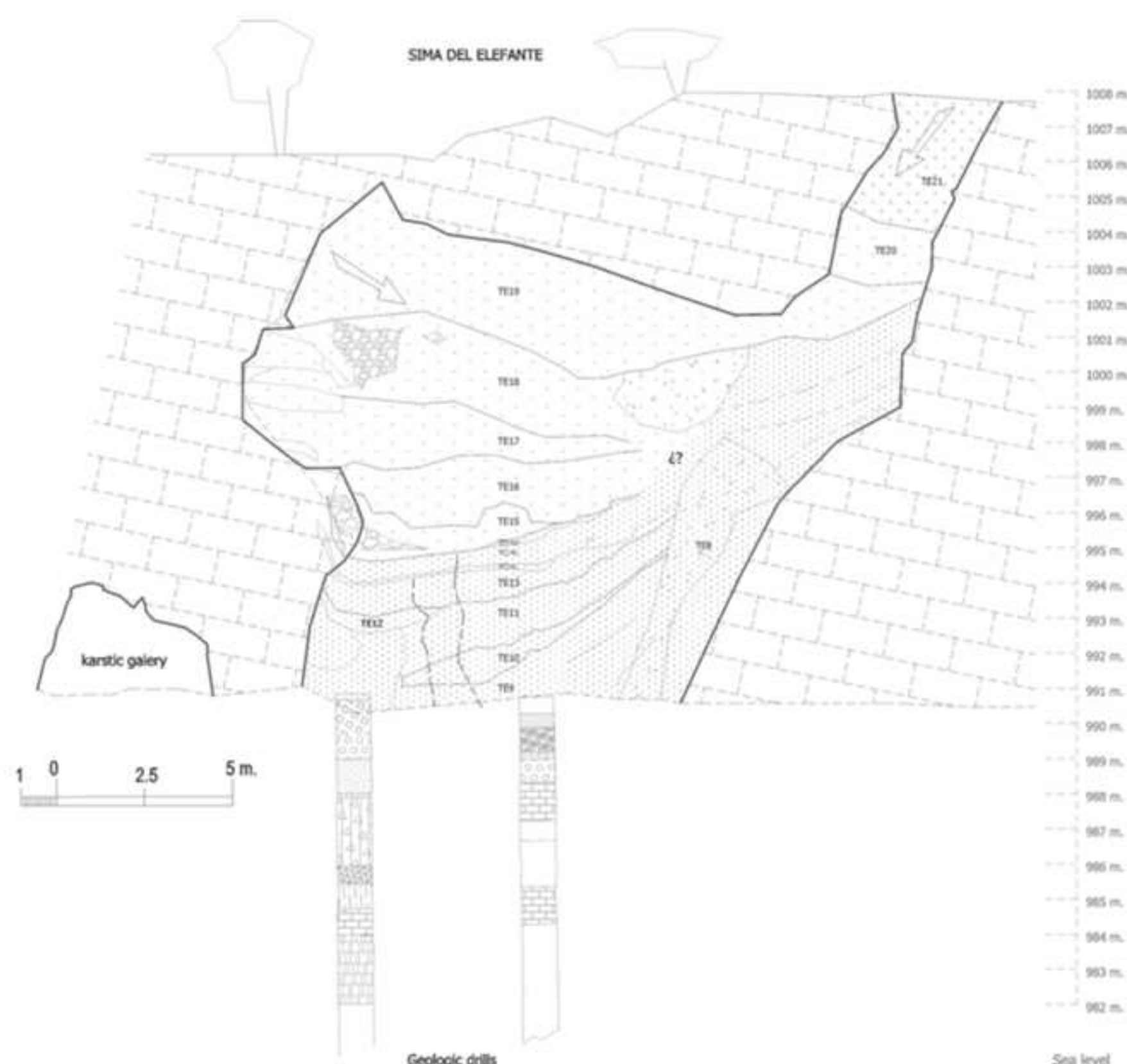


Figura 4. Secuencia estratigráfica del yacimiento de la Sima del Elefante (Rosas *et al.*, 2006)

3. 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.

4. 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

Perfil	Distancia (m)	Separación electrodos (m)	Número de iteraciones	Error Absoluto
--------	---------------	---------------------------	-----------------------	----------------

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) (Figura 5, tabla 1).

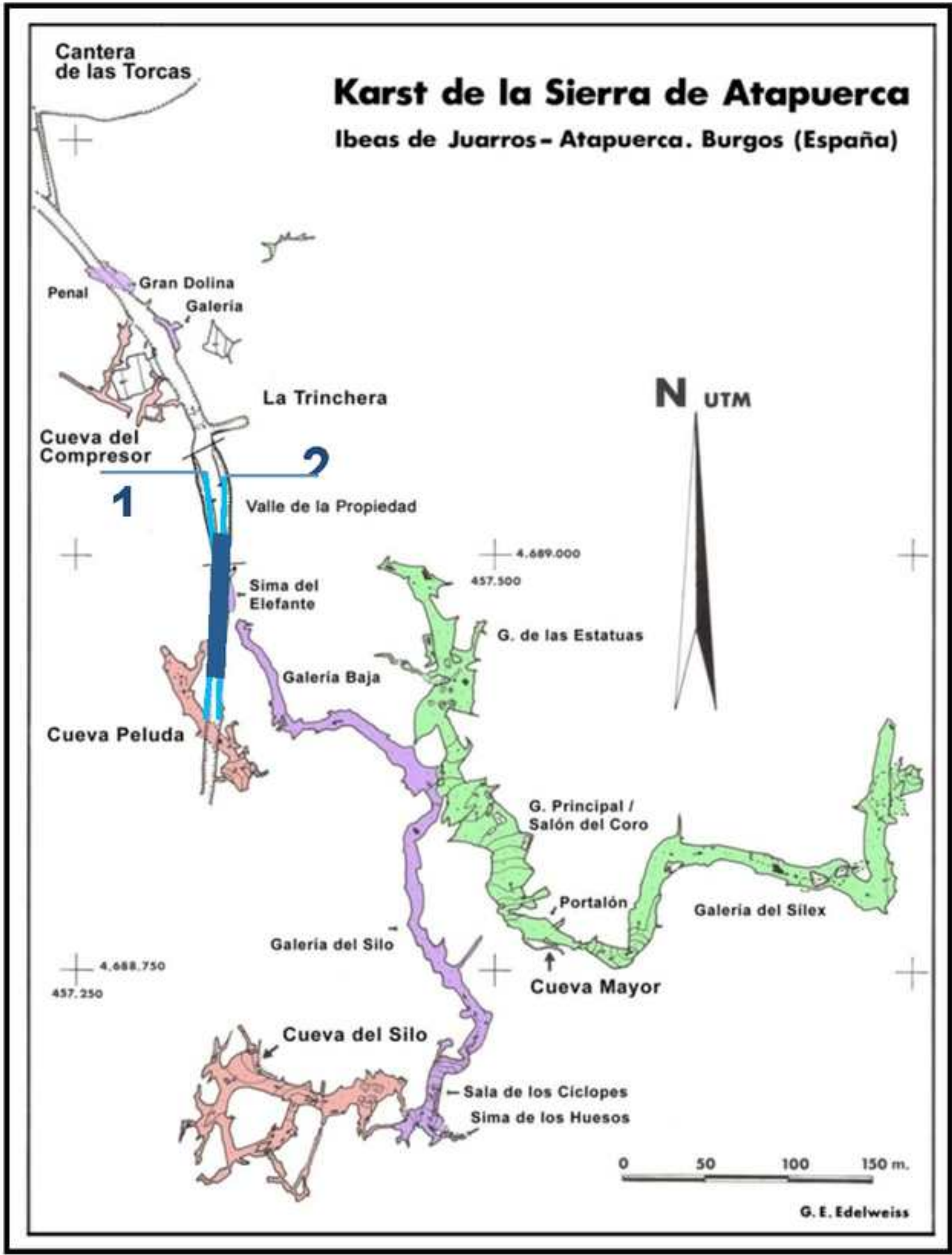


Figura 5. Situación de los perfiles geofísicos 1 y 2 sobre la planimetría del Karst de la Sierra de Atapuerca. En verde el Nivel Superior, en morado el Nivel Intermedio y en rosa el Inferior

			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) (Figura 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 (Figura 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 (Figura 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 (Figura 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, Figura 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.

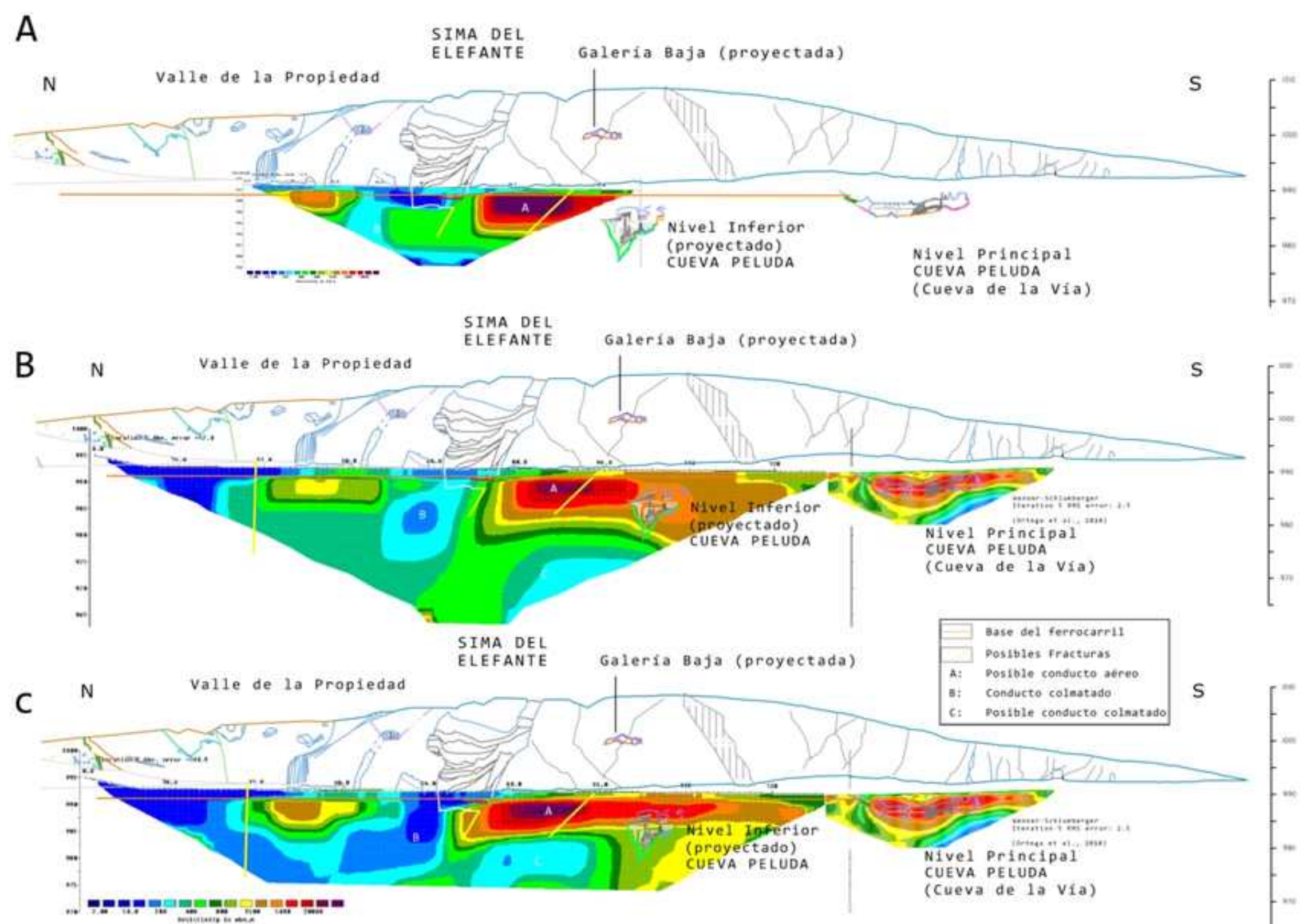


Figura 6. Perfiles Geofísicos: A) Perfil geofísico Werner-Schlumberger 2.1, B) Perfil geofísico Werner-Schlumberger 2.2; C) Perfil geofísico Dipolo-Dipolo 2.2. En rojo se representa el paquete calizo descubierto durante la excavación 2011 y retirado en 2012. En blanco los sedimentos arcillosos que marcan el límite de la excavación actual (2013)

5. 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 (Figura 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.

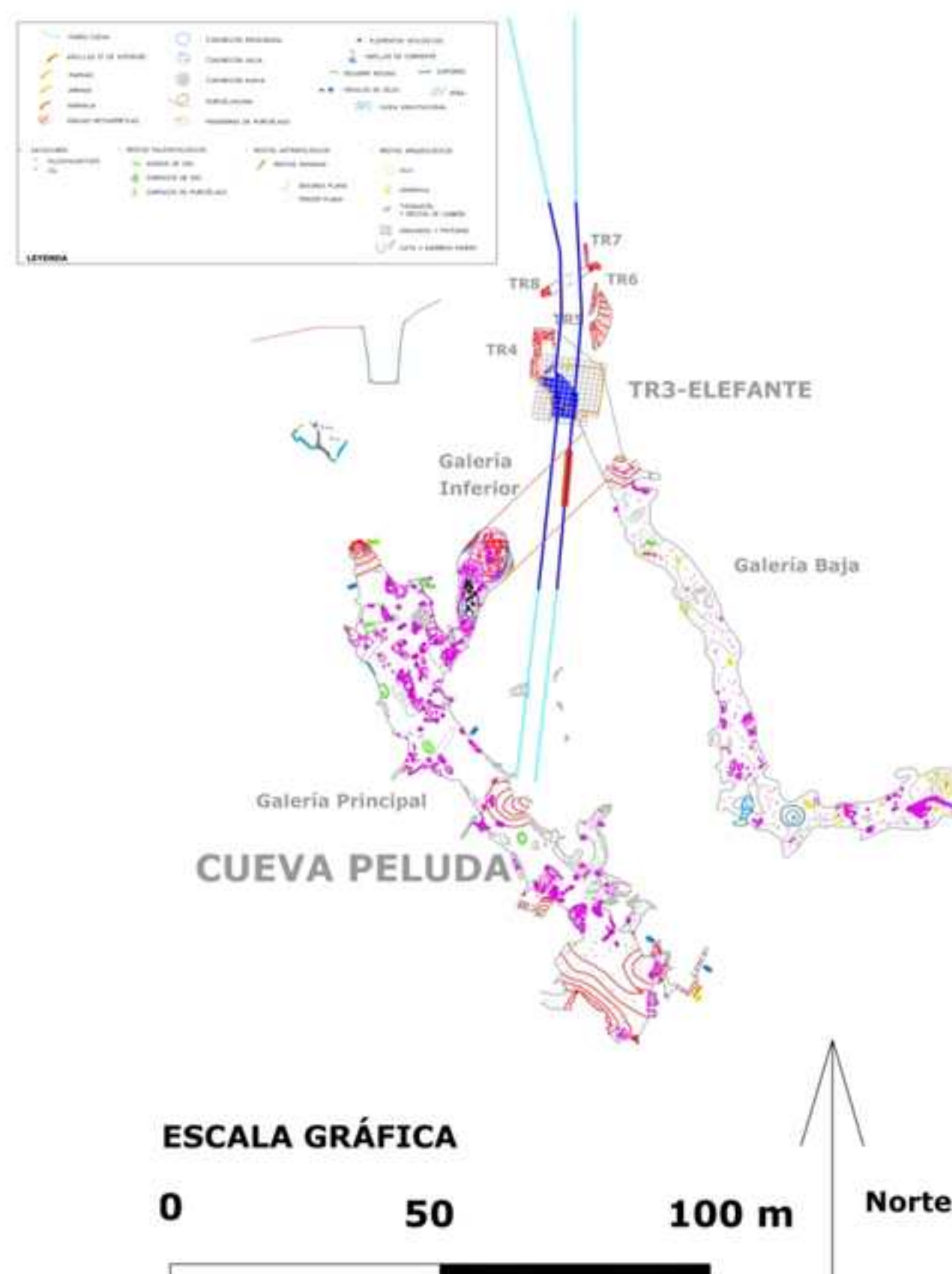


Figura 7. Situación en planta de los perfiles geofísicos y anomalías. En azul el arrasamiento de la roca caliza descubierta en 2011, sobre la que se asentaba las traviesas del antiguo ferrocarril minero. En rojo la situación de las anomalías A y C.

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 Figura 7 y en rojo en Figura 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 (Figura 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) (Figura 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 (Figura 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 (Figura 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 (Figura 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.

6. 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-Wenner 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 Máster.

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., Martínón-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., Martínón-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 Arsuaga 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 Villafría 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 (Poumeyssen, France). *Comptes Rendus Geoscience* 341: 810–817.

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). *J Hum Evol* 62: 7-58.

Ollé A., Mosquera M., Rodríguez X.P., Lombera-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). 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., Saladié 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 SL , Pigaud R, Rodet J. (2010). Karstic Morphologies identified with Geophysics around Saulges Caves (Mayenne, France). *Journal Archaeological Prospection*, 17: 151-160.