

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)

Lucía Bermejo ^{a,b}
Ana Isabel Ortega ^{a,c}
Roger Guérin ^d
Josep María Parés ^a
Alfonso Benito-Calvo ^{a,c}
Miguel Ángel Martín ^c
Enrique Aracil ^e
Unai Maruri ^e
José Ángel Porres ^f

^(a)Centro Nacional de Investigación sobre Evolución Humana (CENIEH). Burgos, España
^(b)Escuela Interuniversitaria de Posgrado en Evolución Humana. Burgos, España
^(c)Grupo Espeleológico Edelweiss. Burgos, España
^(d)Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, UMR 7619, METIS, F-75005, Paris, France
^(e)Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. Madrid, España
^(f)Área de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e I.C.T. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Burgos, España

En este trabajo se presentan los trabajos de prospección geofísica aplicados al karst de Ojo Guareña, en relación con los yacimientos de la Cueva de Kaite y el sector de entrada de Cueva Palomera. La técnica desarrollada ha sido la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT-del acrónimo inglés *Electrical Resistivity Tomography*), que proporciona perfiles 2D de las morfologías sub-superficiales del subsuelo.

Introducción

El uso de métodos de prospección geofísica, por su carácter no invasivo o destructivo, está siendo cada vez más utilizado en las investigaciones arqueológicas por la información que aporta sobre el marco de los yacimientos, ya que permite reconocer las estructuras y morfologías enterradas sin necesidad de excavación previa, lo que facilita la interpretación de los yacimientos así como la planificación de las excavaciones y la política de conservación de los mismos (Hesse, 1999; Benech & Hesse, 2007).

Recientemente las prospecciones geofísicas, y en concreto la ERT, están siendo usadas en la investigación de yacimien-

tos kársticos (Wynn, 1986; Piro *et al.*, 2000 y 2001; Papadopoulos *et al.*, 2006; Bermejo, 2009; Bermejo *et al.*, 2010, 2013a, b y c; Ortega *et al.*, 2010 y 2012; Valois *et al.*, 2010), proporcionando interesante información sobre la geometría de los yacimientos y su entorno.

El Karst de Ojo Guareña (Foto 1), con cerca de 400 cavidades topografiadas, alberga el Complejo Kárstico de Ojo Guareña, un sistema multinivel formado por una red de 110km de conductos subterráneos y catorce entradas. Las dimensiones y variedad de los 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 *et al.*, 2013). De entre ellos destacan la Cueva de Kaite y el sector de entrada de Cueva Palomera.

La importancia arqueológica de Kaite viene dada por la abundancia de registros del Neolítico y la Edad del Bronce, con zonas de hábitat en los dos sectores de entrada (Portalón y zona de colapso de la



Foto 1. Vista del Karst de Ojo Guareña desde el lapiaz del Pelada, al NO
Foto M. A. Martín

entrada actual) y zonas de uso sepulcral y simbólico en el interior (Santuario de Kaite) (Uribarri y Liz, 1973; Ortega y Martín, 1986). Además, su estratégica situación, colgada a 140 metros sobre el Valle de Sotoscueva, la ha protegido de la posterior acción erosiva del río Guareña, siendo uno de los puntos de mayor potencialidad para albergar yacimientos de ocupación pleistocena.

En Cueva Palomera, principal entrada al Complejo Kárstico, los numerosos yacimientos que se conservan en su interior hablan de una utilización de la cueva, que si bien se inicia en el Paleolítico superior, se intensifica a lo largo de la Edad del Bronce, desde momentos campaniformes hasta las etapas iniciales o plenas del mundo de Cogotas, para mantenerse de forma más esporádica en la etapa más antigua de la Edad del Hierro. Una puntual intervención realizada en el Portalón de entrada por Soledad Corchón en 1972, en busca de las secuencias del Paleolítico superior, puso al descubierto una potente estratigrafía de casi 5m de profundidad relacionada con fases de la Prehistoria reciente (Ortega y Martín, 2011). La problemática que implica una excavación en profundidad ocasionó el abandono de la misma, no detectando todo el potencial estratigráfico de este hábitat, que es uno de los objetivos de este proyecto.

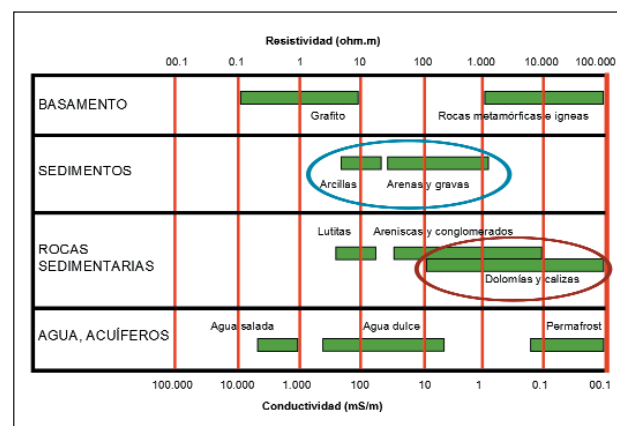
¿Qué es la ERT?

Los métodos geoelectrónicos miden la resistividad (ρ) de las rocas, que se expresa en $\Omega.m$. Sin embargo, el comportamiento

físico de las rocas depende de varios aspectos (como la porosidad, fracturación, saturación, temperatura, etc.) lo que impide atribuir un único valor de resistividad a una roca concreta. La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) es uno de los métodos geoelectrónicos más apropiados para el estudio del karst y sus yacimientos porque 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; Bermejo et al., 2013a).

En los medios calcáreos en los que se desarrolla principalmente el karst, los valores de menor resistividad se suelen atribuir a sedimentos terrígenos ($10-1000\Omega.m$) que son los que se encuentran en los fondos fluviales y en los conductos colmatados. Por el contrario, los valores más resistivos son atribuidos a las rocas calcáreas del sustrato

Fig. 1. Valores de resistividad en ohm.m de las rocas más comunes (modificada de http://www-ig.unil.ch/cours/geophys/c_ese.htm)



(1000-100.000 Ω .m) (Fig. 1). El carácter infinitamente resistivo del aire perteneciente a las cavidades que se desarrollan en este tipo de rocas, añade complejidad a la interpretación. Por ello, es necesario conocer las características geológicas del área estudiada.

El sensor del sistema ERT 2D consiste en un conjunto de electrodos colocados de manera equidistante a lo largo de un perfil rectilíneo. Una corriente es inyectada entre dos electrodos (A y B) y otros dos (M y N) miden la diferencia de potencial (Loke y Barker, 1996). Según la organización geométrica de estos cuatro electrodos se configu-

rarán distintos dispositivos, siendo los más utilizados Wenner-Schlumberger (Wn-Sch) y Dipolo-Dipolo (Dip-Dip) (Fig. 2).

El dispositivo Wenner-Schlumberger tiene una mejor resolución en profundidad y un menor ruido, pero peor resolución espacial, mientras que el Dipolo-Dipolo localiza mejor las estructuras verticalizadas, aunque su resolución en profundidad es inferior (Fig. 2 y 3). Por ello, hemos utilizado estos dos dispositivos debido al carácter impredecible del subsuelo kárstico (Ortega *et al.*, 2010; Valois *et al.*, 2010; Bermejo *et al.*, 2013a).

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 (Foto 2). Esta investigación facilita perfiles 2D del terreno en base a la diferente resistividad eléctrica que presentan los materiales (Dahlin, 2001).

Los datos se tratan a continuación con un software de inversión Res2dinv (Geotomo Software) que produce un modelo de resistividad calculando los espesores y resistividades reales de los cuerpos que se hallan en el subsuelo, siendo capaz de detectar y caracterizar discontinuidades significativas, tanto en la vertical como en la horizontal, teniendo en cuenta la orografía del terreno (Fig. 4). Finalmente, los perfiles 2D que se adquieren con esta técnica, se integran a través de programas como Autocad dentro de su situación topográfica real,



Foto 2. Syscal Pro durante la toma de datos en el Portalón de Kaite. Foto M. A. Martín

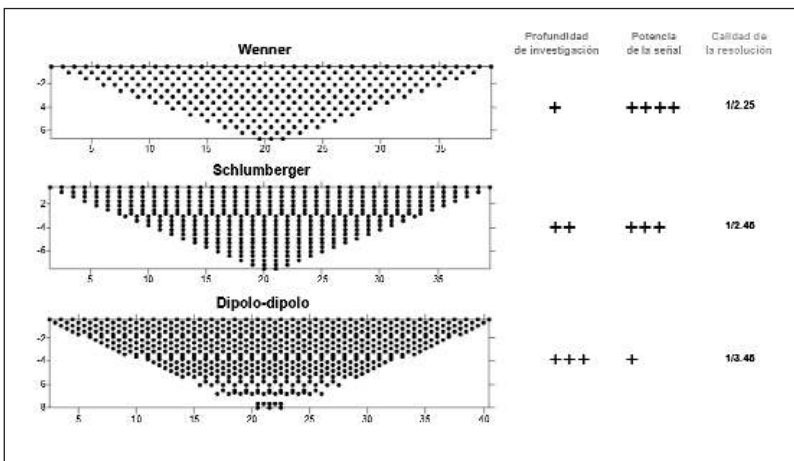


Fig. 2. Características de la configuración de los dispositivos de adquisición 2D Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo, clasificadas de (+) a (++++) (modificada de http://www-ig.unil.ch/cours/geophyse/c_proe.htm y Samouëlian *et al.*, 2005)

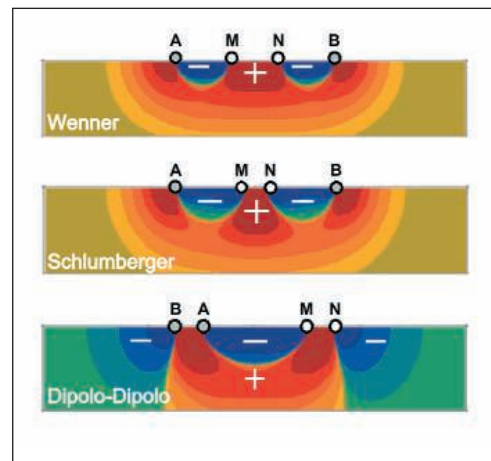


Fig. 3. Diagramas esquemáticos de los patrones de sensibilidad de los dispositivos Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo para perfiles 2D del terreno. A y B son los electrodos de inyección de corriente mientras que M y N miden la diferencia de potencial. Los patrones referenciados son sólo un ejemplo de la combinación de electrodos indicada en la figura (modificada de Dahlin y Zhou, 2004)

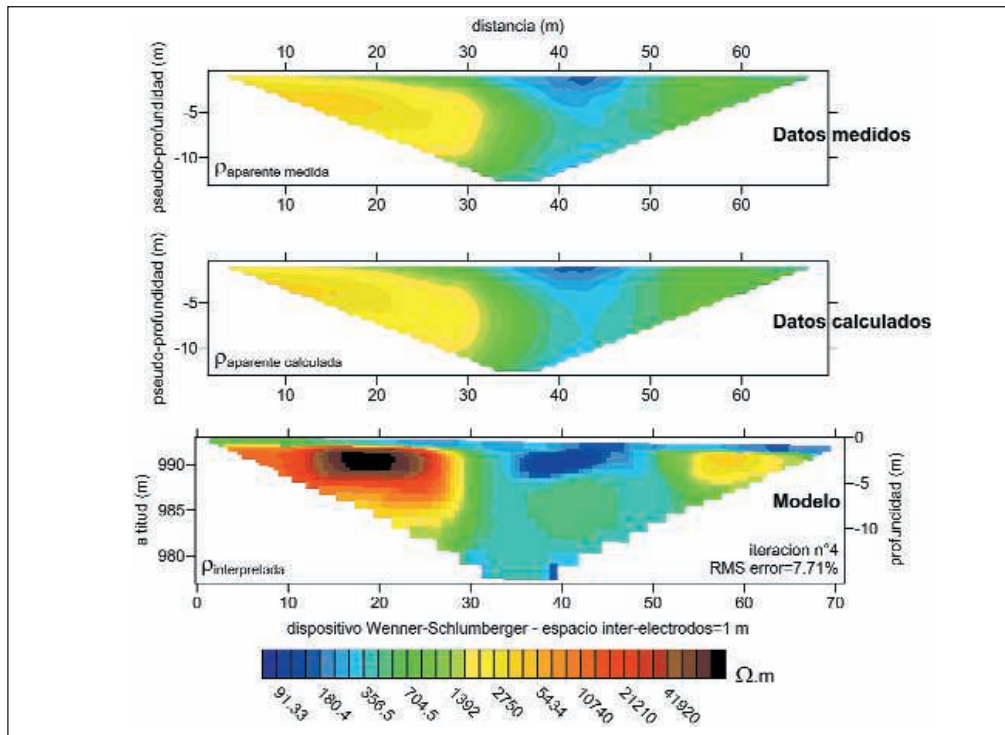


Fig. 4. Inversión por el método iterativo.

contextualizándolos con los datos arqueológicos y geológicos conocidos.

Teniendo en cuenta los objetivos propuestos y los condicionantes topográficos de ambas cavidades, se dispusieron en Kaite tres tomografías: dos en la zona del Portalón

(Fotos 3 y 4) con longitudes de 87,5 m y 66,3 m, y separación entre electrodos de 2,5 m y 1,25 m respectivamente (Fig. 5). El tercer perfil se situó en la zona de colapso de la entrada actual con una longitud de 87,5 m y una separación entre electrodos de 2,5 m.

Foto 3. Portalón de la Cueva de Kaite
Foto M. A. Martín



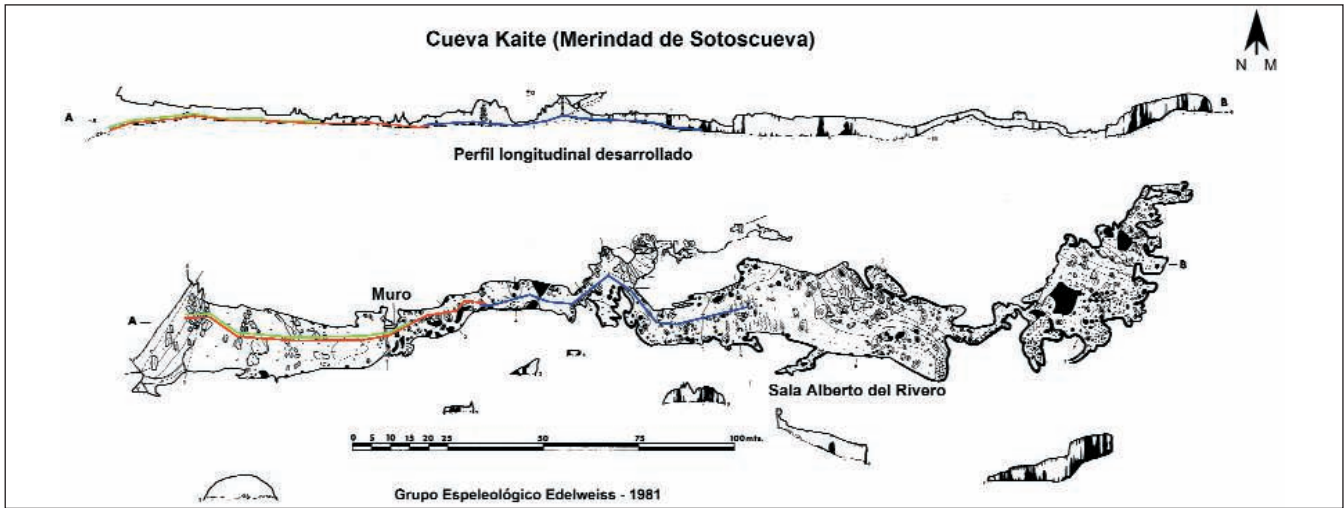


Fig. 5. Topografía de la Cueva de Kaite (G. E. Edelweiss). En la planta se ha marcado en rojo el perfil geofísico 1, en verde el 2 y en azul el 3.



Foto 4. Portalón de la Cueva de Kaite
Foto M. A. Martín



Foto 6. Rampa de Palomera
Foto M. A. Martín



Foto 5. Dolina de Cueva Palomera y Rampa de Palomera
Foto M. A. Martín

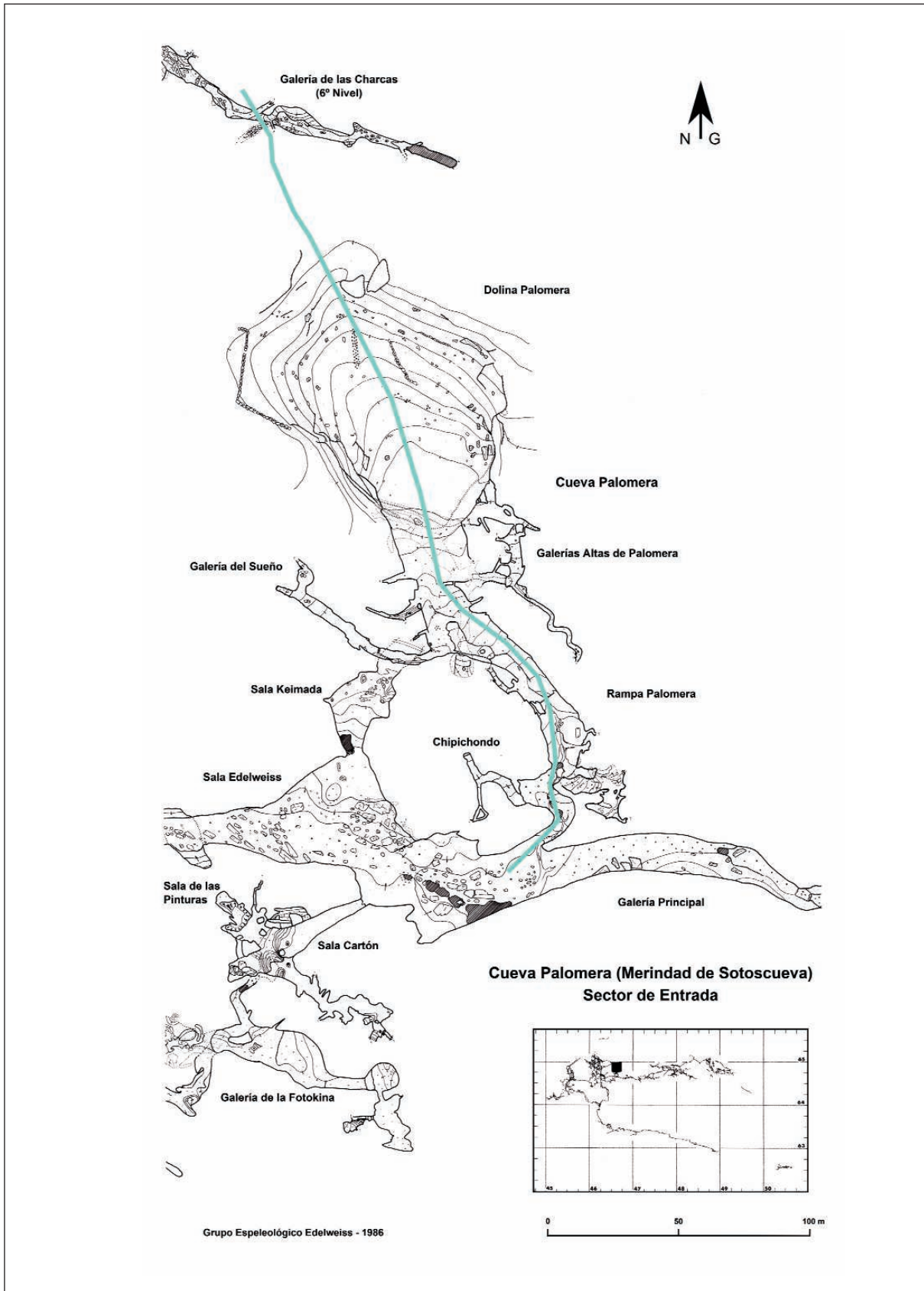


Fig. 6. Planta de la Dolina y Rampa de Cueva Palomera, junto con algunas otras galerías de la zona de entrada, hasta la unión con la Sala Edelweiss, ya en la Galería Principal (Topografía G. E. Edelweiss). En azul cian la situación del perfil geofísico.



Fotos 7. Perfil ERT en la Rampa de Palomera.
Foto L. Bermejo



Fotos 8. Perfil ERT en la dolina de entrada a Cueva Palomera.
Foto L. Bermejo

En el sector de entrada de Cueva Palomera (Fotos 5 y 6) se realizó un único perfil de 355 m de longitud y de 5 m de separación entre electrodos (Fig. 6 y fotos 7 y 8).

Actualmente se está trabajando en el post-procesado de estos datos, que nos permitirá detectar y caracterizar la potencia sedimentaria de los sectores de entrada de las Cuevas de Kaite y Palomera, así como identificar la morfología endokárstica de estos sectores. Estos trabajos van a permitir una mejor planificación de futuras excavaciones, que ayudarán a conocer más acerca de la presencia de áreas potenciales de ocupación humana en el Karst de Ojo Guareña.

Agradecimientos

La investigación que aquí presentamos fue realizada en el otoño de 2013, gracias a una ayuda para Jóvenes Excelentes de la Fundación Gutiérrez Manrique gestionada por la Fundación Caja de Burgos que obtuvo L. Bermejo. Los autores agradecen a los Servicios Territoriales de Cultura y Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León la autorización y apoyo recibido, así como la colaboración prestada por el Grupo Espeleológico Edelweiss de la Diputación Provincial de Burgos.

Bibliografía

- Benech, Ch.; Hesse, A. (2007): Some Considerations on the Integration of *Geophysical Data into Archaeological Research*, en *Geophysik aund Ausgrabung. Einsatz und Auswertung zerstörungsfreier Prospektion in der Archäologie, Internationale Archäologie Naturwissenschaft und Technologie* (Ed): 175-186.
- Bermejo, L.; Ortega, A. I.; Aracil, E.; Guérin, R.; Benito-Calvo, A.; Despriée, J.; Bermúdez de Castro J. M.; Carbonell E. (2013a): Tomografía de resistividad eléctrica (ERT) aplicada a la arqueología: el ejemplo de los yacimientos pleistocenos de la Sierra de Atapuerca (Burgos, España) y de Rosières-la-Terre-des-Sablons (Lunery, Francia), *Actas de III Jornadas de Jóvenes Investigadores en el Valle del Duero, 20-22 noviembre de 2013, Salamanca*.
- 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. (2013b): Aplicación de ERT (Electrical Resistivity Tomo-

- graphy) para la identificación de la morfología sub-superficial del yacimiento de Elefante - Sierra de Atapuerca (Burgos, España), *X Congreso Ibérico de Arqueometría, 16-18 octubre de 2013, Castellón*.
- Bermejo, L.; Canals, A.; González, J. M.; Fernández, F.; Campaña, I.; Carbonell, E. (2013c): Aplicación de técnicas de prospección geofísica al estudio de la Cueva de Santa Ana (Cáceres, España), *X Congreso Ibérico de Arqueometría, 16-18 octubre de 2013, Castellón*, pp. 69-70.
- 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.. (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)*. Tesis de Máster. Departament d'Història i Història de l'Art, Àrea de Prehistoria, Universitat Rovira i Virgili. Tarragona.
- 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.
- 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: 810-817.
- Hesse, A. (1999): Multi-parametric survey for archaeology: how and why, or how and why not? *Journal of Applied Geophysics*, 41: 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: 131-152.
- Ortega, A. I.; Martín, M. A.; G. E. Edelweiss (2013): *Cuevas de Ojo Guareña. Una visión de la mano del Grupo Espeleológico Edelweiss*. Diputación Provincial de Burgos, 311 pp.
- Ortega, A. I., Benito, A., Porres, J. A., Pérez-González, A., Martín, M. A. (2012). Prospección Geofísica por Tomografía Eléctrica en el karst de la Sierra de Atapuerca. *Cubía*, 16: 34-48.
- Ortega, A. I. y Martín, M. A. (2011): El Karst de Ojo Guareña. Merindad de Sotoscueva, Burgos, *Cubía*, 15: 20-39.
- Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Porres, J. 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. y Martín, M. A. 1986. La Arqueología del Karst de Ojo Guareña, en Grupo Espeleológico Edelweiss (Ed.): Monografía sobre Ojo Guareña. *Kaite*, 4-5: 331-389.
- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N., Sarris, A., (2006). Two-dimensional and three-dimensional electrical imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13: 163-181.
- Piro, S., Mauriello, P., Cammarano, F., (2000). Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 7: 203-213.
- 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.
- Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Bruand, A.; Richard, G. (2005): Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil & Tillage Research*, 83: 173-193.
- Uribarri, J. L., Liz, C. 1973. El arte rupestre en Ojo Guareña. La Cueva de Kaite. *Trabajos de Prehistoria*, 30: 69-108.
- Valois, R., Bermejo, L., Guérin, R., Hinguant, St., Pigaud, R, Rodet, J., (2010). Karstic Morphologies identified with Geophysics around Saulges Caves (Mayenne, France). *Journal Archaeological Prospection*, 17: 151-160.
- Wynn J. C., (1986). A Review of Geophysical Methods Used in Archaeology. *Geoarchaeology: An International Journal*, 1(3): 245-257. En: Selected Papers on the Application Of Geophysical Instruments for Archaeology (1986), Geonics limited, Ontario.