

La tomografía eléctrica aplicada a la investigación del yacimiento arqueológico de Cástulo (Linares, Jaén). Resultados preliminares.

Electrical tomography applied to the survey of the archaeological site of Cástulo (Linares, Jaén). Preliminary results.

Javier Rey ⁽¹⁾, Julián Martínez-López ⁽²⁾, José Dueñas ⁽³⁾, Daniel Campos ⁽⁴⁾, Francisco Arias ⁽⁵⁾ y José Benavente ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares, Jaén. jrey@ujaen.es

⁽²⁾ Departamento Ingeniería Mecánica y Minera. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares, Jaén. jmartine@ujaen.es

⁽³⁾ Departamento Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares, Jaén. jduenas@ujaen.es

⁽⁴⁾ Concejalía de Juventud del Ayuntamiento de Linares. danicampos1979@gmail.com

⁽⁵⁾ Enclave Arqueológico de Cástulo. Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. franciscoariasdeharo@gmail.com

⁽⁶⁾ Instituto del Agua, Universidad de Granada. C/Ramón y Cajal, 4. 18071, Granada. jbenaven@ugr.es

ABSTRACT

The Castulo archaeological site is one of the most important of the Jaen province. Despite its significance, the excavation work has been scarce. Site development for cultural purposes requires, firstly, a detailed, non-destructive analysis, where the most interesting zones are identified. We have used geophysical techniques to attempt this. In a preliminary campaign, 5 electrical tomography profiles –each one with a length of 32 m- have been carried out. In every profiles we have used different electrode configurations (Dipole-Dipole, Wenner-Schlumberger and Wenner), as well as two inter-electrode spacing: 0.5 and 1 m. The aim was to test the geo-electrical response of the possible buried structures, and the best shallow results have been obtained with the Dipole-Dipole.

This study has allowed us to identify what it was supposed to be the rests of a wall of an probably ancient church of this Iberian-roman town, which finally has been confirmed by way of an archaeological excavation campaign carried out in the summer of 2009.

Key words: *Electrical resistivity tomography, conductive-resistive anomalies, archaeological site, Cástulo, Linares.*

*Geogaceta, 48 (2010), 219-222
ISSN: 0213-683X*

*Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010*

Introducción y objetivos

En los últimos años, la exploración arqueológica se apoya cada vez más en los métodos de prospección geofísica (Gaffney *et al.*, 2000; Drahor, 2006; Leucci *et al.*, 2007). Se utilizan diferentes técnicas que determinan variaciones en el subsuelo de propiedades físico-químicas, entre las que cabe destacar la propagación de ondas electromagnéticas, ondas acústicas, eléctricas y magnéticas. Entre estas técnicas, una de las más utilizadas es la tomografía eléctrica, en la que se determina la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, a partir de un número muy elevado de medidas.

Mediante el ejemplo que se presenta en este trabajo, se pretende ofrecer una visión de la capacidad resolutoria de esta técnica en arqueología. El estudio se ha realizado en el yacimiento arqueológico de Cástulo, situado en las proximidades del río Guadalimar, a

unos 7 km al sur de Linares (provincia de Jaén, Fig. 1).

La antigua ciudad iberorromana de Cástulo, es uno de los yacimientos arqueológicos más importantes de la provincia de Jaén. De esta importancia hablan las numerosas referencias encontradas en las fuentes clásicas. Sin embargo, el auge de Baeza y Linares supuso el desmantelamiento de Cástulo, sirviendo sus ruinas de cantera para el crecimiento de estas dos ciudades (Blázquez, 1975; Blázquez *et al.*, 1984), sufriendo en el siglo XV una demolición total de sus murallas y de los edificios que aún quedaban. Con esa destrucción desaparecieron los restos de una de las ciudades romanas más importantes de la Bética.

Hasta la fecha, las excavaciones en el yacimiento arqueológico han sido mínimas. Recientemente se han realizado estudios geofísicos generales (Buess, 2008) de los que parece deducirse que pueden existir restos de estructuras de enorme

importancia en el subsuelo. Por ello, antes de iniciar posibles excavaciones, se quieren realizar campañas de prospección geofísica de detalle.

Con este trabajo se pretende ver la eficacia de la tomografía eléctrica como base de la prospección de este yacimiento arqueológico, y por tanto, su utilidad en futuras campañas de investigación.

Metodología empleada y trabajo realizado

Para la realización del trabajo se ha empleado el método eléctrico de resistividades en su modalidad de tomografía eléctrica. Es un método geoelectrico no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, diferenciándolos en función de su resistividad eléctrica (Storz *et al.*, 2000).

El método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de per-

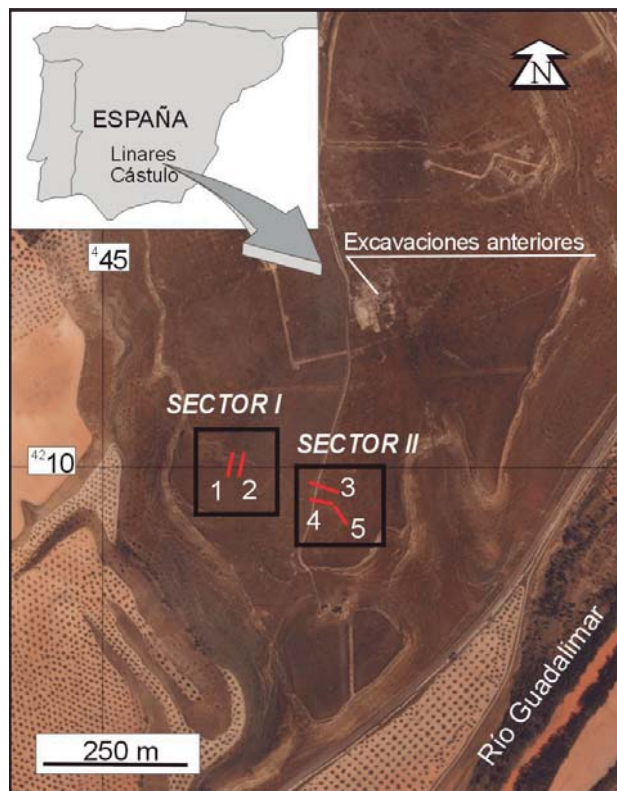


Fig. 1.- Situación del yacimiento arqueológico de Cástulo y localización de los dos sectores analizados. Se señala la posición de los cinco perfiles de tomografía eléctrica (1, 2, 3, 4 y 5).

Fig.1.- Location of the Castulo Archaeological site, and situation of the two studied sectors. The position of the five electrical tomography profiles is shown.

Discusión y resultados

Las interpretaciones de los perfiles de tomografía eléctrica se han realizado a partir de las resistividades aparentes obtenidas en el trabajo de campo, tratadas por medio del programa RES2DINV de resistividad y polarización inducida. Este programa de cálculo se basa en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado, modificado con la técnica de optimización Cuasi-Newton. El método de inversión construye un modelo del subsuelo mediante prismas rectangulares y determina los valores de resistividad para cada uno de ellos, minimizando la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados (Loke y Barker, 1996, Loke y Dahlin, 2002).

En general, hay que señalar que pese a que con el dispositivo Dipolo-Dipolo se alcanzan menores profundidades que con Wenner-Schlumberger y Wenner, se destacan mejor las anomalías verticales superficiales, lo que lo hace más apropiado para la detección de muros perimetrales. A mayor profundidad (> 2 m), los errores detectados en el modelo (22,7% en la Fig. 2), haría poco fiables los resultados. Así, y a modo de ejemplo, en la figura 2 se representan los resultados obtenidos en el perfil 2 con los tres dispositivos. En relación al espaciado interelectrónico, la calidad de detección parece ser óptima cuando la distancia de separación de electrodos es menor o igual al diámetro del elemento investigado.

En el Sector I, los dos perfiles realizados detectan, en los primeros 1,5 m, resistividades entre 80 y 140 $\Omega \cdot m$, que interpretamos como facies constituidas por materiales finos (lutitas o arenas finas). A partir de los 1,5 m, las resistividades aumentan, superando los 200-300 $\Omega \cdot m$ (Fig. 2), lo que interpretamos como el nivel basal de conglomerados que aflora en zonas próximas. En el primer metro de profundidad, en los tres métodos empleados, se detectan 2 estructuras verticales. En todos los casos, estas estructuras tienen distinta respuesta: con Dipolo-Dipolo, una de ellas llega a ofrecer valores de resistividad mayores de 300 $\Omega \cdot m$. Estos valores podrían corresponder a un muro constituido por grandes bloques de areniscas (a modo de «muro de sillería»), al que hemos denominado principal. Por otro lado, en los tres métodos también se detecta otra estructura vertical, aunque en este caso con valores de resistividades menos elevados (con Dipolo-Dipolo, 200-250

files, con una separación determinada que viene condicionada por el grado de resolución, profundidad y los objetivos que se pretendan cubrir, de tal modo que, a menor separación mayor resolución y a mayor separación mayor profundidad. Para el caso concreto que nos ocupa, en esta campaña piloto, se realizaron distintos ensayos, con espaciado entre electrodos de 1 y 0,5 m, para conseguir que, con suficiente resolución, se pudiesen prospectar los antiguos restos arqueológicos que alcanzaron entre 1 y 4 m de profundidad.

Los electrodos son conectados a un equipo de medida y mediante un programa secuencial específico, para cada objetivo, se seleccionan cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición. Para cada disposición electródica se hace una medida de resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico de subsuelo. El equipo de tomografía eléctrica utilizado en este estudio es el modelo RESECS de la marca Deutsche Montan Technologie (DMT). Es un equipo multielectrodo con ordenador integrado capaz de gestionar hasta 960 electrodos. La fuente de energía es de 250 W y 2,5 A, lo que genera impulsos de 880Vp-p. Ofrece transmisor, receptor y emisor de energía incorporados en el equipo. Entre el resto de características, cabe destacar la presencia de un procesador automático de

resistividad aparente y cargabilidad, control de resistividad en tiempo real en 2D y 3D, control de curva de inyección de corriente y voltaje, ajuste de tiempo de inyección, PC integrado y procesador de conmutación integrado.

A partir de los estudios preliminares (Buess, 2008), se han seleccionado dos sectores en el yacimiento (I y II en la Fig. 1). En total se han realizado cinco perfiles que han sido previamente posicionados con un levantamiento topográfico de detalle. Todos ellos con 64 electrodos y una extensión de 31,5 m. Para cada perfil se han utilizado configuraciones Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Wenner, con la intención de buscar la mejor resolución al problema planteado. En este sentido, hay que señalar que no existe unanimidad en la bibliografía sobre cuál es la configuración más adecuada en arqueología (véase, por ejemplo, las discusiones en los trabajos de Dahlin y Zhou, 2004, Drahor *et al.*, 2008). En cualquier caso, la relación señal/ruido, definida por la constante de configuración geométrica k , es mucho más alta con el dispositivo Wenner que con Schlumberger, siendo la más baja para el Dipolo-Dipolo (Reynolds, 1997).

En el sector I se ejecutaron dos perfiles, paralelos entre ellos y perpendiculares a los muros de una posible estructura. El resto de perfiles se realizaron en el sector II, también perpendiculares al elemento investigado.

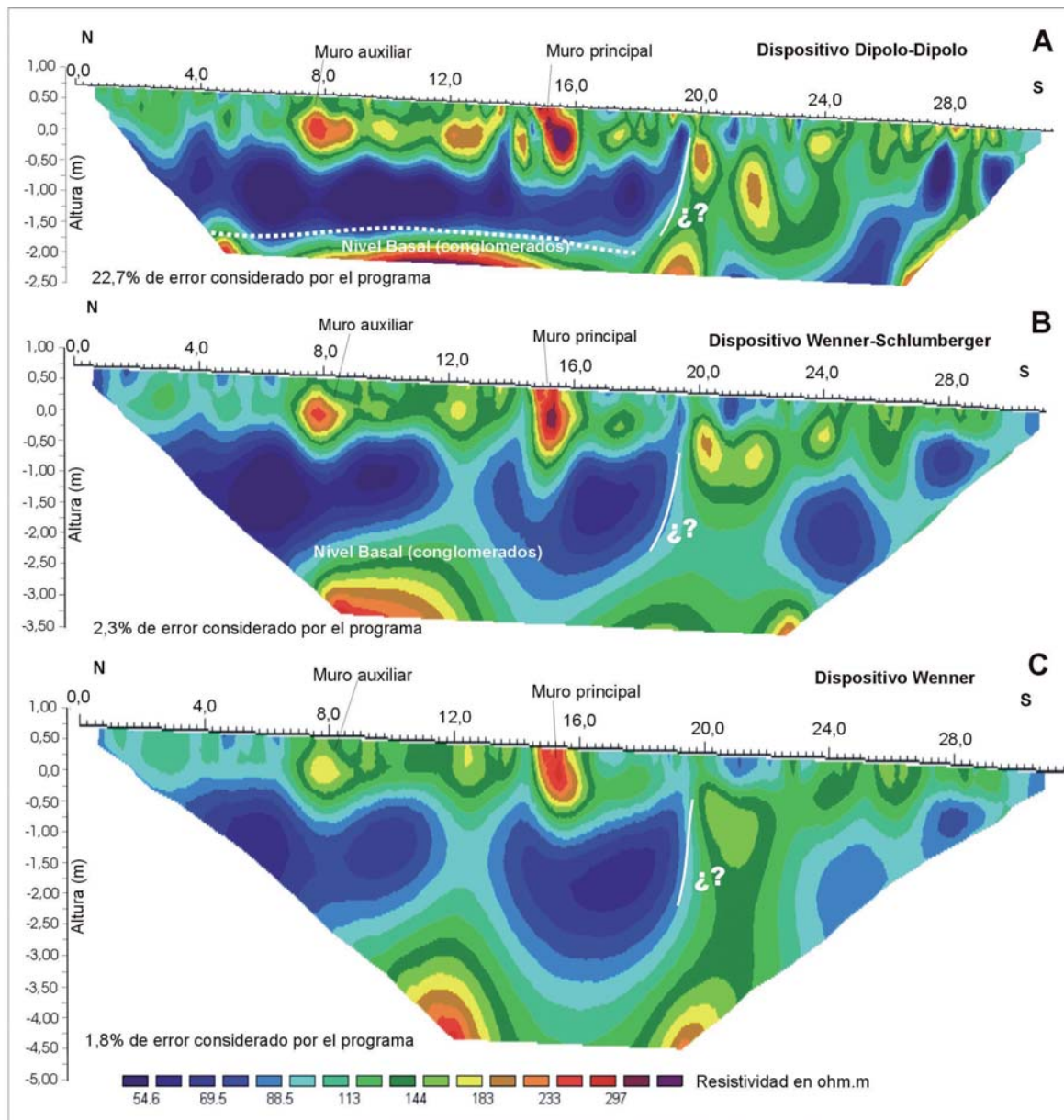


Fig. 2.- A, B, C: Modelos de resistividad eléctrica del terreno obtenidos a partir de la inversión de los datos de campo en el perfil 2: Dipolo-Dipolo (A), Wenner-Schlumberger (B), Wenner (C). D, E y F: fotografías de las campañas de campo: realización del perfil de tomografía eléctrica (D), limpieza y documentación arqueológica (E), detalle del muro detectado en el perfil anterior de tomografía eléctrica (F).

Fig. 2.- Sub-surface electrical resistivity models obtained from the inversion procedure of the field measurements along the profile 2: Dipole-Dipole (A), Wenner-Schlumberger (B), Wenner (C). D, E and F: photographs taken during the field campaigns: carrying out the electrical tomography profile (D), archaeological excavation (E), detail of the wall detected in the above-mentioned electrical tomography profile (F).

$\Omega \cdot m$). Esta última estructura podría corresponder a los restos de un muro construido por bloques pequeños cementados con materiales aglomerantes (argamasa de cal y arena), y que se correlacionaría con un muro interior.

Estas interpretaciones han sido confirmadas en una posterior campaña de limpieza y documentación arqueológica realizada por la Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Linares en el verano de 2009. En ella han salido a la luz los restos de los muros detectados con anterioridad y que podrían corresponder a una antigua basílica (ver Fig.2E y Fig. 2F).

Por otro lado, en dos de los tres perfiles realizados en el Sector II se detectan estructuras que podrían corresponder a restos de edificaciones, que llegan a profundidades de unos 2 m, lo que todavía no ha sido confirmado en una posterior campaña arqueológica. En este caso, la señal parece también más clara con el método Dipolo-Dipolo que con el dispositivo Wenner-Schlumberger. El dispositivo Wenner, aunque detecta las estructuras, aporta menor resolución.

Conclusiones

En el yacimiento arqueológico de Cástulo se ha realizado una campaña preliminar de prospección geofísica, en su modalidad de tomografía eléctrica. Como campaña piloto, se han seleccionado dos sectores de trabajo (I y II). En total se han realizado cinco perfiles de tomografía eléctrica. En cada uno de estos perfiles se han utilizado distintas configuraciones

(Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Wenner) y distinto espaciamiento de electrodos (0,5 y 1 m), con la intención de buscar la mejor resolución. En los primeros niveles de investigación, el dispositivo Dipolo-Dipolo permite definir bien los cambios de resistividad verticales, pese al mayor error general del modelo. Por otro lado, el espaciamiento de electrodos más adecuado debe ser menor o igual al diámetro del elemento investigado (en este caso 0,5m).

En el Sector I, en los primeros 1,5 m se detectan resistividades bajas, que se interpretan como facies constituidas por materiales finos (lutitas o arenas finas). A partir de los 1,5 metros, las resistividades aumentan, lo que se asocia a un nivel basal de conglomerados. En ambos perfiles, en el primer metro de profundidad, aparecen dos estructuras verticales. Estas estructuras tienen distinta respuesta eléctrica, lo que permite hablar de estructura principal (muro constituido por bloques de areniscas), y muro auxiliar, construido de bloques pequeños de areniscas con materiales aglomerantes. Estas estructuras se han puesto de manifiesto en una posterior campaña de limpieza y documentación arqueológica.

En el Sector II se han realizado tres perfiles. En dos de ellos se han detectado restos de estructuras antrópicas. Sin embargo, en este caso, no se han realizado campañas de excavación posterior.

Agradecimientos

Los autores agradecen a O. Pueyo y A. Muñoz la revisión del manuscrito.

Referencias

- Blázquez Martínez, J. M. (1975). *Acta Arqueológica*, 8, Madrid, Ministerio Educación y Ciencia.
- Blázquez Martínez, J. M., Contreras, R. y Urruela, J. J. (1984). *Excavaciones Arqueológicas en España*, 131, Madrid, Ministerio de Cultura.
- Buess, M. (2008). *Urbanistische Untersuchungen mittels geophysikalischen Prospektionen in der iberisch-römischen Stadtanlage von Cástulo*. Ph. D. thesis, Universität Bern, 129 p.
- Dahlin, T. y Zhou, B. (2004). *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.
- Drahor, M.G. (2006). *Journal of Applied Geophysics*, 59, 205-223.
- Drahor, M. G., Kurtulmus, T.O., Berge, M.A., Hartmann, M. y Speidel, M.A. (2008). *Journal of Archaeological Science*, 35, 259-271.
- Gaffney, C.F., Gater, J.A., Linford, P., Gaffney, V.L. y White, R. (2000). *Archaeological Prospection*, 7, 81-99.
- Leucci, G., Greco, F., De Giorgi, L. y Mauceri, R. (2007). *Journal of Archaeological Science*, 34, 233-247.
- Loke, M. H. y Baker, R.D. (1996). *Geophysical Prospecting*, 44, 131,152.
- Loke, M. H. y Dahlin, T. (2002). *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149-162.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, 796 p.
- Storz, H., Storz, W. y Jacobs, F. (2000). *Geophysical Prospecting*, 48, 455-471.