

METODOLOGÍA PARA LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN ARQUEOLOGÍA: APUNTES A PARTIR DE LOS TRABAJOS DE IESSO, CAN TACÓ, MOLINS NOUS Y EL GOLERÓ

METHODOLOGY FOR GEOPHYSICAL SURVEYING IN ARCHAEOLOGY: NOTES ON FIELDWORK AT
IESSO, CAN TACÓ, MOLINS NOUS AND EL GOLERÓ

PAULA BRITO-SCHIMMEL
CÈSAR CARRERAS
Universitat Autònoma de Barcelona

INTRODUCCIÓN

Las prospecciones geofísicas aplicadas a la arqueología han tenido un importante desarrollo desde la década de los 80, y actualmente es cada vez más común su aplicación en yacimientos arqueológicos. La razón es bien simple, se trata de técnicas no destructivas que pueden proporcionar información pertinente sin que los registros sean perturbados, permitiendo nuevos análisis y lecturas, y por lo tanto constituyen una herramienta eficaz para la investigación arqueológica (Brito-Schimmel y Carreras, 2005).

También las prospecciones geofísicas, cuando se aplican a la arqueología, permiten evaluar el potencial de un yacimiento antes de iniciar una excavación, con el consecuente ahorro de tiempo y dinero, además de ayudar a planificar la posterior intervención, ya que, antes de iniciar la excavación, se dispone de un mapa bien detallado de las posibles estructuras conservadas del asentamiento (Carreras, 2000; Keay *et alii*, 2005; 2010).

A lo largo de la primera mitad del año 2006 se realizaron una serie de prospecciones geofísicas en los yacimientos arqueológicos de Iesso (Guissona – Lleida), Can Tacó (Montmeló – Barcelona), El Goleró (Alt Urgell – Lleida) y Molins Nous (Riudoms – Tarragona). Dichas prospecciones tenían como objetivo delimitar el yacimiento, confirmar la continuidad o no de las estructuras, en algunos casos ya conocidas de otras campañas de excavaciones, e identificar posibles nuevas estructuras a fin de aportar elementos suficientes para un mejor planeamiento de las futuras excavaciones o gestión de este patrimonio.

En estas prospecciones se utilizaron el método magnético, el método de electroresistividad y el georadar. Se combinaron dos o tres métodos geofísicos en cada yacimiento, para poder de ese modo disminuir ciertas ambigüedades en los resultados y facilitar la interpretación de los mismos. La elección del método más adecuado para ser empleado estuvo directamente relacionada con las características de las estructuras

arqueológicas detectadas y las condiciones geológicas de cada yacimiento, además de las condiciones topográficas y del tipo de vegetación presentes en estas áreas. El método magnético, en general, fue utilizado para cubrir toda la extensión de los yacimientos y los métodos de electroresistividad y/o georadar fueron utilizados para complementar la información en puntos concretos complicados o donde se requería una visión más detallada, para facilitar la interpretación de los resultados. Además, en el caso específico de *Iesso*, el georadar fue utilizado de forma puntual en una zona pavimentada donde no era posible la utilización de otros métodos.

Estas intervenciones fueron posibles a través de una colaboración entre el Institut Català d'Arqueologia Clàssica – ICAC y la empresa SOT.

HISTÓRICO DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

Históricamente, se considera que la primera aplicación de métodos geofísicos en arqueología ocurrió casi simultáneamente en Inglaterra, realizada por J. Atkinson, y en México, por Terra (García *et alii*, 1984), en el periodo de 1946-47; con la utilización de métodos eléctricos (Hesse, 2000).

No obstante, J. Atkinson es reconocido como el primero en proponer el uso de este método en nuestra especialidad y mostrar imágenes legibles y fiables de estructuras arqueológicas enterradas (Atkinson, 1963; Hesse, 2000).

Poco más de una década después, debido al trabajo pionero de la prospección magnética realizada por M. Aitken (Aitken, 1958; Gaffney y Gater, 2003), los levantamientos magnéticos pasaron entonces a ser utilizados en yacimientos arqueológicos de la Edad del Hierro de Europa y Oriente Medio, los cuales, por contener objetos de hierro, restos de forja, producían anomalías fácilmente detectables (con respecto a la magnitud de orden del campo geomagnético).

A partir de la década de 80, debido a la evolución de los aparatos geofísicos, y consecuentemente debido a la mejoría de su capacidad en realizar mediciones más sutiles de las propiedades físicas, los métodos que anteriormente no eran aplicados a la arqueología, como por ejemplo los métodos sísmicos de refracción y reflexión, los métodos radiométricos, entre otros, pasaron a ser empleados con éxito. También, apenas en la década de 80 fue posible aplicar la magnetometría en yacimientos prehistóricos e históricos de América del Norte (Gibson, 1986; Weymouth, 1986) y de la Edad del Bronce de Europa (Clark, 1986), pues en estos sitios los vestigios arqueológicos estaban asociados a alteraciones muy sutiles de la magnetización del suelo que solo pudieron ser detectadas por levantamientos más precisos y de alta resolución.

Una importante innovación técnica en arqueología ha sido la introducción del georradar o radar de penetración en el suelo (Ground-Penetrating Radar – GPR). Inicialmente empleado como herramienta en los estudios de geología en ingeniería, rápidamente se utilizó para la confección de mapas internos del yacimiento (por ej. Wroxeter) (Vaughan, 1986; Imai *et alii*, 1987; Sambuelli *et alii*, 1999). De esta manera, yacimientos arqueológicos situados dentro de contextos urbanos pudieron ser prospectados, como por ejemplo la investigación realizada en la Catedral de Girona (Dabas *et alii*, 2000), que posibilitó la identificación de los restos de la basílica románica que estaba debajo de la catedral, o las prospecciones llevadas a cabo en la Catedral de Valencia (Pérez Gracia *et alii*, 2000), que posibilitaron la confirmación de la localización de varios enterramientos, criptas y osarios descritos en un antiguo manuscrito, además de identificar las zonas con problemas de humedad que afectaban a la catedral. O más recientemente, las prospecciones llevadas a cabo en septiembre de 2007 en la Catedral de Tarragona, y cuyos resultados están pendientes de publicación.

Tradicionalmente, los métodos geofísicos más aplicados a la arqueología son la resistividad eléctrica, la magnetometría y los métodos electromagnéticos muy posiblemente por su sencillez en la utilización en campo y en la interpretación de los datos, cuando se comparan con los otros métodos geofísicos.

En España, una de las primeras aplicaciones de los métodos geofísicos en arqueología de las que se tiene constancia hasta el momento, se realizó en 1969, con la aplicación de métodos eléctricos en la necrópolis fenicia de Trayamar (Málaga), llevada a cabo por I. Scollar (Almagro-Gorbea, 1992). Pero fue solo a partir de la década de los 80 cuando la prospección geofísica pasa a tener impacto en la arqueología española y sufre un sustancial incremento en la década de los 90, cuando pasa a ser aplicada con más frecuencia (Brito-Schimmel y Carreras, 2005).

La escasa cantidad de publicaciones referentes a las prospecciones geofísicas realizadas en yacimientos arqueológicos españoles dificulta un seguimiento de la

evolución de la aplicación de estos métodos en España, y no es el objetivo de este artículo entrar en detalles. Sin embargo, P. Brito-Schimmel y C. Carreras (2005) hacen una amplia discusión sobre este tema y además proporcionan un listado bastante completo que consta de 116 yacimientos españoles prospectados con métodos geofísicos desde el año 1980 hasta el año 2003, y también incluyen un listado de 109 publicaciones que hacen referencia a los yacimientos prospectados.

De carácter más regional, J.A. Peña (2010) nos brinda una discusión sobre la evolución en el tiempo desde 1985 hasta 2010 y el actual estado de la cuestión en Andalucía, además de hacer una revisión de los diferentes métodos y sus fundamentos, y cómo deben ser aplicados en la arqueología.

Pero, ¿cuáles son los pasos que se deben seguir para realizar una prospección geofísica con éxito? Para llevar a cabo correctamente una prospección geofísica en arqueología se deben seguir una serie de pasos:

1. Estudio previo del yacimiento arqueológico.
2. Trabajo de campo:
 - a. Microtopografía del yacimiento y registro de estructuras arqueológicas visibles
 - b. Creación de una cuadrícula de prospección
 - c. Obtención de los datos
 - d. Elección del método de prospección más adecuado
3. Análisis e interpretación de resultados:
 - a. Filtros
 - b. Interpretación
4. Presentación y difusión de resultados.

ESTUDIO PREVIO DEL YACIMIENTO

Antes de iniciar una prospección geofísica en un yacimiento arqueológico es fundamental que se haga un reconocimiento de campo. Este reconocimiento es un primer contacto con el área de estudio, y de ello dependerán el éxito de las etapas siguientes, como, por ejemplo, la elección del método más adecuado para cada yacimiento, o incluso la posibilidad de desechar áreas donde se sabe de antemano que la prospección no proporcionará resultados óptimos e interpretables.

Con el estudio previo se persiguen objetivos bastante amplios, pero no menos importantes. Durante este estudio debemos observar primero las características generales del yacimiento; como, por ejemplo, su extensión, informaciones arqueológicas previas, la geología local, el tipo y las condiciones del suelo, la hidrología, la morfología del terreno en el cual se encuentra, el tipo de vegetación del área que ha de ser investigada, si hay la presencia o no de ciertos materiales (p.e. metálicos) que se comportan como anomalías en la prospección, informaciones arqueológicas previas, entre otros. Es aconsejable que todas estas observaciones sean debidamente anotadas y documentadas, y que también los puntos problemáticos, como por ejemplo la presencia de vallas metálicas, estén bien ubicadas



Figura 1: Yacimiento arqueológico de Iesso en diciembre de 2005, un mes antes de que se produjeran las prospecciones geofísicas. (Foto: C. Carreras).



Figura 2: Yacimiento arqueológico de Iesso. Esta área ha sido excluida de las cuadrículas de prospección geofísica. (Foto: P. Brito-Schimmel).

en los mapas disponibles del yacimiento, y, cuando sea necesario, se documenten con croquis o fotos.

La importancia de tener en cuenta la dimensión del yacimiento permitirá auxiliar en la elección del método a ser utilizado, ya que hay métodos más rápidos que suponen menores costes, como por ejemplo el método magnético, y por lo tanto son capaces de cubrir grandes extensiones en un tiempo más reducido. De esta forma se emplearían otros métodos, como por ejemplo el método eléctrico, a prospecciones de más detalle, ya que estos métodos tienen una adquisición de datos más lenta. Tener una idea de las dimensiones del asentamiento también nos permite estimar el tiempo necesario de la prospección geofísica y lo que esto implica, como por ejemplo aspectos relacionados con la logística, los gastos, etc.

Debemos recordar que los métodos geofísicos miden los contrastes entre las propiedades físicas del suelo y las que pueden proporcionar los restos arqueológicos. Por lo tanto, la estructura arqueológica que buscamos (muros o murallas de piedra, antiguas vías, hornos y estructuras resultantes de la cocción como los ladrillos, las tejas, etc...) debe producir un contraste con respecto al suelo de alrededor, o sea, el material constructivo debe ser distinto al suelo en el cual están enterradas, o poseer características distintas a este. En caso contrario, se mostrarían invisibles a los equipos geofísicos. Además, se debe tener en cuenta la potencia de los sedimentos, ya que cuando la roca madre aflora muy próxima a la superficie suele tener mayor influencia en los resultados geofísicos y puede enmascarar las anomalías más sutiles pertenecientes a las estructuras arqueológicas. La anomalía geofísica puede ser definida por el desvío en relación con el valor normal o el desvío del campo medio en relación con el campo regional (Duarte, 1997).

Por ello es importante conocer cuál es la geología local de la zona que se va a prospectar y, por las mismas razones, es muy importante saber el tipo de suelo además de sus condiciones hidrológicas, ya que suelos

húmedos presentan propiedades físicas completamente distintas a suelos secos, llegando incluso a afectar de forma importante a los resultados. Este es el caso de las prospecciones de electrorresistividad en suelos secos, que suelen tener resultados muy pobres. Por esta razón el clima y las estaciones del año también interesan, ya que en primavera y otoño tendríamos las condiciones idóneas para las prospecciones con relación a las condiciones de humedad del suelo. Por otro lado, en verano o invierno las condiciones del suelo son menos favorables, ya que en verano el suelo se presenta demasiado seco y en invierno, en lugares como España, muchas veces se puede presentar congelado, tornándose mucho más rígido que el habitual, y, en el caso de los métodos eléctricos, dificultando la penetración de los electrodos, lo que por su vez implica una toma de datos más lenta y en algunos casos deficiente.

En la figura 1 podemos apreciar el suelo cubierto de escarcha en el yacimiento arqueológico de Iesso (Guissona – Lleida). Afortunadamente, las condiciones climáticas en la época de dichas prospecciones ya eran más favorables. Las prospecciones geofísicas en este yacimiento fueron realizadas en enero de 2006. La extensión total de la prospección cubría una área de unos 2428 m², dentro del recinto amurallado de la ciudad, con el objetivo de mejorar el conocimiento que se tenía del área adyacente a las excavaciones actuales, que fue excavada en los siguientes años. La antigua ciudad romana de *Iesso* se sitúa dentro del actual parque arqueológico de Guissona.

Con respecto a la morfología del terreno, lo ideal es que la prospección se realice en áreas con topografía plana y que el gradiente topográfico sea lo más suave posible, ya que los principales riesgos de un gradiente topográfico abrupto son que puede generar «artefactos» en los límites del desnivel, como por ejemplo al límite de trincheras y estructuras similares. Por «artefactos», en geofísica, se entiende una información digital mal interpretada o extraña, resultado de las



Figura 3: Yacimiento arqueológico de Can Tacó. Vista desde la parte más alta del yacimiento. Se puede apreciar la fuerte pendiente presente en el área. (Foto: P. Brito-Schimmel).



Figura 4: Yacimiento arqueológico de Molins Nous. En esta foto se puede apreciar cómo las ramas molestan al operador por su paso cerca de los olivos. (Foto: C. Carreras).

limitaciones técnicas de un sistema, producida por la metodología o el instrumento. Los artefactos pueden indicar anomalías (estructuras) inexistentes, generar falsos colores o líneas falsas que impactan visualmente en la imagen de forma negativa.

En la figura 2, se observa un ejemplo de estructuras que pueden causar artefactos, en el yacimiento arqueológico de *Iesso*. Estos desniveles bruscos son muy comunes en áreas ya previamente excavadas. Sin embargo, este problema puede ser resuelto adecuando el tamaño de las cuadrículas de tal modo que dentro de las cuadrículas no esté ninguna trinchera u otros elementos de esta naturaleza. Sin embargo, áreas excavadas adyacentes a las áreas prospectadas son útiles, pues pueden servir como vínculo o base en la estimación de las profundidades de las anomalías en los resultados geofísicos.

También las pendientes fuertes deben ser evitadas, ya que causan una distorsión de las distancias tanto horizontal como vertical en la generación de los mapas geofísicos, y la corrección de tales efectos puede muchas veces ser problemática (Fig. 3).

En mayo del 2006 fue realizada una prospección geofísica en el yacimiento arqueológico de Can Tacó (Montmeló – Barcelona). El yacimiento de Can Tacó es uno de los pocos ejemplos de un posible *castellum*, o residencia oficial de un militar romano, del siglo II a.C. La parte excavada es una estructura que cubre unos 2000 m², y que está organizada en estancias de diversas dimensiones, delimitadas por un muro.

Este asentamiento está situado en lo más alto de una colina, cuyo perímetro de la parte plana, situada en la cúspide, es muy reducido. Como es normal en cimas como ésta, parte del substrato es visible en superficie, y en algunos casos ha sufrido una erosión considerable. Sobre todo, en la zona central de la cima, el substrato y las estructuras constructivas se confunden, y, por lo tanto, las diversas técnicas geofísicas no son útiles, ya que no permiten ver ningún contraste entre los substratos y los restos constructivos. Tan solo resulta conveniente

la prospección en la zona de perímetro de la colina. Pero se deben buscar terrazas razonablemente planas para aplicar los métodos geofísicos, ya que a lo largo de la pendiente este procedimiento sería inadecuado. Yacimientos arqueológicos situados en lugares con características geomorfológicas semejantes a Can Tacó hacen muy difícil la utilización de métodos geofísicos a larga escala, con el objetivo de delimitar el yacimiento. Una estrategia alternativa sería identificar pequeñas áreas planas en los flancos de la cima y allí hacer una prospección geofísica de detalle con la intención de encontrar alguna estructura arqueológica.

Por otra parte, la vegetación presente en el área investigada juega un papel importante y puede dificultar las prospecciones, como ha sido el caso del yacimiento romano de Molins Nous (Ruidoms, Baix Camp – Tarragona), que fue prospectado en junio de 2006. Entre los años 1977 y 1982 se realizaron unas excavaciones en el sector NO, dejando expuesto un trujal de aceite y una serie de piscinas de decantación de *opus signinum* con dos sillares de prensa. Al principio de 2006, se realizó una nueva intervención para completar la que ya se había realizado anteriormente. En este yacimiento fueron prospectados 7200 m² distribuidos en tres campos de diferentes niveles; actualmente los campos están cultivados con huertos y olivos. Las condiciones del yacimiento a la hora de prospectar eran buenas ya que en el momento de la misma se habían acabado de preparar los campos para sembrarlos nuevamente. Pero en los campos limítrofes predominaba el cultivo de olivos, lo cual ha provocado dificultades a la hora de caminar con los equipos geofísicos a lo largo de las líneas predeterminadas de la cuadrícula, debido a las ramas de los árboles, como se puede observar en la figura 4. Este inconveniente puede retrasar el paso del operador y por consiguiente romper el ritmo de sus pasos, que vienen marcados por el temporizador del magnetómetro.

Para una buena ejecución de los trabajos de campo, debemos entonces identificar el tipo y las condiciones



Figura 5: Retirada del material metálico que afectaría a las prospecciones geofísicas en el yacimiento arqueológico de Iesso. (Foto: P. Brito-Schimmel).



Figura 6: Yacimiento arqueológico de El Goleró. La gran cantidad de fragmentos de roca en superficie puede actuar como un «ruido» ambiental. (Foto: C. Carreras).

de la vegetación presente. La vegetación debe permitir que el operador del equipo geofísico pueda caminar sin dificultades a un ritmo constante, ya que muchas veces la adquisición de datos se hace de forma automática. En caso contrario, se debe limpiar el área (desbrozar) antes de empezar los trabajos geofísicos. En caso de que la vegetación tenga proporciones considerables, el área debe ser descartada, pues en casos extremos, por ejemplo, la presencia de gran cantidad de árboles, campos que todavía no habían sido cosechados, viñas, etc., pueden imposibilitar la ejecución de las prospecciones, ya que impiden el movimiento con los equipos geofísicos por el área que debe ser investigada, principalmente cuando los equipos llevan cables. Además, la vegetación puede perturbar los datos geofísicos, como es el caso de las raíces de los árboles. Recientemente, con el objetivo de preparar las prospecciones del otoño del 2007 en el *ager tarraconensis* (margen derecha del río Francolí), se han tenido que desestimar áreas con campos de viñedos u olivos próximos entre sí (Prevosti *et alii*, 2010).

Otro aspecto importante que afecta a las prospecciones geofísicas es la presencia o no de «ruidos». En geofísica, «ruido» es la parte de la señal que no tiene su origen en la estructura que nos interesa determinar o revelar, o sea, todas las señales no deseables que afectan a nuestros datos. En prospecciones geofísicas aplicadas a la arqueología hay ciertos tipos de ruidos muy recurrentes, como por ejemplo las redes de transmisión eléctrica, que muchas veces suelen pasar cerca de los yacimientos. Estas redes de transmisión eléctrica pueden afectar muchísimo al campo electromagnético local, haciendo que la adquisición de datos con un magnetómetro sea completamente distorsionada en su proximidad.

Las vallas metálicas que se utilizan para delimitar campos de cultivo, huertos o terrenos también son problemáticas para las prospecciones magnéticas, al igual que instalaciones de riego automático por aspersión. Por esto, es importante una visita previa al yacimiento,

para detectar si hay materiales metálicos que puedan provocar estos ruidos ambientales y que se pueden evitar, como por ejemplo restos de hierro, alambres, latas y toda clase de materiales metálicos de origen contemporáneo que pueden ser encontrados esparcidos superficialmente, en menor o mayor cantidad, en algunos yacimientos. En casos de grandes cantidades, pueden afectar excesivamente a los resultados de las prospecciones, y no hay otra alternativa que sacarlos, tal como sucedió en el yacimiento de Iesso (Fig. 5). En los casos donde sacar este material no es posible, como por ejemplo en las vallas metálicas que delimitan huertos y terrenos en general, debemos guardar una distancia de por lo menos 10 metros. Además es aconsejable tener estas estructuras metálicas muy bien localizadas y registradas en el plano del yacimiento, para que posteriormente las fuertes anomalías causadas por el metal no sean mal interpretadas y tampoco influyeran en la interpretación de posibles anomalías próximas a su ubicación. En el caso de las redes de alta tensión, el ruido es tan intenso que se recomienda no realizar prospecciones en su proximidad.

Además de estos ruidos, hay otros muy particulares, que pueden ser originados por la propia estructura geológica del área, como por ejemplo el caso del yacimiento de El Goleró (Tuixent – Serra del Cadí, Alt Urgel, Lleida). En junio de 2006 se prospectaron 6600 m², con el objetivo de mejorar el conocimiento que se tenía de esta área antes de realizar las correspondientes excavaciones arqueológicas. Allí, las estructuras arqueológicas en ciertas ocasiones se encuentran a poca profundidad y se pueden fácilmente confundir con el substrato geológico, que aflora en superficie en determinadas partes del yacimiento. En la figura 6 se aprecia la gran cantidad de fragmentos de roca en superficie. Estos fragmentos de roca, asociados a la pequeña potencia del sedimento en ciertas partes del asentamiento, actúan como un ruido ambiental e influyen negativamente en la calidad de los datos, dificultando la interpretación de los resultados. Por esto, el

contraste entre substrato y restos arqueológicos puede ser muy débil y generar confusiones a la hora de las interpretaciones. Otros ejemplos de ruido serían las tormentas magnéticas y las tormentas con descargas eléctricas, etc.

Cada método geofísico tiene diferentes grados de sensibilidad a un tipo de ruido, según qué propiedades físicas de la tierra se miden. Por esto, muy a menudo se combinan distintos métodos a fin de obtener un mejor partido de la prospección, pues si algún método falla en un punto determinado hay siempre datos de otro método para contrarrestar este fallo y permitir el análisis de los resultados. Además, las propiedades de cada método son diferentes, y por lo tanto complementarias a la hora de detectar una firma geofísica de una determinada estructura y material arqueológico. La firma es definida como la forma característica de una anomalía geofísica (Duarte, 1997).

Las informaciones arqueológicas obtenidas previamente del yacimiento son igualmente importantes para el planeamiento de las prospecciones geofísicas, principalmente para decidir qué método es el idóneo para la prospección en cuestión, cuál debe ser la orientación de las cuadrículas, qué espacio debe haber entre medidas, etc.

El segundo paso será analizar estos apuntes y adecuar las intenciones de las prospecciones a las condiciones reales de campo. Aquí se tendrán en cuenta los objetivos concretos a que se destina la prospección, como, por ejemplo, si ésta se realizará con el objetivo de delimitar el yacimiento y por lo tanto será una prospección a mayor escala, o por el contrario si se trata de una prospección de detalle para confirmar la continuidad o no de ciertas estructuras previamente excavadas o aclarar ciertos puntos oscuros del yacimiento. Por último, siempre existe la posibilidad de combinar prospecciones a gran escala con prospecciones al detalle, y de hecho es la combinación más frecuente.

Teniendo en cuenta estos puntos, podemos definir la estrategia de nuestra prospección, y pasaremos a la

siguiente fase, que será el trabajo de campo propiamente dicho.

TRABAJO DE CAMPO

Antes de iniciar la obtención de datos, existen algunos pasos previos que son muy importantes para el éxito de la prospección, como por ejemplo realizar las cuadrículas y que éstas estén correctamente marcadas en el mapa topográfico del área. Esta ejecución, lo más precisa posible, de las cuadrículas es fundamental para que, después de interpretados los datos, las anomalías geofísicas presentes en la imagen resultante de esta interpretación puedan ser correctamente ubicadas en el terreno. Debemos tener en cuenta que una pequeña distorsión en el ángulo recto de las cuadrículas, de alrededor de un grado por ejemplo, puede acarrear un desplazamiento del punto situado en el extremo opuesto de poco más de medio metro, cuando se trabaja en una cuadrícula de 30 x 30 metros. Se pueden cometer errores importantes si no se toman ciertas prevenciones. Y a la hora de excavar, si estas anomalías no fueron bien ubicadas en campo, podemos no encontrar las estructuras identificadas. Además, debemos tener en cuenta que los errores se suman, y las cuadrículas que tienen su punto de anclaje en una cuadrícula adyacente, tienden a generar un error cada vez mayor a medida que nos alejamos del punto de origen.

TOPOGRAFÍA

De modo general, una prospección topográfica en yacimientos arqueológicos es muy importante, pues proporciona una estructura dentro de la cual todas las evidencias pueden ser localizadas, permitiendo relacionar los resultados de diferentes métodos entre sí o entre estructuras ya existentes previamente registradas (Keay *et alii*, 2005). Para la geofísica, la



Figura 7: Operador con un GPS Hiper Pro Net-G3 en el yacimiento arqueológico de El Goleró durante la realización de la topografía del área investigada. (Foto: C. Carreras).

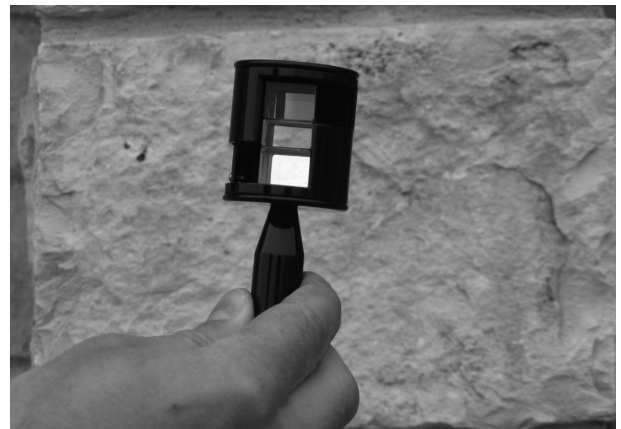


Figura 8: Visor con un juego de espejos que permite conferir la ortogonalidad de las cuadrículas. (Foto: P. Brito-Schimmel).

topografía tiene una implicación directa en los resultados, pues es a través de ella como se hará la corrección estratigráfica, ya que no todas las estructuras yacen paralelas a la topografía. Además de las correcciones de distancia vertical, la topografía permite corregir una distorsión horizontal en la generación de los mapas geofísicos.

En las áreas que ya fueron topografiadas anteriormente debemos utilizar los puntos base del mapa topográfico preexistente para iniciar nuestra cuadrícula. De este modo, la superposición de los mapas geofísicos a los mapas topográficos será más precisa.

En las áreas en las que no se han hecho previamente la topografía, se aconseja realizar una topografía antes de iniciar la prospección. Esta topografía puede ser hecha de distintas formas, pero las topografías digitales son muy recomendables, como por ejemplo utilizando un teodolito del tipo estación total o un GPS del tipo *Hiper Pro Net-G3* de *TopCan* (Fig. 7). Entre las ventajas se destaca que los mapas topográficos, al tener formato electrónico, facilitan el trabajo de superposición de imágenes para la presentación final de los resultados y su incorporación en SIG (sistemas de información geográfica), además de ser mucho más precisos.

En casos en donde no sea posible la utilización de una topografía en formato digital, podemos mejorar la precisión a la hora de hacer nuestra cuadrícula, vigilando la ortogonalidad de las líneas. Este paso es relativamente simple y puede ser hecho utilizando un combinado de sistemas, como por ejemplo la triangulación y un simple visor, pero ingenioso, que consta básicamente de un juego de espejos (Fig. 8). En estos casos hay que vigilar en extremo el anclaje de los puntos de las cuadrículas con los puntos bases de la topografía y con los puntos de las excavaciones previas, en el caso de que éstas existieran.

CUADRÍCULA

Una cuadrícula no está solo compuesta por las cuatro líneas que encierran en sí un polígono (cuadrado o rectángulo), sino que también está formada por las distancias entre cada punto de medida, formando literalmente una malla. Estas distancias entre los puntos de medida pueden ser diferentes en una de las dos direcciones del espacio bidimensional (ejes x y y). O sea, la distancia entre cada punto de medida sobre las líneas de prospección y la distancia entre las líneas de prospección propiamente dichas.

La cuadrícula o *grid* puede ser regular, lo que suele ser recomendado, pero también puede adoptar formas irregulares, a fin de adaptarse a ciertas zonas en concreto.

Para delimitar las cuadrículas debemos tener en cuenta las dimensiones más convenientes de los cuadros en relación con los métodos que serán empleados, nuestro objetivo y las dimensiones del área que se va a

prospectar. En general, las cuadrículas más utilizadas son cuadrados de 30 x 30 m, y las separaciones entre las líneas son como máximo de un metro. Las distancias entre cada medida a lo largo de las líneas de medición varían con cada método, pero no suelen ser más de 0,5 m. La densidad de medidas está relacionada con el grado de detalle necesario, según las características y dimensiones de la estructura investigada y el aparato utilizado. Se puede generalizar un parámetro de distancia aceptando que la distancia entre mediciones debe ser al menos dos veces menor que la más pequeña de las estructuras buscadas (Dabas, 1998).

Si hay evidencias en superficie, debemos tener en cuenta la orientación de las estructuras del yacimiento, ya que es muy recomendable que las líneas de prospección corten tangencialmente las estructuras arqueológicas y no sean paralelas ni perpendiculares a ellas. Si las líneas de prospección fueran paralelas a las estructuras se corre peligro de perder información, por ejemplo cuando hay justo una pared o muro paralelo entre dos líneas de prospección. Una línea tangente de siete a nueve grados respecto a las orientaciones de los muros detectados será suficiente para que cualquier potencial muro perpendicular o paralelo pueda ser reconocido en la prospección.

Los puntos de la cuadrícula pueden ser marcados a la vez que se hace la topografía en formato digital, o por separado, cuando se utiliza un mapa topográfico preexistente.

También es importante que los puntos sean materializados con estacas de material no metálico, ya que el metal podría actuar como un ruido para las prospecciones magnéticas. Estas estacas, que suelen ser de plástico y de colores vivos para que puedan ser fácilmente identificadas, deben quedarse en su sitio durante toda la prospección geofísica, ya que los distintos métodos empleados en una misma prospección utilizarán la misma cuadrícula, y el hecho de remarcar los puntos de la cuadrícula sólo implica ampliar el margen de error en la localización de los mismos puntos. Además, siempre que sea posible, es recomendable que estas estacas, o por lo menos las fundamentales, se mantengan en campo hasta que se realice la verificación de las anomalías o una posterior excavación, para que de este modo disminuya el riesgo de errores a la hora de reconstruir la localización de la cuadrícula y ubicar las anomalías geofísicas de interés arqueológico.

ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la adquisición de datos, lo más común es que se establezcan los dos extremos paralelos de la cuadrícula con una cinta métrica o una cuerda con marcas a cada metro, y que perpendicularmente se vaya moviendo otra cinta métrica que servirá de guía para el operador del aparato geofísico, a lo largo de la cual se tomarán las medidas. Al final de cada línea medida,



Figura 9: Cambio de la línea guía al próximo punto de medida, en el yacimiento arqueológico de Molins Nous. (Foto: P. Brito-Schimmel).

ésta se cambiará hasta el próximo punto de medición (Fig. 9). Para que la adquisición de datos sea lo más eficiente posible es aconsejable que el operador utilice los dos sentidos de la dirección, en zigzag (ida y vuelta), para las lecturas con el aparato. Por esto, en general, esta línea se desplaza de dos en dos metros, para que se puedan aprovechar los dos sentidos de medición.

Si en un yacimiento se realiza la adquisición de datos con dos o más métodos geofísicos a la vez, hay que tener en cuenta que ellos pueden provocar fuentes de ruidos entre sí, por lo tanto se deben guardar las distancias entre un aparato y otro. Como podemos ver en la figura 10, las diferentes medidas están siendo adquiridas simultáneamente, pero con una cierta distancia entre ambos aparatos. El método magnético ha sido el primero en empezar, pues es más rápido que el método de resistividad. Por una cuestión de logística se debe empezar por el método más rápido, ya que si se hace al revés el método más rápido podría atropellar al más lento.

Cuando se trata de métodos magnéticos, el operador no debe llevar nada de metal encima, ni tampoco pantalones con cremalleras o botones metálicos, o botas con hebillas metálicas, pues los magnetómetros actuales son muy sensibles y estas pequeñas piezas de metal pueden interferir en la calidad de los datos.

Con el método de electrorresistividad el problema se encuentra en el manejo de los cables, ya que estos, si se encuentran muy enrollados, funcionan como una bobina y generan campo magnético, influyendo negativamente en los datos.

Con el georradar, la mayor preocupación es que el suelo sea suficientemente plano para que la antena esté perfectamente acoplada a él, evitando que de este modo haya múltiples reverberaciones relacionadas con las ondas aéreas, lo que, por su parte, también perjudica la calidad de los datos. Suelos como los del yacimiento de Molins Nous (Fig. 11a) no son los más indicados para las prospecciones del georradar, ya que



Figura 10: Adquisición de datos con dos métodos geofísicos en una misma cuadrícula, respetando una cierta distancia entre ellos. (Foto: P. Brito-Schimmel).

la antena no estaría completamente en contacto con el suelo debido a su constitución en forma de terrón (bloques de tierra con dimensiones de 15 a 20 cm). En en el mismo yacimiento, en un área donde el arado no había penetrado tanto en el suelo, el resultado ha sido un suelo formado por bloques de tierra más pequeños, con dimensiones de alrededor de cinco centímetros (Fig. 11b), lo que posibilitó la utilización del GPR, pues la superficie del área se presentaba más plana y permitía un mejor acoplamiento de la antena del georradar al suelo.

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN

Los métodos geofísicos estudian la distribución de las propiedades físico-químicas del subsuelo o alguna característica relacionada con dichas propiedades. A través de la prospección geofísica podemos medir las variaciones de estas propiedades e identificar las divergencias o anomalías con respecto al valor normal que se esperaría en la zona investigada (Cantos Figuerola, 1974). Cuando aplicamos los métodos geofísicos en arqueología, los valores anómalos detectados pueden indicar la presencia de estructuras de interés arqueológico.

En las prospecciones realizadas a través de una colaboración entre el Institut Català d'Arqueologia Clàssica – ICAC y la empresa SOT en 2006 se utilizaron como mínimo dos métodos geofísicos en cada yacimiento con el objetivo de obtener la mayor cantidad de información posible, ya que los diferentes métodos miden distintas propiedades físicas del suelo, y por lo tanto poseen características complementarias. Así, se intenta minimizar las posibles ambigüedades en la interpretación de los resultados.

La consideración de todas las informaciones recogidas durante el estudio previo de cada yacimiento, posibilitó la elección más adecuada de los métodos empleados (Gaffney y Gater, 2003; Witen, 2006).

MÉTODO MAGNÉTICO

Las anomalías magnéticas están, en general, producidas por cuerpos magnetizados, debido a la influencia del campo magnético terrestre (Udías y Mezcua, 1997). La prospección magnética mide la amplitud de este campo, y las pequeñas variaciones detectadas indican heterogeneidades que, en ciertos casos, pueden revelar la presencia de estructuras de interés arqueológico. La amplitud es el atributo que mide el desplazamiento máximo (positivo o negativo) de un pulso, a partir del nivel cero (Duarte, 1997).

Las estructuras más indicadas para ser prospectadas por métodos magnéticos son: objetos metálicos en general, estructuras arqueológicas sometidas al calentamiento (fuegos, hornos, forjas, etc.), artefactos resultantes de la cocción (cerámicas en general como ladrillos, tejas, etc.), suelos antrópicos (Aspirall *et alii*, 2008).

En las prospecciones magnéticas fue utilizado el gradiómetro *Single Fluxgate FM-256* de *GeoScan*, que puede registrar hasta 16 lecturas por metro. Sin embargo, el valor de cuatro lecturas por metro es tal vez más adecuado, ya que para una prospección arqueológica un mínimo aceptable sería dos lecturas por metro, y valores por encima de cuatro lecturas por metro apenas producen un incremento notable en la resolución (Clark, 2000). Estas lecturas se realizan automáticamente gracias a un temporizador, mientras el operador camina a lo largo de las líneas de medición que componen la cuadrícula. A cada metro el gradiómetro emite un *bip*, y esta señal sonora debe coincidir con las marcaciones de metro en metro de la cuerda o de la cinta métrica que materializa las líneas de medición. Esto permite al operador controlar su ritmo, con solamente mirar dichas marcaciones. Por lo tanto, para operar un gradiómetro con adquisición de datos automática se debe caminar a un paso constante y con ritmo, llevando el gradiómetro siempre a la misma altura del suelo y a una distancia constante de la línea de medida (en general 0,5 m). Estas características de operación exigen cierta experiencia del operador, y además una superficie de terreno relativamente suave y una vegetación que no moleste demasiado. En campos irregulares se pueden tener dificultades en mantener el ritmo y hacer coincidir los *bips* con las marcaciones de metro en metro (Clark, 2000; Gaffney y Gater, 2003).

MÉTODO ELÉCTRICO

Los métodos eléctricos se basan en la medida de la resistencia que opone un cierto volumen de roca al paso de una corriente eléctrica (Udías y Mezcua, 1997).

Las medidas de resistividad eléctrica son adecuadas para ciertos tipos de contrastes del suelo que comprenden diferentes retenciones de agua o concentraciones de iones disueltos (Weymouth, 1986). El estado en que el suelo se encuentra y su composición también



Figura 11: Suelos del yacimiento de Molins Nous. a) Suelo formado por múltiples bloques de tierra en forma de terrón con dimensiones de 15 a 20 cm. b) Suelo formado por bloques de tierra más pequeños, con dimensiones de alrededor de 5 cm. (Fotos: P. Brito-Schimmel).

están directamente relacionados con la resistividad que este pueda ofrecer.

En la práctica, los factores que debemos observar en campo son: el grado de compactación del suelo, distribución de la humedad en la superficie investigada, presencia de vegetación, tendencia del suelo a ser más arcilloso o arenoso, etc. Además, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas en que las prospecciones se realizan, ya que una estación lluviosa puede proporcionar resultados muy distintos a los de una estación seca.

Las estructuras más indicadas para ser prospectadas por métodos eléctricos son: estructuras constructivas de piedra (muros, fundaciones de casas u otras estructuras urbanas), estructuras de excavación y relleno (fosos y trincheras previamente excavadas que fueron posteriormente rellenados por sedimento en el transcurso de los años), suelos compactados (antiguas vías, suelos de casas, etc.).

En arqueología, la separación de los electrodos generalmente varía entre 0,5 y 2 metros. Para la típica configuración en el modo *Twin*, una separación de electrodos de 0,5 metros proporciona una investigación eficaz aproximadamente a un metro de profundidad (English Heritage, 1995; Gaffney y Gater, 2003).

En prospecciones eléctricas se utilizó el *Resistance Meter RM 15* de *GeoScan*, que tiene la posibilidad de incorporar un *MPX15 Multiplexer*, con el cual es posible realizar tres medidas simultáneas a tres profundidades distintas en un mismo punto. Para esto son necesarios tres pares de electrodos separados en 0,5, 1 y 1,5 metros, y combinados en la configuración denominada *Twin Probe* (o *Twin Electrode*). A pesar de la clara ventaja de la realización de tres medidas simultáneas en un mismo punto, la utilización del accesorio *Multiplexer* tiene el inconveniente de que la penetración de los electrodos en el suelo es más difícil, ya que la barra transversal donde originalmente están fijados dos electrodos tiene su tamaño aumentado por el *Multiplexer*. Entonces, los electrodos de las extremidades suelen sufrir una penetración irregular o deficiente, y esto hace que la adquisición de datos sea más lenta. Por lo tanto, este accesorio es indicado para yacimientos planos y suelos más bien blandos.

GEORRADAR

El georradar, también conocido como GPR (*Ground Penetrating Radar*), es un sistema de exploración del subsuelo que utiliza ondas electromagnéticas (EM) (Imai *et alii*, 1987). A la diferencia de otros métodos electromagnéticos, el georradar opera en altas frecuencias (10 MHz a 2,5 GHz), pero en arqueología los mejores resultados se obtienen con antenas de 200 hasta 500 MHz. Otra peculiaridad de este método es que el principal parámetro físico del que depende es la constante dieléctrica del medio. La constante dieléctrica representa la capacidad de un material para polarizarse bajo el efecto de un campo eléctrico (Dabas, 1998).

El método consiste en obtener una imagen de alta resolución del subsuelo, a través de la transmisión de un corto pulso de alta frecuencia, para generar ondas electromagnéticas que se propagan hasta encontrar un cuerpo o superficie reflectora. Estas superficies reflectoras son causadas por una variación en la composición del medio, alterando su constante dieléctrica. Un ejemplo de esta alteración puede ser simplemente una variación en el contenido volumétrico de agua. Parte de esta onda es reflectada hasta la superficie (el pulso

electromagnético que se propaga en el suelo puede sufrir: reflexión, refracción, difusión y dispersión [Simms y Albertson, 2000]) y puede ser detectada por la antena receptora y registrada en función del tiempo doble de trayecto. El tiempo doble es el tiempo que la onda tarda en recorrer hasta la interfaz reflectora y retornar a la superficie (tiempo de ida y vuelta).

El éxito de una prospección con georradar en arqueología depende de la mineralogía del sedimento, grado de humedad del suelo, profundidad de las estructuras investigadas, topografía y tipo de vegetación presente en el área de estudio (Conyers y Goodman, 1997).

La profundidad de investigación con GPR está directamente relacionada con la frecuencia de las ondas electromagnéticas. Cuanto más baja es la frecuencia, mayor la profundidad de penetración de la onda en el suelo, y, cuanto más alta la frecuencia, menor será esta penetración. Por su parte, las variaciones de las propiedades eléctricas del medio (conductividad eléctrica, permisividad dieléctrica y permeabilidad magnética) también influyen en la profundidad de penetración de la señal, que, por ejemplo, puede ser de cinco metros en suelos arcillosos, 50 m en dunas y granitos, 200 m en rocas de sal y hasta 4 km en el hielo.

El georradar es muy indicado para investigar las estructuras que se encuentran bajo zonas pavimentadas donde no es posible la utilización de otros métodos geofísicos (contexto urbano, bajo plazas, carreteras, iglesias, etc.). Las estructuras arqueológicas más indicadas para ser investigadas por GPR son enterramientos, criptas, osarios, tumbas y estructuras semejantes, y también fundaciones en general y estructuras de excavación que fueron posteriormente rellenadas.

En las prospecciones con GPR fue utilizado el *New Terra Sir-3000*, con una antena de 400 MHz. Se han realizado lecturas a cada 0,02 m y la distancia entre líneas de prospección fue de 0,5 m.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Tras la adquisición de los datos, el siguiente paso es el análisis de los mismos. Cada técnica tiene su propia metodología, pero de forma general los pasos son similares. Se empieza por la descarga de los datos, que están registrados en el aparato que realizó la prospección, a un ordenador, donde estos datos posteriormente se analizarán. Para realizar esta descarga se suele utilizar el programa que ya viene con los equipos geofísicos. La correcta descarga de datos es muy importante y hay que tener especial atención en el almacenamiento de los mismos, para que la cuadrícula original pueda ser fielmente reconstituida y no haya filas de datos invertidas o en posiciones inadecuadas.

El paso siguiente sería visualizar los datos en estado bruto, o sea, visualizar los datos antes de pasar por algún tipo de procesamiento. Esta visualización permite tener una idea preliminar de las estructuras que se

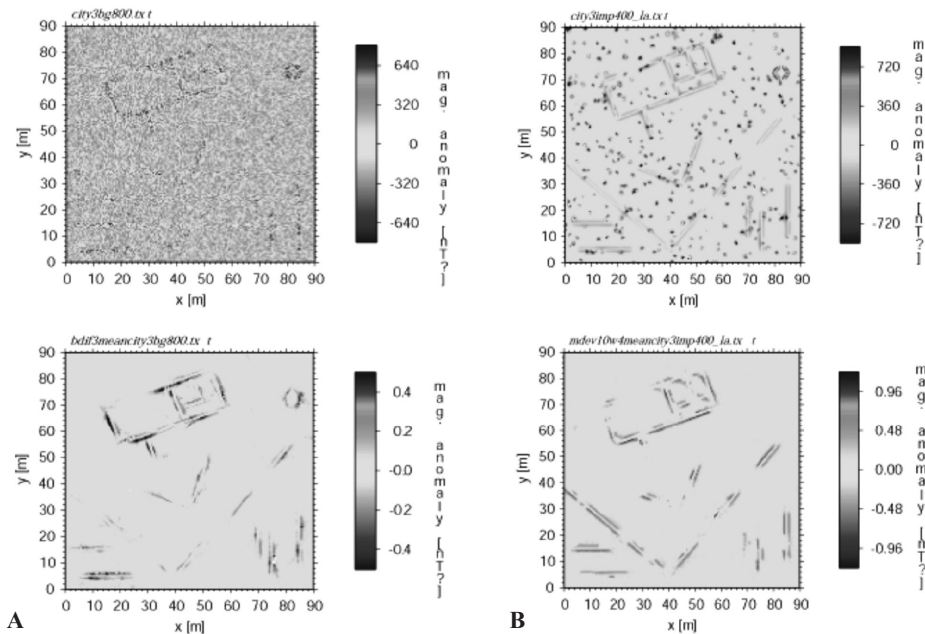


Figura 12: Resultado de la aplicación de un filtro en datos sintéticos contaminados con dos clases de ruidos: a) ruido de fondo, b) ruido puntual. (Filtros en fase final de desarrollo en la tesis doctoral de Brito-Schimmel).

buscan, además de permitir saber cuál es el estado de los datos. En principio, si la adquisición fue correcta y las condiciones de campo fueron buenas, la visualización de los datos brutos no solo es suficiente para la interpretación de los mismos, sino que es la más recomendable, ya que así se evita al máximo la manipulación del resultado a través de los filtros, obteniéndose unos resultados muy claros y evitando la posible creación de artefactos en la imagen final.

En muchas situaciones de prospecciones geofísicas aplicadas en arqueología, las condiciones no son tan ideales, y se necesita hacer un procesamiento de datos. Esta fase puede ser más o menos compleja, según las condiciones de los datos. Consiste básicamente en la utilización de los diversos filtros existentes para eliminar los ruidos que contaminaran los datos durante su adquisición. La determinación del filtro adecuado para cada caso es importante para el éxito de la interpretación de los resultados.

Después de terminado el procesamiento de datos, pasamos a la fase de interpretación y a la presentación final de los mismos.

FILTROS

Los ruidos son bastante frecuentes en las prospecciones geofísicas, y son derivados de distintas fuentes. Algunas ya las hemos visto en el estudio previo del yacimiento, pero hay otras, como, por ejemplo, los cables del equipo de resistividad (que, cuando están enrollados y se comportan como una bobina, generan un campo magnético que actúa como un ruido para la prospección) el propio instrumento geofísico, que

puede generar ruido a otro instrumento que prospecta cerca, los teléfonos móviles, fuentes de electricidad, tormentas, etc. Ciertas veces no los podemos evitar, y para ayudarnos en estas situaciones están los filtros. Además, el impacto del ruido en las imágenes varía según la amplitud de la señal; consecuentemente la atenuación del ruido puede ser importante para identificar estructuras con señales débiles.

Un filtro utilizado en datos geofísicos no es nada más que un sistema, con fundamentos matemáticos y físicos, que discrimina ciertas señales, según la técnica implementada y los parámetros escogidos.

Con los filtros podemos atenuar ciertos ruidos o incluso eliminarlos por completo, como es el caso de ruidos que poseen unas características muy marcadas y distintas de la señal. El grado de atenuación dependerá de varios factores, entre ellos, si la señal está o no corrompida por el ruido y en qué grado esto ocurrió. Una señal está corrompida por un ruido cuando la señal es irreversiblemente perturbada por la presencia del ruido con unas mismas características, como, por ejemplo, las mismas frecuencias.

Actualmente hay una gran cantidad de filtros disponibles ya con los programas que acompañan al equipo geofísico, y compete al profesional saber utilizarlos bien. Además de estos filtros comerciales, hay otros que son frutos del desarrollo de trabajos puramente científicos, y su utilización es un tanto restringida a un entorno más cercano al medio que le ha desarrollado. No obstante, estos filtros también pueden ser muy potentes y tienen la ventaja de haber sido desarrollados para un objetivo en concreto, como por ejemplo un filtro desarrollado específicamente para su utilización en arqueología (Fig. 12), que es capaz de detectar

estructuras como muros o murallas, paredes de casas y antiguas construcciones, etc.

En la imagen podemos observar la utilización de este filtro con datos sintéticos. Las dos imágenes representan un yacimiento arqueológico hipotético. Cada una de ellas fue contaminada con un alto grado de ruido, representando dos clases de ruidos frecuentes en prospecciones geofísicas aplicadas a la arqueología. Estas dos clases de ruidos en la figura 12 están representadas: a) por el ruido de fondo y b) por el ruido puntual. El ruido de fondo puede ser causado por distintas fuentes, según qué método se utilice, pero en general representa el ruido causado por un material disperso de forma más o menos homogénea por todo el yacimiento o en una parte concreta de éste, siempre que la parte afectada ocupe grandes dimensiones. Un ejemplo práctico sería el ruido que puede ser originado por la propia estructura geológica del área, como es el caso del yacimiento de El Goleró, ya citado en el estudio previo del yacimiento. Un ruido puntual, como el nombre nos describe, es un tipo de ruido aislado que está disperso de forma irregular por el yacimiento. Un ejemplo práctico del ruido puntual sería, en prospecciones magnéticas, aquellos causados por metales en general, situados muy próximos a la superficie, enterrados o semienterrados, tales como latas, clavos, restos metálicos de materiales de la construcción civil, etc.

Como vemos en los ejemplos anteriores, los filtros pueden ser muy útiles en la fase de procesamiento de datos. Además de utilizarlos para atenuar o incluso eliminar los ruidos, podemos jugar con los parámetros de estos filtros para acentuar determinadas estructuras, realzar las partes de la imagen que más nos interesan, aislar estructuras, etc. Y, de esta forma, podemos obtener más elementos para una interpretación de datos más fiable.

Sin embargo, en la utilización de filtros debemos ser muy cautos, pues son una potente herramienta y, si se utilizan mal, pueden distorsionar de tal modo los resultados finales que la interpretación de los mismos tal vez no corresponda a la realidad, y consecuentemente todo el trabajo realizado en la prospección no tendrá su debido valor. Los filtros también pueden generar artefactos, y, si la persona que analiza e interpreta las imágenes no tiene experiencia, puede confundir los artefactos con estructuras arqueológicas.

Además los filtros no hacen milagros. Si la señal ha sido corrompida por un ruido desconocido, no se puede restablecer la señal original. Por lo tanto, se debe siempre recordar que más vale una obtención de datos bien hecha, que tener que utilizar filtros. Los filtros deben siempre ser usados de forma consciente, o sea, que el operador sepa el significado físico y matemático de los parámetros manipulados, y sólo entonces los resultados serán lógicos y no meras imágenes aparentemente mejores que la imagen de los datos brutos.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Después de tener los datos debidamente procesados, pasamos a la fase de interpretación. En esta fase se analizan qué anomalías tienen un potencial arqueológico y cuáles no. Se intenta determinar qué posibles estructuras podrían originar tales anomalías y estimar las dimensiones y las respectivas profundidades a que se encuentran estas estructuras.

Generalmente no es difícil estimar los contornos de fundamentos y estructuras constructivas u otras estructuras, como por ejemplo antiguas vías, ya que éstas se representan en las imágenes geofísicas por anomalías que se parecen a sus respectivos contornos. La profundidad también puede ser más fácilmente estimada cuando tenemos alguna referencia cercana, como por ejemplo un área adyacente ya excavada o la posibilidad de hacer un pequeño foso o trinchera de control. Pero, por ejemplo, en anomalías aisladas o puntuales, puede ser difícil estimar la dimensión y la profundidad de la estructura en cuestión. En geofísica en general, y en algunas veces en su aplicación a la arqueología, estimar estas características no es tarea tan fácil, y a menudo se recurre a un estudio de modelado que se basa en estrategias teóricas para determinar el modelo que mejor explica los datos. La obtención de un modelo a partir de los datos es llamado «problema inverso». Según el tipo de medidas y configuración de la adquisición de datos pueden existir diferentes modelos que explican los datos de la misma forma. Esto demuestra la ambigüedad que se tiene a veces en la interpretación de datos, ya que frecuentemente es difícil diferenciar el efecto de un cuerpo pequeño próximo a la superficie del efecto de un cuerpo grande que se halla en profundidad (Burger, 1992).

La interpretación preliminar suele ser hecha por el geofísico o equipo geofísico responsable de la prospección. Y para la interpretación final es muy recomendable que sea hecha conjuntamente con los geofísicos y arqueólogos implicados en el trabajo de campo. Pues un proyecto multidisciplinar, como la geofísica aplicada a la arqueología, requiere conocimientos de ambas especialidades, para identificar mejor las estructuras y para que la información proveniente de la interpretación de los resultados sea lo más rigurosa posible.

PRESENTACIÓN / DIFUSIÓN

Al compararse con otras aplicaciones de la geofísica, la aplicación en la arqueología presenta una densidad de datos muy elevada, ya que los espacios entre las medidas son pequeños. Y esto significa una enorme cantidad de valores en un mapa. En estas condiciones, la presentación de datos más efectiva es la que se hace en mapas con escala de grises, principalmente para los resultados de la magnetometría y resistividad, ya que la mayor cantidad de *pixels* en color podría dar un aspecto confuso y ciertas estructuras tenues podrían no ser identificadas.

Cuanto más clara es la imagen, mayor es la probabilidad del éxito en la interpretación de los datos. Pues así, además de visualizar las anomalías originadas en estructuras con gran potencial arqueológico, el mapa de resultados final nos permite excluir las anomalías que no son de origen arqueológico, y que pueden ser, por ejemplo, de origen geológico.

Actualmente, la presentación de datos se orienta cada vez más a un público científico de carácter multidisciplinar, y muchas veces tiene su objetivo final el público en general. Para que los resultados sean comprensibles por todos los públicos, de carácter científico o no, es necesario que las imágenes finales sean muy accesibles y de fácil interpretación. Por lo tanto, se hace necesario utilizar herramientas cada vez más sofisticadas, pero a la vez más didácticas, para la difusión de los resultados.

Entre estas herramientas están los Sistemas de Información Geográfica (SIG), más conocidos por la sigla inglesa GIS (*Geographical Information System*), y los programas de realidad virtual.

Los SIG permiten realizar una serie de operaciones con los datos, los resultados, las interpretaciones, etc., de tal forma que se pueden visualizar varias informaciones a la vez en un mismo mapa. Además, esta potente herramienta permite combinar las imágenes de prospecciones con fotografías aéreas y dibujo topográfico con restos arqueológicos. Estos mapas compuestos son muy útiles para una comprensión global del área investigada.

Exactamente en esto punto, volvemos a recordar la importancia de tener el área bien topografiada. Ya que, cuando unimos las informaciones en un mismo mapa como si fuesen varios mapas superpuestos, para que estas informaciones sean fieles a la realidad, y consecuentemente útiles, deben estar correctamente ubicadas.

Si después de todo el trabajo anteriormente descrito, desde la preparación de la prospección hasta la interpretación de los datos, no ubicamos bien los resultados, podemos echar todo a perder, ya que si, una vez reubicados estos resultados en campo no corresponden a la estructura arqueológica buscada, nuestro trabajo no habrá sido útil.

Aquí también queda clara la ventaja de topografiar el área de forma digital, pues facilita mucho la utilización de programas de GIS.

CONCLUSIONES

Los métodos geofísicos son una potente herramienta auxiliar de la arqueología, pero tienen limitaciones. Por lo tanto, hay que elegir los métodos según el objetivo arqueológico, sus características y las características de su entorno. Estas características pueden ser clasificadas en: geométricas, como tamaño y profundidad de la estructura arqueológica; físicas, como

las propiedades físicas que causan las anomalías, y geológicas que están relacionadas con el tipo de suelo o rocas, topografía, etc. Debemos ser conscientes de qué métodos son más adecuados a determinadas situaciones, y por supuesto, de cuáles son las situaciones en que ellos no proporcionan resultados de calidad. Además, es siempre aconsejable la utilización de por lo menos dos métodos geofísicos en la misma prospección, para que de esta forma se tengan más elementos a la hora de aclarar los puntos oscuros en la interpretación de los resultados (Campana y Piro, 2009).

La adquisición de datos es una operación clave para posibilitar la obtención de buenos resultados. Pues no podemos esperar buenos resultados a partir de datos problemáticos, como, por ejemplo, de los causados por fuertes ruidos debidos a objetos no removidos. Tener el área correctamente topografiada es fundamental para que las cuadrículas estén bien hechas, permitiendo así que las anomalías geofísicas puedan ser bien ubicadas en campo y consecuentemente bien correlacionadas con las posibles estructuras arqueológicas correspondientes.

El éxito de las prospecciones geofísicas depende no solo del trabajo de campo durante la adquisición de datos, sino de toda una metodología que empieza con la preparación del área prospectada y se extiende hasta el procesamiento e interpretación de los datos (Gaffney *et alii*, 1991; 1993).

Siempre hay que ser consciente de que pueden existir ambigüedades en la interpretación de los resultados. Por lo tanto, es importante considerar el máximo de informaciones adicionales *a priori*, como, por ejemplo, perfiles de fosos o trincheras e informaciones que provienen de excavaciones previas realizadas en áreas adyacentes a las áreas de estudio, además de informaciones respecto de la vegetación, topografía, tipo de suelo, etc.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos su colaboración a los arqueólogos responsables de los yacimientos arqueológicos citados en este artículo: Dra. Marta Prevosti (yacimiento de Molins Nous), Dr. Josep Guitart (yacimiento de Iesso), Dra. Esther Rodrigo (yacimiento de Can Tacó) y Dr. Josep Maria Palet (yacimiento de El Goleró). Además, damos las gracias a Roger Sala (Empresa SOT), por proporcionar los datos e imágenes geofísicas.

Paula Brito-Schimmel
britoschimmel@yahoo.fr
César Carreras
Dpt. Ciències de l'Antiquitat
Universitat Autònoma de Barcelona
Facultat de Lletres
08193 Bellaterra
cesar.carreras@uav.cat

BIBLIOGRAFÍA

- ALMAGRO-GORBEA, M., 1992: «La Teledetección y la Geofísica en España: el estado actual de la cuestión», *Jornadas sobre Teledetección y Geofísicas Aplicadas a la Arqueología (Madrid, 1986)*, Madrid, 7-10.
- AITKEN, M. J., 1958: «Magnetic prospecting. I – The Water Newton Survey», *Archaeometry*, 1, 24-29.
- ATKINSON, R. J. C., 1963: «Resistivity surveying in archaeology», en E. PYDDOKE (ed.), *The scientist and Archaeology*, 1-30, London.
- ASPINALL, A., GAFFNEY, C. y SCHIMMELT, A., 2008: *Magnetometry for Archaeologists*, Lanham.
- BRITO-SCHIMMEL, P. y CARRERAS, C., 2005: «Aplicación de Métodos Geofísicos en arqueología: Una recopilación sobre el actual estado de la cuestión en España», *Scientific Heritage* 0(1) (<http://www.ua.es/arqueometria/revista/Vol0-n.1-2005/APLICACIONDEMETODOSGEOFISICOSENARQUEOLOGIA-1.pdf>).
- BURGER, H. R., 1992: *Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*, New Jersey.
- CAMPANA S. y PIRO S., 2009: «Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology», *Proceeding Of the XVth International Summer School*, Taylor&Francis, Londres.
- CANTOS FIGUEROLA, J., 1987: *Tratado de Geofísica Aplicada*, Madrid.
- CARRERAS, C., 2000: «Aplicacions de les tecnologies de la informació i la comunicació en arqueologia: la prospecció geofísica», *Digit-hum 2* (<http://www.uoc.es/humfil/digithum/>).
- CLARK, A. J., 1986: «Archaeological geophysics in Britain», *Geophysics*, 51(7), 1404-1413.
- CLARK, A., 2000: *Seeing Beneath the Soil – prospecting methods in archaeology*, London.
- CONYERS, L. B. y GOODMAN, D., 1997: *Ground-Penetrating Radar. An Introduction for archaeologists*, California.
- DABAS, M., 1998: «La prospection géophysique», *La prospection. Collection Archéologiques dirigée par Ferdière, A. Errance*, 161-207, Paris.
- DABAS, M., CAMERLYNCK, C. y FREIXAS I CAMPS, P., 2000: «Case History: Simultaneous use of electrostatic quadrupole and GPR in urban context: Investigation of the basement of the Cathedral de Girona (Catalunya, Spain)», *Geophysics*, 65(2), 526-532.
- DUARTE, O. DE O., 1997: *Dicionário Enciclopédico Inglês – Português de Geofísica e Geologia*, Rio de Janeiro.
- ENGLISH HERITAGE, 1995: «Geophysical survey in archaeological field evaluation», *Research & Professional Services Guideline N° 1*, London.
- GAFFNEY, C., GATER, J. y OVENDON, S., 1991: «The Use of Geophysical Survey Techniques in Archaeological Evaluations», *Institute of Field Archaeologists Technical Paper* No. 9.
- GAFFNEY, C. y GATER, J., 1993: «Development of Remote Sensing Part 2: Practice and method in the application of geophysical techniques in archaeology», en J. HUNTER e I. RALSTON, I. (eds.), *Archaeological Resource Management in the UK*, 205-214.
- GAFFNEY, C. y GATER, J., 2003: *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists* Stroud, (Tempus).
- GARCÍA, A., ORTIZ, R. y SUAZO, C., 1984: «Geofísica», *Primeras Jornadas de Metodología de Investigación Prehistórica* (Soria, 1981), Madrid, 271-276.
- GIBSON, T.H., 1986: «Magnetic prospection on prehistoric sites in western Canada», *Geophysics*, 51(3), 553-560.
- HESSE, A., 2000: «Count Robert du Mesnil du Buisson (1895-1986), a French precursor in geophysical survey for archaeology», *Archaeological Prospection*, 7, 43-49.
- IMAI, T., SAKAYAMA, T. y KANEMORI, T., 1987: «Use of round-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations», *Geophysics*, 52(2), 137-150.
- KEAY, S., MILLETT, M., POPPY, S., ROBINSON, J., TAYLOR, J. y TERRENATO, N., 2000: «Falerii Novi: A New Survey of the Walled Area», *Papers of the British School at Rome* 68, 1-93.
- KEAY, S., MILLETT, M., PAROLI, L. y STRUTT, K., 2005: «Portus. An archaeological survey of the port of imperial Rome», *Archaeological Monographs of the British School at Rome*. n° 15, London.
- PEÑA, J. A., 2010: «Estudios Geofísicos en Yacimientos Arqueológicos Andaluces. Período 1985-2010», *Primer Congreso de Prehistoria de Andalucía* (<http://www.memorialsiret.es/doc/SIA-Pena-Geofisica.pdf>).
- PÉREZ GRACIA, V., CANAS, J. A., PUJADES, L. G., CLAPÉS, J., CASELLES, O., GARCÍA, F. y OSORIO R., 2000: «GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain)», *Journal of Applied Geophysics*, 43, 167-174.
- PREVOSTI, M., STRUTT, K. y CARRERAS, C. 2010: «The *ager tarraconensis* project (right side of river Francoli) (PAT): the application of geophysical survey to identify rural Roman settlement typologies», en C. CORSI y F. VERMEULEN (eds.), *Changing landscapes. The impact of Roman towns in the Western Mediterranean*, (Castelo da Vide-Marvão, 2008), Bologna, 205-216.
- SAMBUELLI, L., SOCCO, L. V. y BRECCIAROLI, L., 1999: «Acquisition and processing of electric, magnetic and GPR data on a Roman site, (Victimulae, Salussola, Biella)», *Journal of Applied Geophysics*, 41, 189-204.
- SIMMS, J. E. y ALBERTSON, P. E., 2000: «Multidisciplinary Investigation to Locate the Kentucky Shipwreck», *Geoarchaeology*, 15(5), 441-468.
- UDÍAS, A. y MEZCUA, J., 1986: *Fundamentos de Geofísica*, Madrid.
- VAUGHAN, C. J., 1986: «Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations», *Geophysics*, 51(3), 595-604.
- WEYMOUTH, J. W., 1986: «Archaeological site surveying program at the University of Nebraska», *Geophysics*, 51(3), 538-552.
- WITTEN, A., 2006: *Handbook of Geophysics and Archaeology*, London.