

ESTUDIO GEOFÍSICO EN BEGASTRI. RESULTADOS PRELIMINARES

M. CARMEN HERNÁNDEZ LUCENDO

Departamento de Física de la Tierra I. Facultad de CC. Físicas. UCM.

RESUMEN

Los métodos geofísicos de prospección constituyen una herramienta para la exploración del subsuelo. Su aplicación en los estudios de yacimientos arqueológicos resultan de gran utilidad por ser técnicas rápidas y no destructivas. Se presentan aquí los resultados, aún preliminares, de los estudios magnético y eléctrico realizados en Begastri con el fin de obtener un mayor conocimiento de la zona no excavada y ayudar en el planteamiento de futuras excavaciones.

ABSTRACT

Geophysical methods are now well-established as tool for subsoil exploration. They can be very useful to an archaeologist because are rapid, non-destructive, and do not disturb the exploration site. A geophysical survey is carrying out at Begastri's archaeological site to help in establishing efficient excavation plans. Three methods are used: magnetic, electrical resistivity and ground-penetrating radar. Preliminary results are shown.

INTRODUCCIÓN

La Prospección Geofísica se suele definir como un conjunto de técnicas físico-matemáticas encaminadas al conocimiento del subsuelo utilizando observaciones de magnitudes físicas realizadas, en general, en la superficie del terreno.

El objetivo fundamental del método geofísico es la localización de estructuras relacionadas con recursos naturales como minería, petróleo, agua subterránea, gas, etc pero, en el último cuarto del siglo XX se han generalizado las aplicaciones a estudios a poca profundidad relacionados con la ingeniería civil, el medio ambiente y *la arqueología*, con la *ventaja* de ser técnicas rápidas, económicas, fiables y *no destructivas*. La aportación fundamental a los estudios arqueológicos está orientada a la localización de estructuras de interés arqueológico en planta y en profundidad, pudiéndose posteriormente dirigir los esfuerzos de la excavación a las zonas más fértiles y descartando las regiones estériles (Hernández, 1992).

Esta rama de la Física se ocupa de la localización y estudio de los cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas (resistividad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad, permeabilidad eléctrica, etc.) con las del medio circundante. *Sólo en los casos en que exista esta diferencia en alguna propiedad física, y que se manifieste en una magnitud observable, será aplicable el método geofísico capaz de detectarla*. Si el contraste se presenta en más de una propiedad será posible combinar la aplicación de varios métodos, siendo los más utilizados en estudios arqueológicos los eléctricos en corriente continua y por campos variables, magnético y geo-radar (Telford *et al.* 1990).

A continuación se presenta un resumen de estos métodos mostrando sus posibilidades y limitaciones y los resultados preliminares del estudio realizado en Begastri.

1. ZONA DE ESTUDIO: CARACTERÍSTICAS Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Prospectar en el yacimiento de Begastri fue el resultado de una colaboración durante años con el equipo excavador, con algunos de cuyos miembros ya habíamos trabajado anteriormente¹. Se nos pidió ayuda en un momento ya avanzado de la excavación y porque en la mitad occidental del cabezo, la configuración del terreno presentaba algunas características bastante distintas de la mitad oriental.

La mitad oriental ofrecía un urbanismo típico de las ciudades medievales situadas en cabezos elípticos [Viana (NA), La Guardia (VI), Briones (LR). Orvieto (Italia), etc.]. Pero en la mitad física del cabezo la roca natural de ofitas afloraba a la superficie y no se veía muy bien si las calles iban a continuar hasta el otro extremo del cerro y era importante tener alguna referencia para entender el conjunto y dirigir la investigación arqueológica.

Por otra parte en el extremo occidental de la acrópolis se veía el final de la cara norte de la muralla y parecía no haber habido nunca muralla que cerrara por completo la elipse del cerro. Ellos nos permitía preguntarnos si no habría existido en aquel lugar un cambio total de urbanismo por ejemplo suponiendo que podría haber existido allí un edificio ya antiguo ya nuevo que pudiera haber hecho las veces del punto central de la fortificación, a modo de un castillo o algo parecido.

Resultaba de gran interés para plantear y llevar a cabo el trabajo algún punto de referencia que muy probablemente podía obtenerse con métodos de teledetección.

El problema que se nos presenta es complicado debido a la gran cantidad de muros, compuestos de piedras de areniscas, calizas, etc, que se habían encontrado sobre las ofitas (que presentan una alta susceptibilidad magnética), a las numerosas acumulaciones de estas piedras y a la topografía de la zona, que presenta zonas llanas y bruscas pendientes.

¹ Por ejemplo, «A magnetic survey over La Maja, an archaeological site in northern Spain», en *Archaeometry* 37, 1 (1995).

La zona de estudio se presenta en el plano de la figura 1.

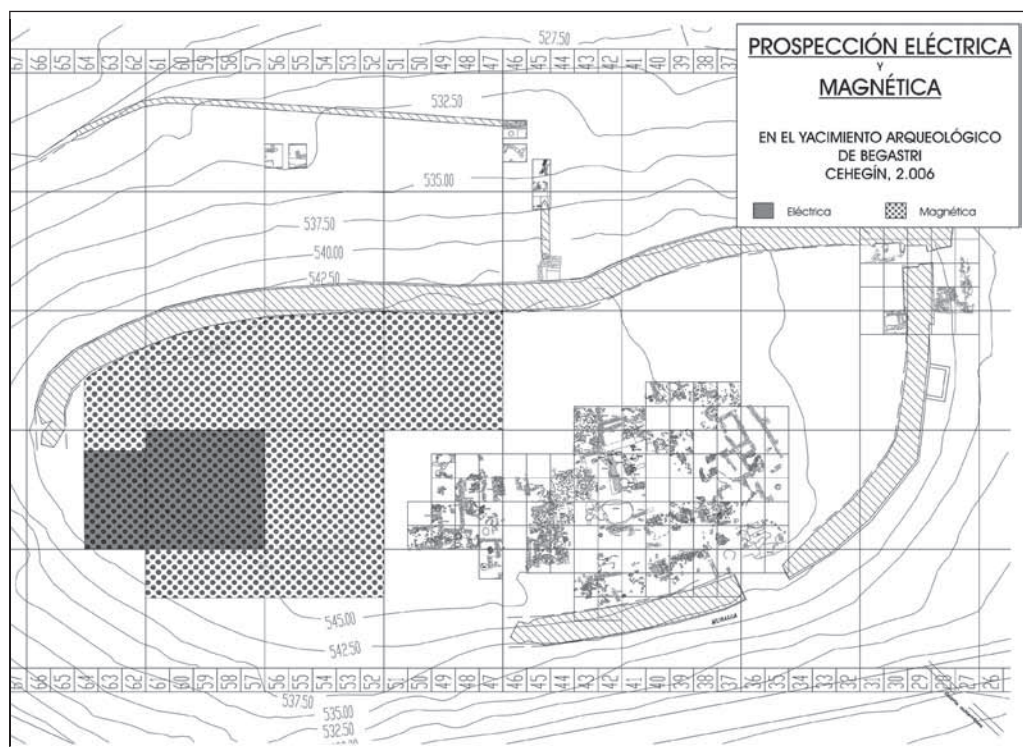


FIGURA 1. Zona de estudio; El área grande ha sido estudiada con el método magnético y la pequeña, incluida en la mayor, mediante calicatero eléctrico.

El objetivo que buscamos es encontrar alineaciones de anomalías que puedan tener sentido arqueológico.

A continuación se presentan los métodos empleados.

2. MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPLEADOS

2.1. Método magnético

La Tierra posee un campo magnético natural, cuya intensidad en latitudes medias es del orden de 45000 nanoteslas (45000nT , $1\text{nT}=10^{-9}$ Teslas). *Este campo se ve modificado localmente por la presencia de cuerpos con diferente susceptibilidad y remanencia magnética que el medio que los rodea.* Los cambios en magnetización son muy marcados cuando son provocados por hornos, debido a los procesos físicos y químicos que tienen lugar en las fases de calentamiento y enfriamiento, y pueden llegar a serlo debido también

a la presencia de materia orgánica. Los diferentes materiales utilizados en la construcción de asentamientos presentan también estos contrastes. Dicho de otro modo: la aparición de anomalías magnéticas, máximos y mínimos de intensidad del campo geomagnético, debe asociarse a la presencia de estos contrastes de magnetización. Al ser las estructuras arqueológicas de pequeño tamaño provocarán anomalías débiles pero este problema se atenúa por encontrarse a poca profundidad.

Una característica del campo geomagnético es su variación temporal no despreciable a lo largo del día, haciéndose necesaria una corrección de las medidas para reducir las a un instante común y así los cambios en las lecturas se deberán entonces sólo al efecto del subsuelo. Existen varios métodos para realizar esta corrección, como son la utilización de una estación base (fija) con registro continuo o el uso de gradiómetros. Estos son aparatos con dos sensores, situados en la misma vertical por medio de un báculo, que leen casi simultáneamente. La diferencia de lecturas no está afectada por la variación temporal.

Los aparatos de medida de la intensidad de campo magnético, magnetómetros, son de empleo rápido y sencillo, y tienen la ventaja de dar la lectura directamente en nanoteslas. El magnetómetro de protones que se ha usado en el estudio que nos ocupa, SCINTREX MP-3, presenta una alta sensibilidad (mayor de 1nT), necesaria para la correcta definición de las anomalías.

Debido a la pequeña intensidad del campo geomagnético (más pequeño que la de uno de esos imanes con los que jugábamos cuando éramos niños o que esos que se usan para sujetar notas en la nevera) y a la sensibilidad del magnetómetro, las medidas no deben estar localizadas cerca de objetos que contengan materiales magnéticos (vallas, etc). Especialmente, el operador del instrumento no deberá portar objetos que puedan perturbar las lecturas (reloj, llaves, hebillas, etc.).

La presencia de pequeños trozos de escoria podría generar anomalías de muy pequeña extensión espacial que sería posible eliminar mediante el tratamiento posterior de los datos. También se puede eliminar mediante este tratamiento posterior el efecto «regional» de la topografía del subsuelo.

La metodología del trabajo de campo consiste en dividir el terreno en cuadrículas de, por ejemplo, 30 m x 30 m, trazar perfiles cada metro y realizar en ellos observaciones cada metro. Estos datos, una vez corregidos por la variación temporal y filtrados convenientemente, son representados gráficamente e interpretados.

En este caso las mallas han sido de 20 m x 20 m. La presencia de ofitas, de alta susceptibilidad magnética, puede dificultar la interpretación de los datos. Se optó por utilizar el método magnético porque la presencia de muros, o la ausencia de ofitas, si presentaba alineaciones claras no podría confundirse con el efecto del relieve de ofitas, que debe ser menos regular.

Los datos de campo total han sido corregidos para eliminar la variación temporal utilizando los datos del Observatorio de El Ebro. En la figura 2 se muestra esta variación para los días 24 y 25 de septiembre de 2005. La línea horizontal a la altura de 44750nT indica el periodo de lectura en campo.

El mapa de anomalías magnéticas (en nanoteslas y ya eliminada la variación temporal) referidas al campo medio en la zona se presenta en la figura 3.

Se pueden observar algunos alineamientos que se presentan en la figura 4. Para mayor facilidad para la comparación, se muestran una a continuación de la otra.

El sentido arqueológico, si lo tiene, se discutirá con el equipo de arqueólogos.

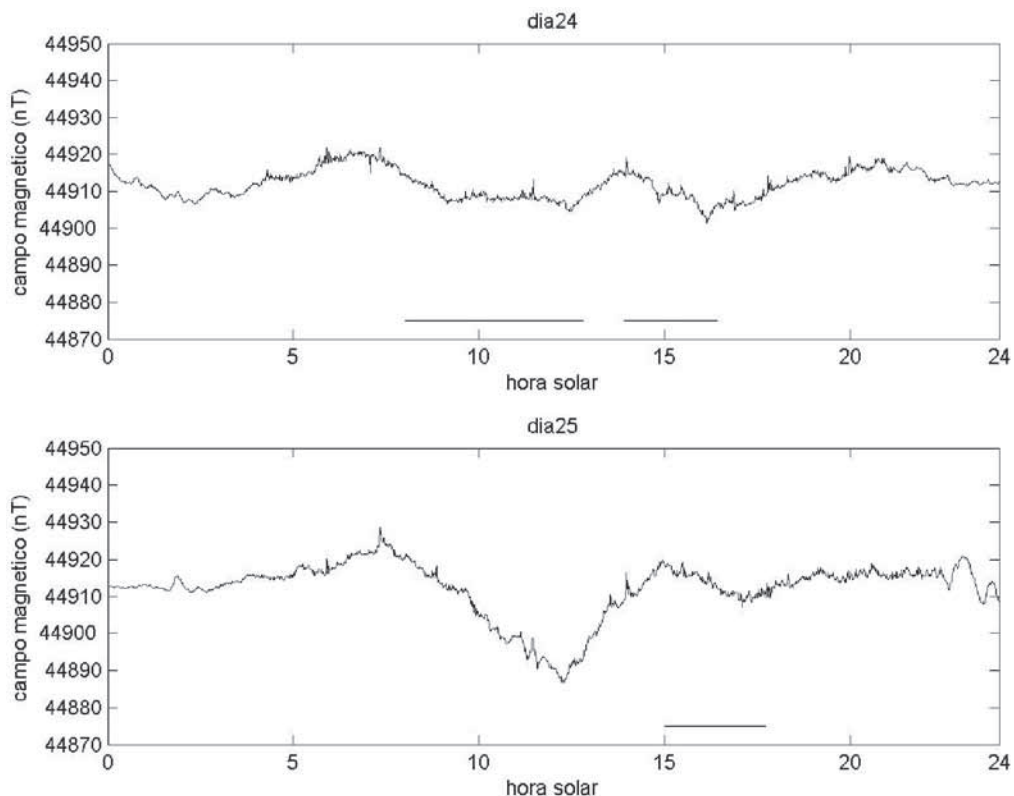


FIGURA 2. Variación diurna en el Observatorio de El Ebro (24 y 25 de septiembre de 2005).

2.2. Geo-radar

La técnica del geo-radar se basa en la emisión, y posterior recepción de las reflexiones generadas en las discontinuidades, de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-10 nanosegundos, 1nanosegundo = 10^{-9} segundos) en la banda de frecuencias de VHF-UHF (habitualmente centrados entre 60MHz y 2,5GHz, 1MHz = 10^6 Hz, 1GHz = 10^9 Hz). Cuando mediante una antena emisora se generan dichos impulsos, éstos, en su trayectoria a través del subsuelo pueden encontrarse con un cambio de sustrato o algún tipo de objeto enterrado sucediendo que parte de la energía se refleja mientras el resto sigue su camino. Disponiendo de una antena receptora en la superficie del terreno es posible detectar estas reflexiones, y con ellas generar una serie de registros espacio-tiempo (a mayor tiempo transcurrido mayor será la profundidad a que se encuentra el reflector). Al ir desplazando las antenas sobre la superficie se van registrando el conjunto de reflexiones producidas, con lo que se obtiene una imagen bidimensional de la historia de reflexiones bajo la línea de desplazamiento de la antena. *La resolución de este método es muy alta pero la penetración, sin embargo, está limitada por la atenuación de la señal y ésta depende fundamentalmente del material que conforme el suelo y de su contenido en agua.*

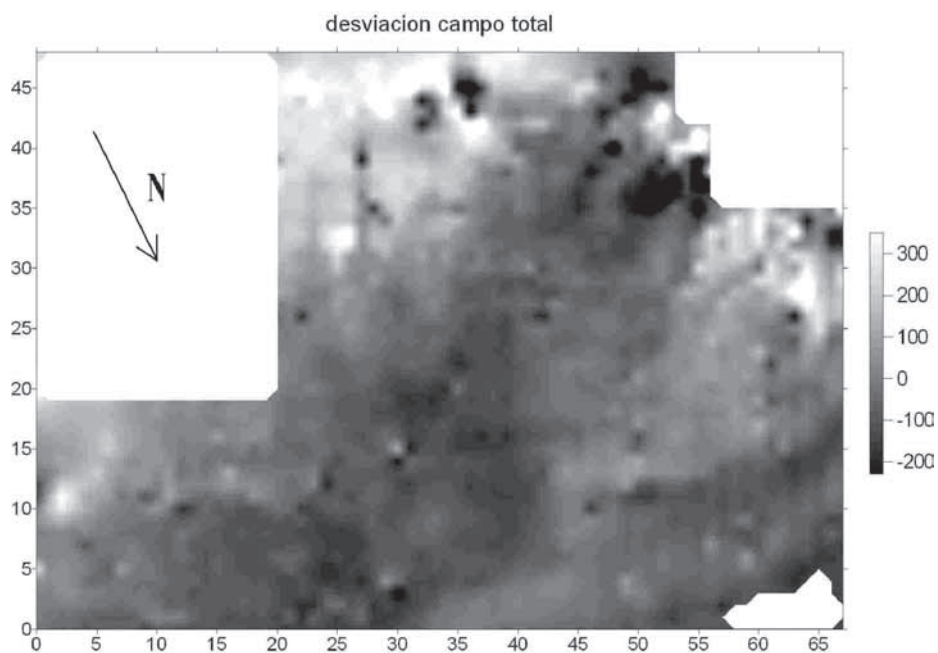


FIGURA 3. Mapa de anomalías magnéticas referidas al campo medio en la zona.

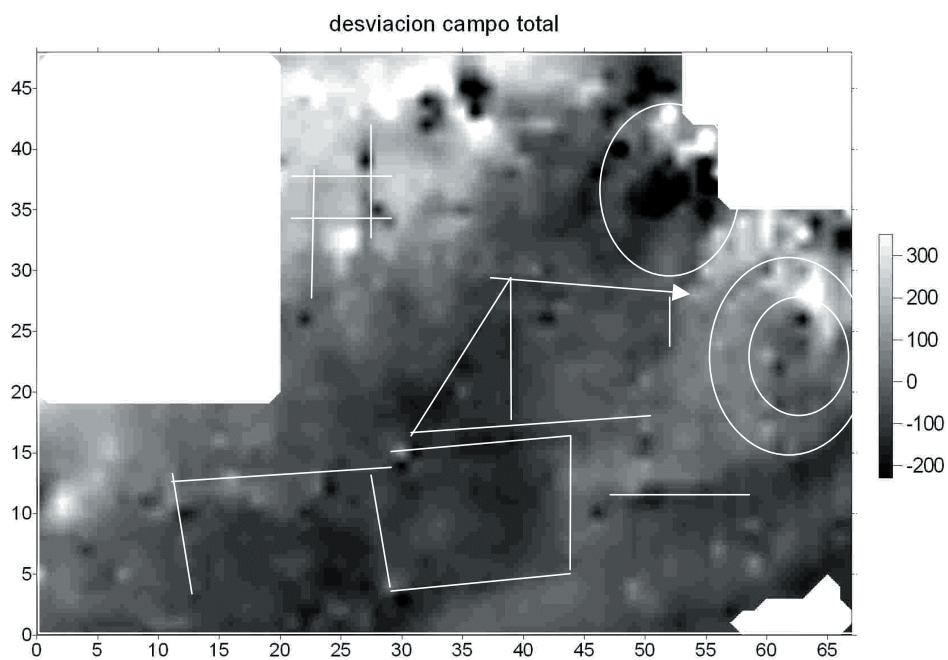


FIGURA 4. Algunas de las alineaciones observadas.

Las antenas más utilizadas en estudios arqueológicos son las de 900 y 500MHz y en Begastri se utilizó la de 900MHz del sistema Zond12 de Radar Systems, Inc.

La metodología del trabajo de campo es similar a la seguida en el método magnético: se divide el terreno en mallas y se realizan perfiles continuos, separados 1m, en cada malla.

Cada perfil es filtrado y representado para su interpretación.

Tanto el trabajo de campo como la interpretación son más sencillos si el terreno es plano, sin piedras que hagan saltar y oscilar la antena en su desplazamiento. La situación en Begastri no es la más favorable, tanto por la topografía como por las piedras existentes en la superficie. Por esta razón sólo se efectuaron algunos perfiles como el que se muestra en la figura 5. En esta figura el eje horizontal representa las distancia recorrida a lo largo del perfil, 9 metros, y el eje vertical el tiempo de recorrido de la señal desde que es emitida, se refleja en el obstáculo y vuelve a la superficie para ser registrada (está ligada con la profundidad a través de la velocidad) Puede observarse, a una profundidad de 17ns y la posición 5.2m, el ápice de una hipérbola que debe corresponder al efecto de un muro.

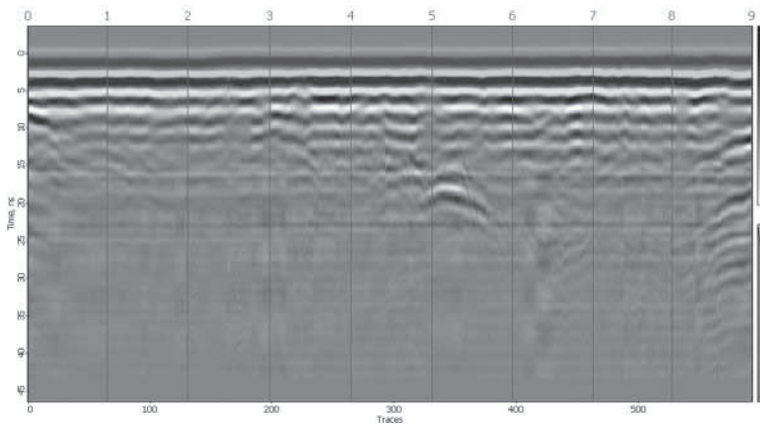


FIGURA 5. Ejemplo de perfil de geo-radar obtenido.

2.3. Método de calicateo eléctrico

El método eléctrico en corriente continua pretende detectar *cambios en la resistividad eléctrica*. Si los cambios se producen en la vertical (contactos verticales o subverticales) se utiliza la modalidad de calicateo; si las superficies de discontinuidad son horizontales (modelo de estratificación horizontal) se utiliza el sondeo eléctrico.

Para el estudio eléctrico, para detectar la presencia de muros, se ha utilizado la modalidad de calicateo con el dispositivo Wenner (figura 6). Este está formado por dos circuitos eléctricos independientes, uno de emisión (formado por batería, amperímetro GEOTRON, dos electrodos A y B y cables de conexión) y otro de recepción (constituido por voltímetro GEOTRON, dos electrodos M y N y cables de conexión). Los electrodos AMNB *se clavan en el suelo* (deben hacer buen contacto, por lo que la presencia de piedras es desaconsejable), a lo largo de un perfil y por este orden, con una separación, *a*, entre ellos. Se efectúa una medida y se desplaza todo el

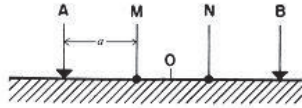


FIGURA 6. Esquema del dispositivo Wenner.

dispositivo un metro a lo largo del perfil para realizar la siguiente medida. Se cubre así todo el perfil elegido y después se realizan, del mismo modo, los perfiles paralelos hasta cubrir la malla. La distancia a depende de la profundidad a que se encuentren las estructuras. La detección de éstas es más segura si la profundidad es más pequeña.

Por el circuito de emisión se hace pasar una intensidad I que se mide en el amperímetro. La diferencia de potencial ΔV que se mide en el circuito de recepción depende de las resistividades eléctricas presentes en el subsuelo y de las distancias entre los electrodos y corresponde a la respuesta del terreno cuando se le excita haciendo circular la corriente I .

Con los valores observados se puede calcular la resistividad aparente (en $\Omega\text{-m}$), en función de la posición del dispositivo a lo largo del perfil. Esta es la magnitud que sirve de base a la interpretación. Viene definida por:

$$\rho_a = 2\pi a * \frac{\Delta V}{I}$$

Los valores de resistividad aparente se representan gráficamente en función de la distancia del centro del dispositivo al origen del perfil. También se puede realizar una representación conjunta de todos los perfiles de malla y obtener una superficie de resistividades aparentes.

A continuación se presenta (figura 7) el mapa obtenido, con $a=1\text{m}$, realizando los perfiles en la dirección SSO-NNE.

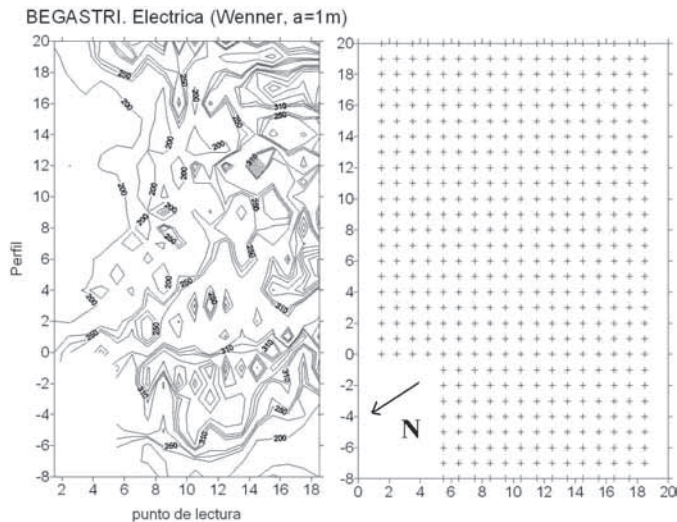


FIGURA 7. Mapa obtenido mediante el estudio eléctrico. En el último se muestran los puntos de medida.

Pueden observarse la correspondencia con la elipse obtenida en el estudio geomagnético en la zona más occidental.

3. CONCLUSIONES

Se han utilizado tres métodos geofísicos en Begastrí. El método magnético ha permitido localizar zonas con alineamientos que pueden ser de interés arqueológico y que están pendientes de valoración. El geo-radar se ha mostrado capaz de registrar el efecto de los muros, aunque la cantidad de piedras sueltas y la topografía de la zona lo haga recomendable para salvar ambigüedades en estudios puntuales. El método de calicateo eléctrico se ha utilizado en la zona con menos topografía. Se ha observado una alineación que coincide con la elipse obtenida por el método magnético en la región más occidental.

Esperamos que este estudio, con los resultados de la excavación en alguna de las zonas, ayude a la valoración total del yacimiento.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Dr. Antonino González Blanco, con quién ha sido un placer trabajar, y aprender, siempre. A todo el equipo excavador por la colaboración y ayuda prestada en todo momento. A los alumnos de CC. Físicas de la UCM, D. Rubén Ruiz, D. Ángel Tijera y D. Javier González que colaboraron en el trabajo de campo. A la Fundación Séneca que ha financiado este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- HERNÁNDEZ, M.C. (1992), «La Prospección Geofísica», *Jornadas sobre Teledetección y Geofísica aplicadas a la Arqueología*, Madrid, Ministerio de Cultura.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. (1990), *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.