

MUNIBE (Antropología y Arqueología)	Suplemento N.º6	17-24	SAN SEBASTIAN	1988	ISSN 0027 - 3414
-------------------------------------	-----------------	-------	---------------	------	------------------

# Détection et exploration de gisements archéologiques par des techniques de prospection électrique et magnétique: Intérêts et limites. Un exemple d'application en Pays Basque.

A. KERMORVANT \*  
 F. PRAT \*\*  
 S. ROMERO \*\*  
 B. MARTINEZ \*\*\*  
 L. VALDES \*\*\*\*

**MOTS-CLES:** Archeologie, Geophysique, Electricite, Magnetisme.

## RESUME

Parmi les méthodes d'exploration du sous-sol qui ont pu être mises au point pour répondre aux nouvelles exigences de la recherche archéologique, la détection géophysique offre un très large domaine d'application à l'étude prévisionnelle, aussi bien intensive qu'extensive, de gisements enfouis.

Dans leurs développements les plus récents, les techniques et méthodes de prospection, basées sur la mesure de résistivité électrique apparente d'un sous-sol ou magnétisme de celui-ci sont particulièrement efficaces sur des sites de natures très diverses allant de la préhistoire aux époques les plus récentes.

L'expérience acquise aux niveaux de la méthodologie d'application de ces techniques, du traitement et de l'analyse des données géophysiques, est parfaitement bien démontrée par l'activité permanente qu'exercent, notamment, quelques Laboratoires européens.

## RESUMEN

De los métodos de exploración del subsuelo puestos en marcha para responder a las nuevas exigencias de la investigación arqueológica, la detección geofísica ofrece un amplio campo de aplicación para el estudio preventivo, tanto intensivo como extensivo, de yacimientos enterrados.

En sus más recientes desarrollos, las técnicas y métodos de prospección, basados en la medida de resistividad eléctrica aparente de un subsuelo o de su magnetismo, son particularmente eficaces en emplazamientos de diversas naturalezas, desde la prehistoria hasta las épocas más recientes.

La experiencia adquirida en la metodología de aplicación de estas técnicas, en el tratamiento y el análisis de los datos geofísicos está perfectamente demostrado por la constante actividad de ciertos Laboratorios europeos.

A partir de la surface d'un terrain et dans certaines conditions, le contenu archéologique de la terre peut être révélé par la mesure du champ magnétique terrestre ou de la résistivité électrique apparente du sous-sol.

Dès 1946, en Angleterre, R.J.C. ATKINSON tente de repérer des fosses préhistoriques en utilisant une méthode de détection sur la mesure des propriétés électriques du proche sous-sol.

L'année suivante, au Mexique, H. DE TERRA expérimente un principe de mesure de la conductibilité électrique des sols sur un site où sera découvert l'homme de TEPEXAN.

Ce n'est véritablement qu'à partir du début des années 60 que les applications de la détection géophysique à l'archéologie vont se multiplier et qu'en Europe des Laboratoires et Instituts tels que la «Fondation Lerici» (Rome), le «Research Laboratory of Archaeology» (Oxford), le «Reinisches Landesmuseum» (Bonn) et le «Centre de Recherche Géophysique de Garchy» (France) vont consacrer tout ou partie de leurs activités au développement de techniques et méthodes spécifiques.

Aujourd'hui celles-ci sont parfaitement opérationnelles et bien adaptées aux problématiques de l'exploration archéologique: leur efficacité n'est plus à démontrer.

«L'outil» géophysique, élément dynamique et cohérent de la prospection géophysique peut être défini comme un instrument scientifique de découvrir

\* Université de Tours. Laboratoire des Civilisations de l'Antiquité  
 37041 Tours Cédex. FRANCE

\*\* Escuela Universitaria Politécnica de la Rabida  
 Palos de la Frontera - Huelva. ESPAÑA

\*\*\* Universidad de Cantabria.  
 Facultad de Ciencias. Departamento de Geología.  
 39005 - Santander. ESPAÑA

\*\*\*\* Museo Arqueológico, Etnográfico e Histórico Vasco  
 Bilbao. ESPAÑA

te, d'approche et d'étude non destructrice des sites.

En général, les formations archéologiques enfouies possèdent des propriétés physiques distinctes du milieu dans lequel elles se trouvent. Le principe de leur détection, par les méthodes géophysiques, est basé sur la recherche de différences ou écarts à une distribution normale des propriétés physiques du milieu naturel contenant.

Les techniques de mesures de ces grandeurs physiques, à l'origine pratiquement toutes développées pour les besoins de la recherche pétrolière et minière, se répartissent en deux principes:

- actifs, en introduisant dans le sol une perturbation et en mesurant l'effet produit (prospection électrique, sismique, électromagnétique...),
- passifs, par le fait de capter un champ existant (prospection magnétique, gravimétrique...).

Les méthodes magnétiques et électriques sont les plus couramment utilisées. Les renseignements qu'elles fournissent, sans être tout à fait équivalents du point de vue structural, sont parfaitement complémentaires et leurs spécificités permettent de couvrir un très large domaine d'application.

1. Les méthodes de *prospection électrique* sont basées sur la mesure de l'aptitude qu'offrent les structures du sous-sol à être traversées par un courant électrique injecté depuis la surface ou le plan du volume à étudier.

On peut ainsi obtenir la résistivité électrique apparente du sous-sol (soit l'inverse de la conductibilité) qui s'exprime en ohms/mètre. Celle-ci varie en fonction de la composition physico-chimique des matériaux traversés par le flux électrique et du degré d'humidité du milieu exploré.

Les mesures s'effectuent à l'aide d'un résistivimètre relié à un dispositif d'électrodes en contact avec le sol. En général, quatre électrodes constituent l'émetteur et le récepteur, deux de celles-ci sont destinées à l'injection du signal électrique, les deux autres utilisées pour la mesure de la différence de potentiel électrique résultante. L'appareil indique la résistivité en effectuant le rapport potentiel reçu / courant émis.

La configuration du dispositif d'électrodes conditionne le pouvoir de détection, diverses combinaisons et dispositions des électrodes permettent d'effectuer une analyse, soit dans le plan horizontal (parallèlement au sol) à profondeur constante, soit selon la direction verticale à profondeur variable. Dans le cas d'une détection selon le plan horizontal, les mesures sont le plus fréquemment réalisées en plantant dans le sol, de quelques centimètres, quatre électrodes fixées linéairement à un support déplacé point par point. Suivant le type de sol, le

temps nécessaire pour la saisie d'une mesure est compris entre deux et cinq secondes. Les structures archéologiques provoquent, généralement, des variations notables, voire très importantes, de la résistivité.

Le grand intérêt des techniques de prospection électrique est particulièrement lié au principe actif sur lequel elles sont fondées, les différentes manières d'introduire le signal électrique dans le sol et celles d'en mesurer l'effet produit autorisent des applications particulièrement spécifiques, aussi bien pour les périodes pré-protolithiques qu'historiques.

Le degré d'imbibition d'un sol, en eau, rend la mesure de la résistivité plus ou moins réalisable et significative. Cette méthode n'est donc pas efficace sous toutes les latitudes et à tout moment. En phase humide, les meilleurs résultats peuvent être obtenus; en zone désertique, elle est inopérante.

2. Dans le milieu des années 50, le développement des appareils de mesure du champ magnétique terrestre, basé sur le principe de la résonance magnétique nucléaire, permettra à M.J. AITKEN de réaliser, en Angleterre, les premières expérimentations de la *prospection magnétique* à l'archéologie.

Cette technique d'exploration est basée sur la détection, à peu de distance au-dessus du sol, de variations ou anomalies du champ magnétique terrestre provoquées par l'aimantation induite ou permanente des matériaux constituant les structures archéologiques enfouies.

La méthode la plus couramment utilisée consiste à mesurer un signal électrique ou fréquence de précession, engendré dans le champ terrestre par la précession libre des spins (moment magnétique nucléaire) des protons contenus dans une substance hydrogénée (eau, benzène, kérosène...). Cette fréquence est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique terrestre total qui, généralement, est mesuré avec des magnétomètres à protons ayant une sensibilité de  $\pm 1$  gamma, voire  $\pm 1/10e$  de gamma. Le champ est capté près de la surface du sol (0,30 m dans la plupart des applications) par une sonde contenant la substance hydrogénée (au pays-basque espagnol, dans la région de Guernica, l'intensité du champ terrestre est de l'ordre de 45 200 gammas).

Le champ magnétique terrestre observé en un lieu et à un instant, résulte du champ principal de la terre, de l'effet des structures du sous-sol, de champs de perturbations (proximité de lignes électriques, constructions...) et de la variation diurne (influence solaire).

L'amplitude de ce phénomène journalier est pratiquement toujours supérieure à l'amplitude moyenne d'une anomalie ayant une origine archéologique,

Cet effet doit, impérativement, être discriminé de la mesure du champ magnétique saisie dans l'espace exploré; le champ résiduel significatif peut être obtenu en réalisant des relevés magnétiques différentiels: intensité en un point de la prospection moins l'intensité à une station fixe de référence. Selon le type de matériel mis en oeuvre et pour des magnétomètres à protons, le temps de mesure est compris entre trois et six secondes.

Le diamagnétisme ou le paramagnétisme des vestiges archéologiques peuvent perturber le champ terrestre de quelques gammas à, exceptionnellement, plusieurs centaines; l'anomalie magnétique révélatrice dépasse rarement la vingtaine de gammas.

Par rapport aux méthodes électriques, ce type d'exploration passif offre quelques intérêts majeurs. Au niveau technique, les performances des magnétomètres et des équipements électroniques périphériques permettent de travailler dans des conditions tout à fait commodes. Des applications sont possibles là où la prospection électrique est toujours ou temporairement inefficace: en zone désertique, sur des sites où le bilan hydrique est provisoirement défavorable...

Certaines formations archéologiques sont identifiables par une signature magnétique typique, il est ainsi possible de différencier la pierre et la brique cuite, de reconnaître des fours, foyers, puits, dépotoirs, etc...

Les limitations à l'application d'une prospection magnétique sont principalement liées aux champs de perturbations qui interfèrent en permanence sur le champ terrestre et dont les effets sont indissociables. Par exemple, en milieu urbain et industriel, la technique est pratiquement toujours inopérante, à proximité plus ou moins immédiate de constructions, lignes électriques, clôtures..., la mesure magnétique peut être localement perturbée. Le fil de fer des rangs de vignes ou de certaines cultures fruitières interdit toute application.

C'est aussi au niveau de l'analyse des résultats que la magnétométrie se distingue des méthodes électriques, dans bien des cas l'interprétation est plus délicate à établir.

**3.** En fonction de la problématique abordée par une opération prospective, la *mesure géophysique* peut être réalisée de différentes manières:

- exploration d'approche par bandes plus ou moins longues et étroites, application à la recherche de tracés (voies, fortifications...), de limites de sites, reconnaissances préliminaires ou complémentaires rapides, etc... La fréquence des relevés géophysiques est alors adaptée à la précision souhaitée pour le type de renseignements recherchés.

- exploration systématique à l'intérieur d'un site ou d'une partie pour en étudier la composition, la nature, l'urbanisme, l'extension, etc... Dans ce cas, et pour un type précis d'investigation, la distribution des mesures est régulière sur toute la surface étudiée. Pour des raisons pratiques de mise en oeuvre sur le terrain et de commodité lors du traitement informatique, celles-ci sont le plus couramment réalisées aux noeuds d'un réseau, à mailles carrées, matérialisé au sol par des fils de fibres synthétiques.

Généralement, un pas de réseau de mesure de 1 mètre est un bon compromis. Exceptionnellement, il peut être plus petit, 0,50m, ou plus grand, de 2 à 5 mètres au maximum. Avec un coefficient de proportionnalité égal à 1 (1 mesure/m), des milliers, des dizaines de milliers et même plus de la centaine de milliers de mesures peuvent être effectuées.

L'importance du travail de saisie des données justifie l'utilisation de techniques d'automatisation de la mesure géophysique et de son enregistrement.

Pour une exploration de détail (tous les m<sup>2</sup>), et dans des conditions favorables d'exécution (terrain dégagé et meuble), une surface de 5 à 7 ha peut être étudiée en 28 jours effectifs par deux opérateurs et 1 ou 2 ouvriers.

**4.** *L'exploitation des résultats* d'une prospection suppose une transformation de l'information numérique en expression graphique ou cartographique, le recours à l'informatique est pratiquement toujours nécessaire.

L'analyse numérique est plus ou moins complexe suivant le type de données à traiter, la nature, la composition du site étudié et la qualité de la mesure géophysique.

Il est parfois indispensable de filtrer un ensemble de données pour en extraire ou minimiser les effets d'un bruit, renforcer un contraste milieu-structures, trier l'information en fréquence et/ou en direction...

Une des méthodes de représentation cartographique, efficace et rapide, consiste à créer une image où la luminance de chaque point élémentaire varie, linéairement ou non, avec l'amplitude du signal géophysique (original ou traité) aux points correspondants; la technique de représentation en tons de gris est bien adaptée à l'oeil et à l'esprit.

Dans son contenu, l'image géophysique est souvent complexe et le commentaire rarement suffisant pour en extraire l'information archéologique. Pour interpréter l'image et établir un plan structural, il n'existe pas de méthodes et techniques automatiques et universelles: celles de la géophysique traditionnelle, basées sur la comparaison de l'anomalie détectée

à un modèle théorique calculé, ne sont qu'exceptionnellement applicables. L'automatisation de l'analyse de l'image supposerait une modélisation de l'anomalie géophysique d'origine archéologique. Or, chaque site ou structure antique est unique, tant par sa nature et ce qu'il en reste, que par le milieu dans lequel il ou elle se trouve.

En fait, l'interprétation est principalement basée sur la reconnaissance visuelle des formes révélées par l'image, la part de l'intervention humaine est donc importante et le dialogue archéologue-prospecteur fondamental.

Il est rare qu'une interprétation soit intégrale et définitive, elle évolue avec la fouille et les recherches complémentaires.

5. L'expérience montre que chacune de ces deux méthodes d'investigation géophysique est efficace dans des domaines bien précis: par exemple, reconnaissance d'un plan urbain et recherches verticales pour les méthodes électriques, détection de structures de cuisson ou de combustion (fours, foyers, briques, céramiques...) pour la prospection magnétique. En général, les méthodes électriques sont sensiblement plus performantes que la prospection magnétique et, dans les pays tempérés, elles sont plus largement employées.

Pour des gisements où le couvert végétal est naturel et permanent (prairies, bois...) ces méthodes restent l'unique recours efficace d'études prospectives; en milieu urbain, face à la menace archéologique consécutive à l'ouverture de chantiers de travaux publics ou privés, les techniques électriques peuvent être d'un très grand intérêt.

Intrinsèquement, l'avantage de l'application des techniques géophysiques est de pouvoir étudier, sans destruction, aussi bien intensivement (sur des aires de quelques m<sup>2</sup>) qu'extensivement (sur des surfaces de plusieurs hectares), des sites qui sont très souvent inaccessibles, dans leur ensemble, à l'étude par les moyens traditionnels de la fouille.

La somme de résultats objectifs acquise par une opération de prospection géophysique ne saurait être directement comparable aux données de la fouille. L'objectif scientifique est de parvenir à une préconnaissance en livrant à l'analyse archéologique la nature, le schéma structural et l'extension d'un site enfoui.

Enfin, la prospection géophysique appliquée à la recherche archéologique doit être considérée comme une discipline à part entière, parallèle à la fouille et non annexe.

6. Du 10 au 16 novembre 1986, à l'initiative du Laboratoire des Civilisations de l'Antiquité (Université de Tours, France) et soutenue par le Comité Organisateur du II<sup>e</sup> Congrès Mondial Basque, une équipe

Hispano-Française (1) a pu réaliser une prospection géophysique sur le site protohistorique de Marueleza, près de Nabarniz de Biskaia (2).

Au total, sur trois zones, une superficie de 6.875 m<sup>2</sup> a été explorée par la méthode des résistivités et en complément 1.860 m<sup>2</sup> ont été étudiés par prospection magnétique, soit sur l'ensemble la saisie et l'enregistrement de 9.877 mesures géophysiques.

Pour chacune des zones explorées, des informations essentielles ont pu être obtenues: mise en évidence d'un ensemble urbanisé, de l'extension de structures connues et d'espaces sans constructions.

Les résultats de ces travaux illustrent bien l'un des intérêts de la prospection électrique sur un site où le couvert végétal permanent s'oppose à l'application efficace des méthodes traditionnelles de prospection aérienne et de surface.

7. Depuis 1972, le Laboratoire des Civilisations de l'Antiquité de l'Université de Tours est intervenu sur 65 sites antiques en France et a dirigé ou participé à 25 missions d'archéologie prospective à l'étranger: Italie, Maroc, Espagne, Afghanistan, Yougoslavie, Mauritanie, Israël, Egypte, Portugal, Malte.

Le Laboratoire exerce aussi une activité dans les domaines technique et méthodologique: développement d'instrumentations électroniques, de systèmes de traitement et d'exploitation de l'information géophysique.

Les tous derniers travaux concernent l'étude et la réalisation d'un système de mesure de faibles résistivités adapté à l'exploration de gisements enfouis en milieux humides ou subaquatiques.

Une étroite collaboration est officiellement établie, depuis 1983, entre le Laboratoire et le Grupo d'Arqueofísica de la Escuela Universitaria Politécnica de La Rabida (Huelva). Plusieurs missions ont été réalisées, en commun, dans 7 pays d'Europe, d'Afrique et d'Asie.

(1) Equipe composée de Mesdemoiselles B. MARTINEZ et I. PUJANA, de Messieurs F. PRAT, S. ROMERO, L. VALDES et E. OTEO pour la partie espagnole et de A. KERMORVANT pour la partie française.

(2) Cette mission a été en partie financée par le Comité Organisateur du II<sup>e</sup> Congrès Mondial Basque, le Laboratoire des Civilisations de l'Antiquité et par le programme d'étude du site de Marueleza.

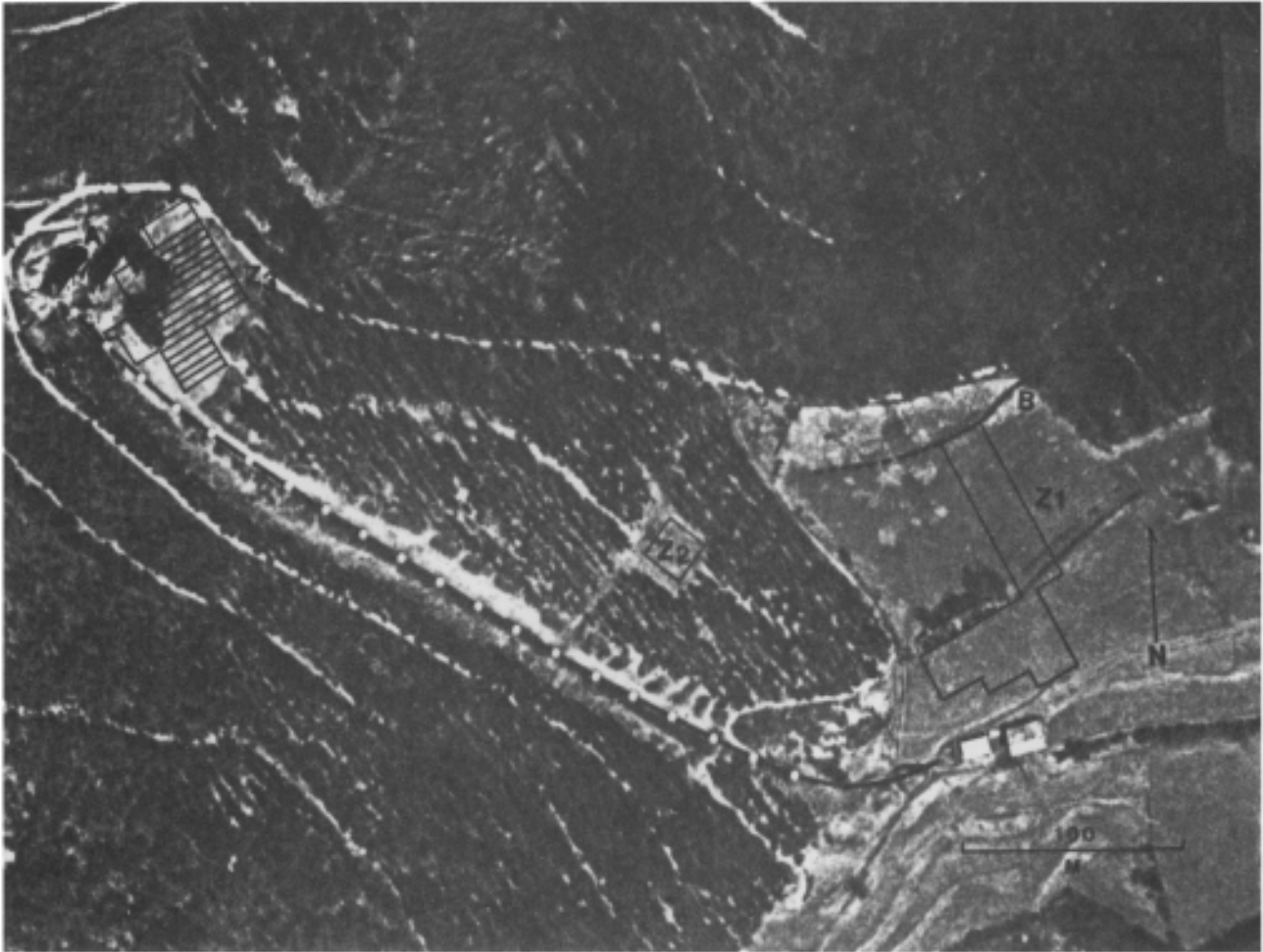


Figura 1.

**8. Marueza: resultados de la explotación geofísica.** El Castro de Marueza se sitúa en uno de los extremos de la crestería de Gastiburu, a 525 m. sobre el nivel del mar. Ocupa un espacio de 6 a 8 Ha., rodeado de una potente fortificación.

La noticia más antigua que se tiene sobre el castro se remonta a 1.336, en la Carta Puebla, otorgada a Gernika, en la que se contempla las Cabas de Gastiburu, como uno de los límites de las tierras de la villa.

La investigación científica sobre este asentamiento se inició por encargo de la Excm. Diputación de Vizcaya, en 1940, a cargo de D.B. TARACENA y D.A. FERNANDEZ AVILES, tomando para ello como referencia inicial la mención hecha en 1366 de la existencia de fortificaciones, en 1942 se inicia un hiato temporal hasta 1981 en que se reanudaron los trabajos de excavación, subvencionados por el Museo Arqueológico, Etnográfico e Histórico de Bilbao.

La norma constructiva en el castro se halla dentro del estilo céltico del «muro gálico». Los trabajos de excavación arqueológica, han puesto de manifiesto estructuras constructivas defensivas y civiles. Dos puertas, una del tipo de las de «esviaje», sobre

la ría (NNO), abren el recinto de habitación al exterior. La puerta (NNO) está defendida por dos líneas amuralladas entre las que discurre el camino de acceso al interior. Las fortificaciones en este punto, debieron tener una altura aproximada de 6 m., levantados sobre una base de 7,5 m. de ancho. Las construcciones civiles, apenas iniciada su investigación, evidencian espacios rectangulares de 5 m. de ancho sobre un largo de 12 m. aproximadamente...

La prospección geofísica se organizó sobre tres zonas y una superficie total de 6.875 m<sup>2</sup>., en la que se utilizó el método eléctrico de resistividad aparente. La distribución es la que aparece en las imágenes que presentaremos a continuación (Fig. 1). Así mismo de manera complementaria se prospectaron 1.860 m<sup>2</sup>. en metodología magnética (imagen rallada en Z3. Fig. 1).

El conjunto de medidas geofísicas sobre la superficie explorada, representa un total de 9.877. Para su identificación vamos a notar a las zonas por, Z1, Z2 y Z3 respectivamente (Fig.1).

*Para la zona Z1.* La primera imagen que presentamos (Fig. 2) responde a la representación gráfica

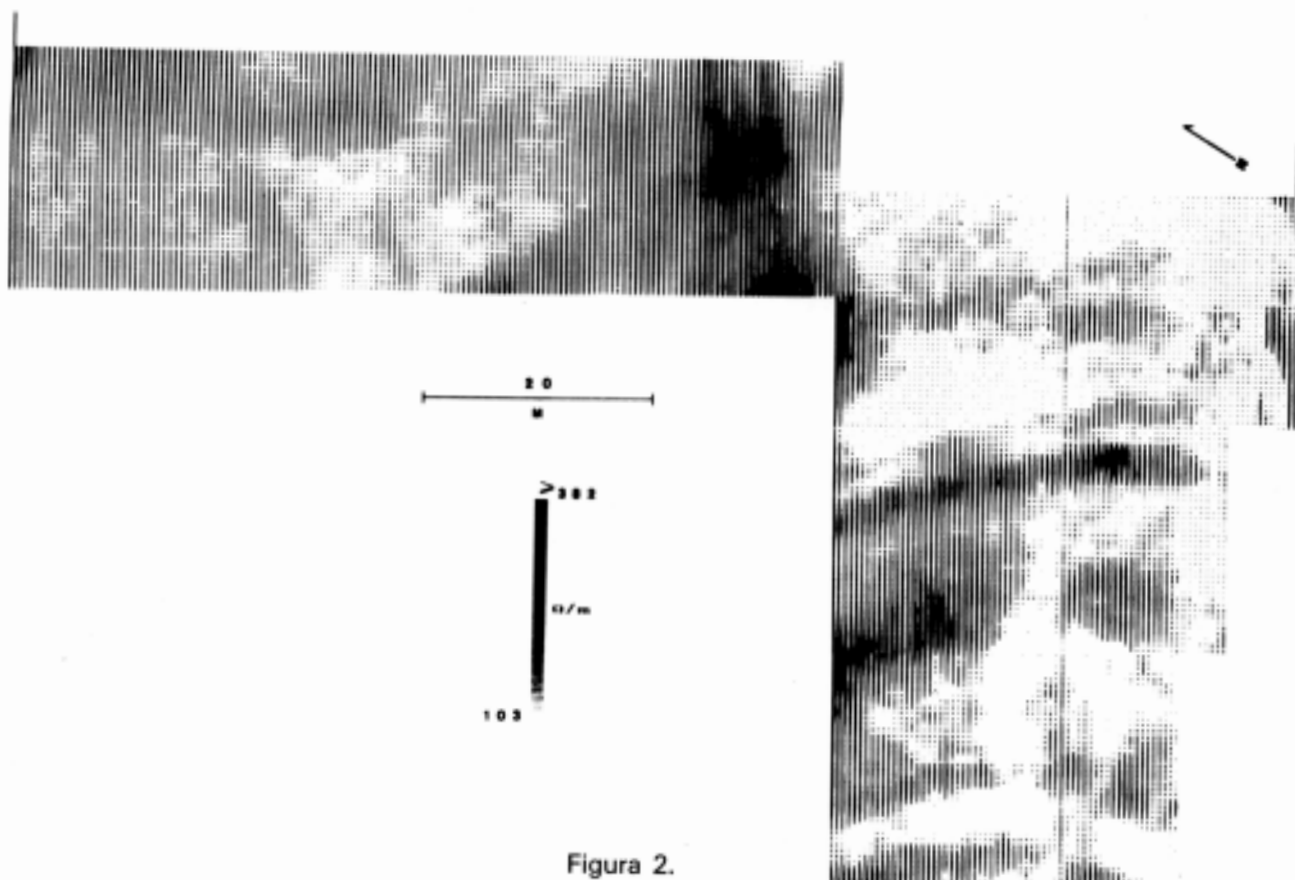


Figura 2.

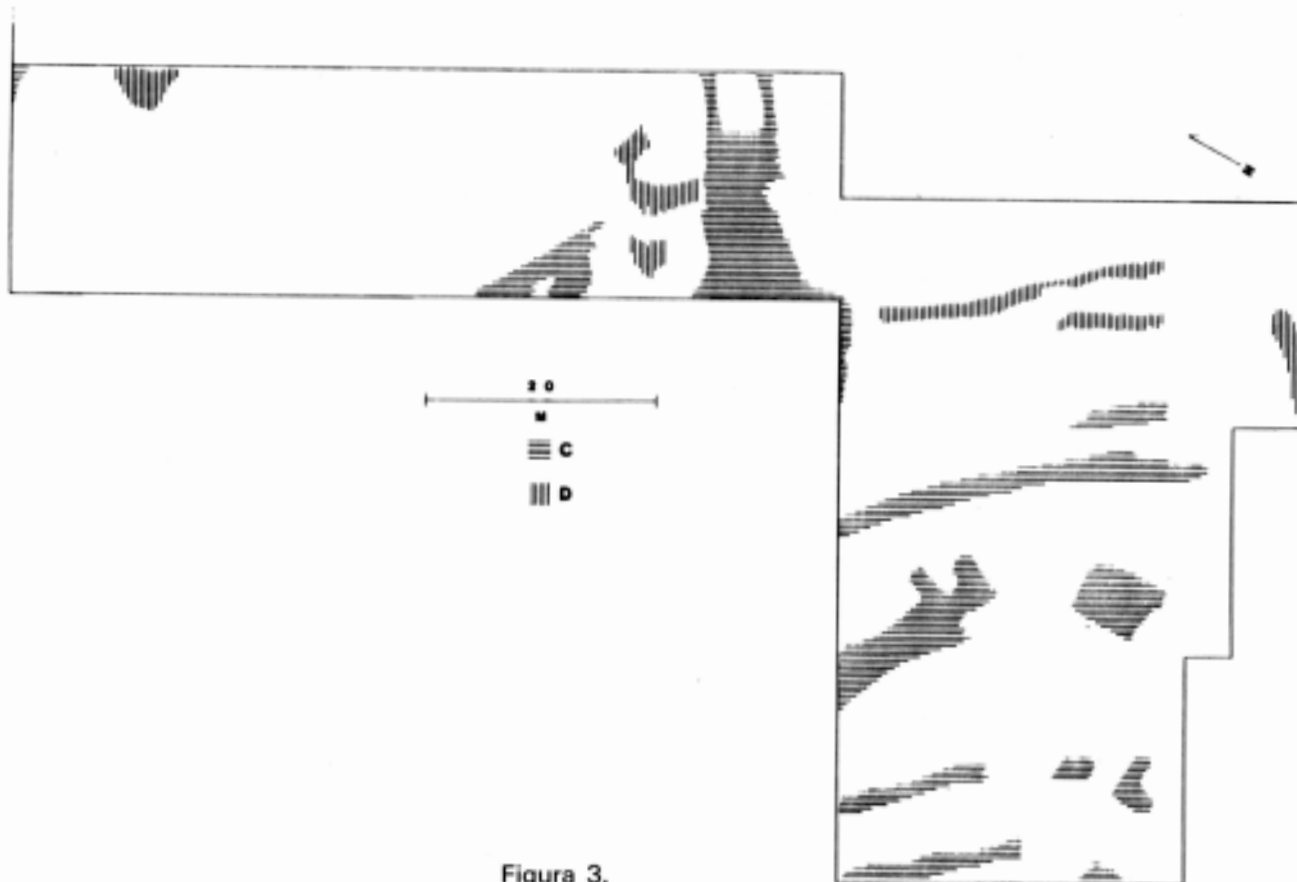


Figura 3.

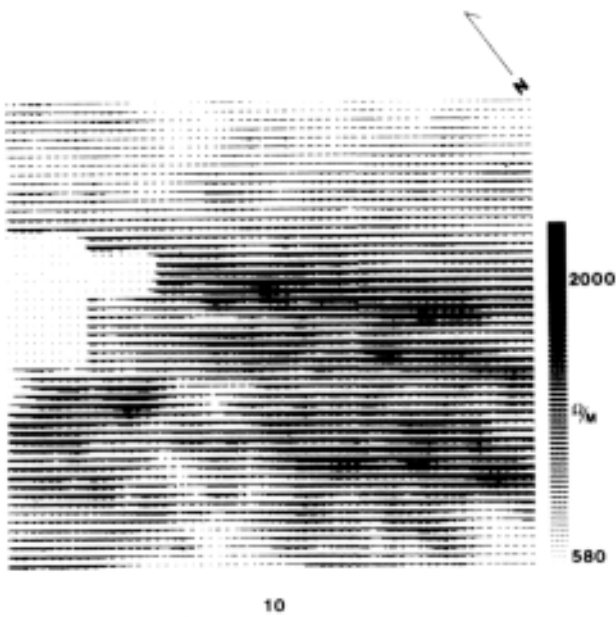


Figura 4.

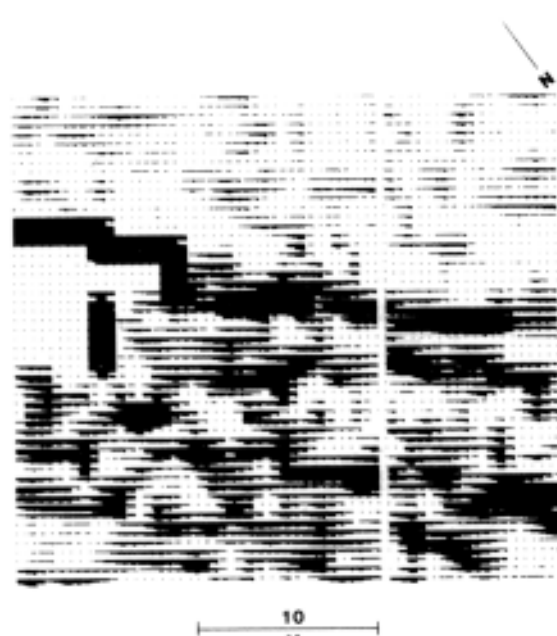


Figura 6.

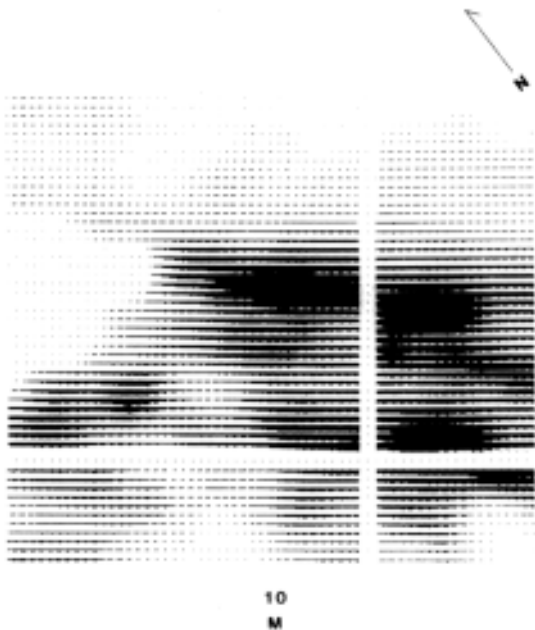


Figura 5.

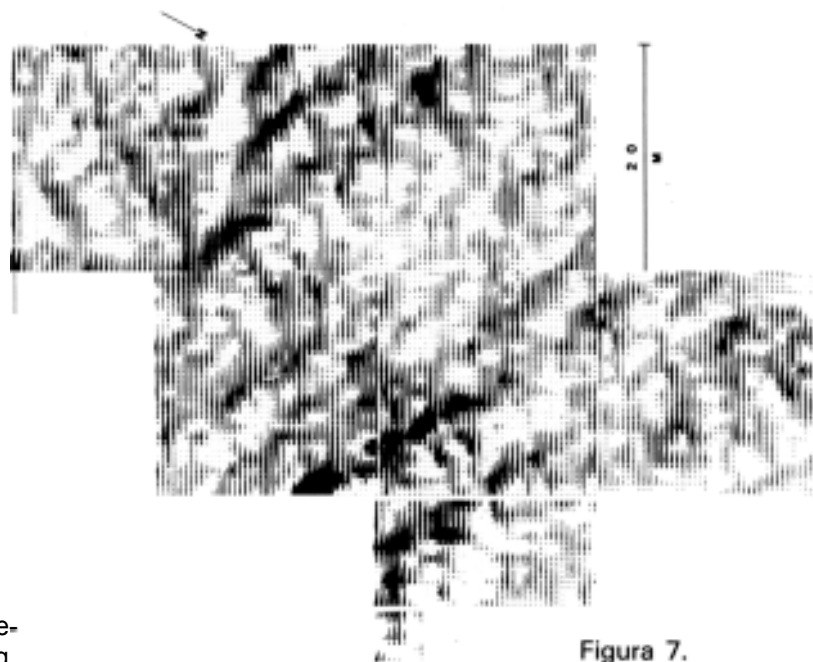


Figura 7.

de los valores brutos iniciales. Un plano de interpretación geofísica de la zona se ha obtenido en la Fig. 3.

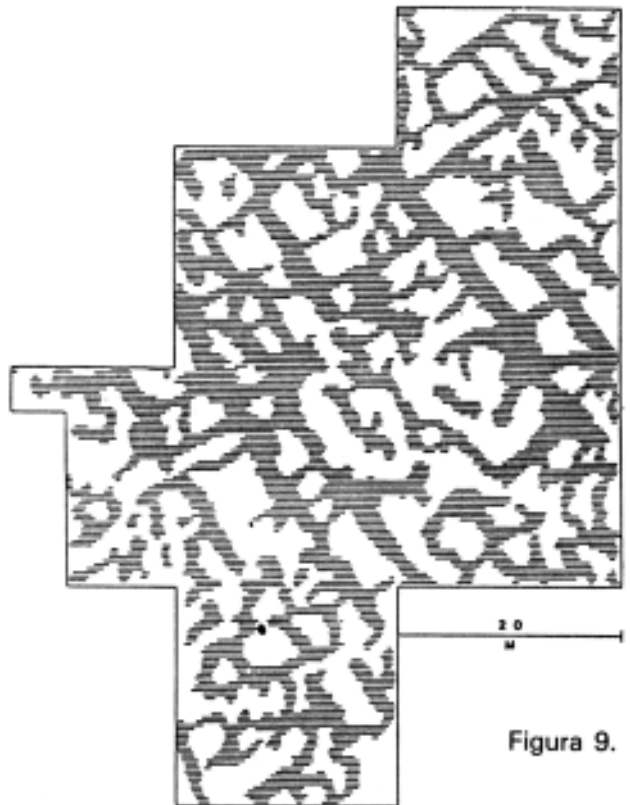
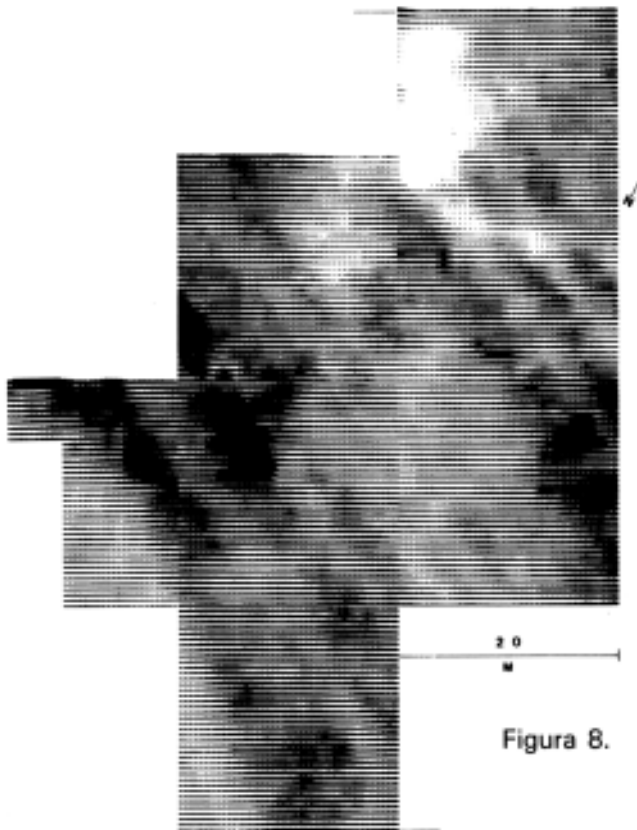
*Para la zona Z2.* La primera imagen para esta zona (Fig. 4) corresponde a una cartografía bruta de los valores originales obtenidos sobre el terreno. Un filtraje de mayor gradiente local nos permite obtener la cartografía que presentamos en la Fig. 5. Una tercera imagen se ha obtenido realizando un filtraje de correlación (Fig. 6).

*Para la zona Z3.* La Fig. 7 presenta los datos iniciales cartografiados. La siguiente imagen (Fig. 8), filtrada, nos muestra importantes alineaciones so-

bre la zona. Un plano de interpretación geofísica se recoge en la Fig. 9.

Las cartas presentadas ofrecen la posibilidad de obtener importante información:

- Puesta en evidencia de un conjunto urbanizado.*
- Reconocimiento de la extensión de las posibles estructuras arqueológicas.*



Y también se observan espacios no ocupados.

Hemos de añadir que la prospección magnética realizada, no aparece presentada en ninguna imagen. La razón hay que encontrarla en el hecho de que la información magnética proporcionada por los valores brutos originales, en su representación cartográfica no aportan información válida para conseguir una ulterior, y mejor, interpretación.

En definitiva y a modo de conclusión, apuntar que estos resultados ilustran de manera especial uno de los intereses de la prospección geofísica sobre un sitio donde la capa vegetal permanente se opone a la aplicación eficaz de los métodos tradicionales de prospección aérea y de superficie.