

# APORTACIONES DE LA ARQUEOLOGÍA AL ESTUDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE DURANTE LA SEGUNDA EDAD DEL HIERRO

**S. A. Campuzano**<sup>1,2</sup> (sacampuzano@ucm.es),  
**M. L. Osete**<sup>1,2</sup> (mlosete@fis.ucm.es),  
**A. Molina-Cardín**<sup>1</sup> (amcardin@ucm.es),  
**J. Carmona**<sup>3</sup> (j.carmona@csic.es),  
**F. J. Pavón-Carrasco**<sup>4</sup> (javier.pavon@ingv.it)

<sup>1</sup> Universidad Complutense de Madrid.  
Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Madrid (Spain).

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias, CSIC – UCM. Madrid (Spain).

<sup>3</sup> Observatori de l'Ebro. Tarragona (Spain).

<sup>4</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Sezione Roma 2. Rome (Italy).

Ahora en Universidad Complutense de Madrid.

Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Madrid (Spain).

## ABSTRACT

The spatial and temporal evolution of the Earth's magnetic field in the past is a crucial point to understand its generation in the external core. But it is also required to investigate the solar activity, the <sup>14</sup>C production and the debated relation between the geomagnetic field and the past climate of the Earth. The geomagnetic field reconstructions may be obtained from studies on heated archaeological structures whose age is well-known, such as ovens, ceramic fragments, bricks, etc. From this information Palaeosecular Variation Curves (PSVC) are defined, describing the evolution of the geomagnetic field elements (declination, inclination and intensity) during a time interval in a specific region. The current curve for Iberia spans the last 3000 years, and it is defined from a sparse database, which is not even distributed, either spatial or temporally. The less defined periods (with less data) are the times previous to the Roman Age and the period between VI – IX A.D. The Palaeomagnetism Group of the Complutense University of Madrid has developed the archaeomagnetism in Spain. We are now focused on trying to fill the present gaps of the curve. Two different sites in the north of Portugal have been investigated, Castelinho and Crestelos, from the Second Iron Age. The collaboration between archaeologist and archaeomagnetist is the key point to improve the archaeomagnetic dating technique and to define the past evolution of the Earth's magnetic field.

## Keywords

Archaeology, Archaeomagnetism, Archaeomagnetic Dating, Secular Variation.

## RESUMEN

El estudio de la evolución espacial y temporal del campo magnético de la Tierra en el pasado es crucial para entender su generación en el núcleo externo e investigar la actividad solar, la producción de  $^{14}\text{C}$  y la posible relación entre el campo geomagnético y el clima. Las reconstrucciones del campo geomagnético pueden obtenerse mediante el estudio de estructuras arqueológicas calentadas y bien datadas (hornos, hogares, cerámicas, ladrillos, etc.). Con esta información se definen las curvas de Variación Paleosecular (PSVC en sus siglas en inglés), es decir, curvas que describen la evolución de los elementos del campo geomagnético (declinación, inclinación e intensidad) a lo largo del tiempo en una cierta región. La curva actual de Iberia abarca los últimos 3000 años, y está definida a partir de una base de datos escasa, distribuida además de forma inhomogénea tanto a nivel espacial como temporal, siendo los periodos más críticos (con menor cantidad de datos) el anterior a la época romana y el comprendido entre los siglos VI – IX d.C. El Grupo de Paleomagnetismo de la Universidad Complutense de Madrid ha desarrollado el arqueomagnetismo en España. Actualmente, nuestros esfuerzos se centran en intentar completar las zonas con mayor falta de datos en la curva de Iberia. Con este fin, se han investigados dos yacimientos arqueológicos al norte de Portugal, Castelinho y Crestelos, cuyas estructuras datan de la Segunda Edad del Hierro. El potencial de la colaboración entre arqueólogos y arqueomagnetistas es la clave para mejorar la técnica de datación arqueomagnética y definir la evolución del campo magnético en el pasado.

## Palabras clave

Arqueología, Arqueomagnetismo, Datación Arqueomagnética, Variación Secular.

## INTRODUCCIÓN

El estudio del campo magnético terrestre en el pasado (Paleomagnetismo) y el conocimiento de la historia de la humanidad a partir de restos materiales distribuidos en el espacio y conservados a través del tiempo (Arqueología) pueden

parecer dos ámbitos científicos completamente ajenos en un principio, pero ambos pueden ayudarse mutuamente. Nuestro objetivo es sensibilizar a ambas disciplinas sobre la importancia de una colaboración conjunta, poniendo de manifiesto las principales contribuciones que cada una de ellas puede apor-

tar a la otra. A modo de ejemplo, se expone la colaboración actualmente vigente entre la asociación científico-cultural Zamora Protohistórica (<http://zamoraprotohistorica.jimdo.com/>) y el grupo de Paleomagnetismo de la Universidad Complutense de Madrid (<http://pc213fis.fis.ucm.es/index.html>), que llevan a cabo un estudio arqueomagnético sobre más de 30 estructuras de combustión recogidas en los yacimientos de Castelinho y Crestelos (Norte de Portugal), y que datan de la Segunda Edad del Hierro (siglos VI - III a.C.).

Para estudiar el pasado del campo magnético terrestre se necesita conocer la evolución de los denominados elementos geomagnéticos: la declinación (D), la inclinación (I) y la intensidad del campo (F) (Fig.1).

En primera aproximación, el campo magnético terrestre puede asimilarse al campo producido por un dipolo situado en el centro de la Tierra e inclinado unos  $11.5^\circ$  con respecto a su eje de rotación (Butler, 1998) (Fig.2).

En cada punto de la superficie de la Tierra se puede visualizar el campo magnético como un vec-

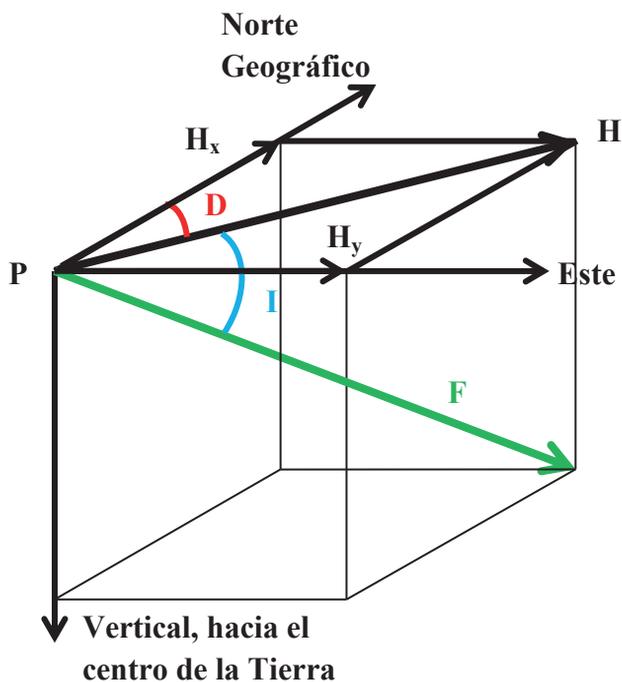


Fig.1. Elementos geomagnéticos: Declinación (D), Inclinación (I) e Intensidad (F). El punto sobre la superficie de la Tierra en el cuál se observa el campo magnético se representa con la letra P; H es la proyección horizontal del vector campo magnético, siendo H<sub>x</sub> y H<sub>y</sub> su descomposición en componentes Norte y Este.

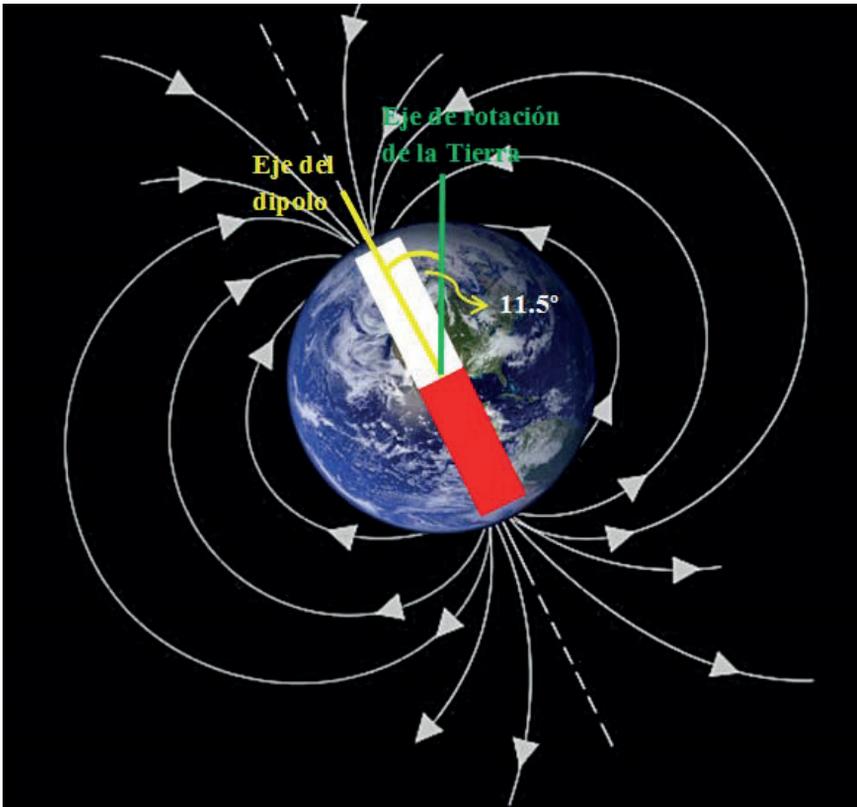


Fig.2. Representación esquemática de la aproximación dipolar al campo magnético terrestre. Se observa la distribución espacial de las líneas de campo, penetrando por el polo Sur magnético y saliendo por el polo Norte magnético.

tor que apunta hacia el interior de la misma, quedando definidos los elementos geomagnéticos a partir de las relaciones angulares que se establecen entre este vector y las direcciones Norte, Este y Vertical (hacia el centro de la Tierra). La declinación es el ángulo que forma la proyección horizontal del vector campo magnético con la dirección del Norte geográfico, la inclinación es el ángulo formado entre esta proyección horizontal y el vector campo magnético, y la intensidad es el módulo de dicho vector (ver Fig.1).

Cuanto mayor sea el vector campo magnético, mayor será la intensidad registrada, y *viceversa*.

El proceso de obtención de estos datos depende del intervalo temporal que se desee investigar. En la actualidad, los datos necesarios para el estudio del campo magnético terrestre se obtienen a partir de satélites, siendo la misión SWARM una de las más recientes puesta en órbita (Olsen *et al.*, 2013; Friis-Christensen *et al.*, 2008; 2006), y de los observatorios geomagnéticos situados en tierra. Para el pe-

río denominado histórico (siglos XVI – XIX d.C.) la principal fuente de información fueron las expediciones marítimas de los primeros navegantes, que registraron, en mapas, cartas y apuntes, las medidas de declinación e inclinación que obtuvieron a lo largo de su viaje. Por desgracia, la instrumentación necesaria para medir la intensidad del campo magnético terrestre no fue inventada hasta mediados del siglo XIX d.C. por C. F. Gauss (Gauss, 1833), por lo que la cantidad de datos de intensidad desde el siglo XVI al XIX d.C. es notablemente escasa. Del conocimiento del campo en épocas previas al período histórico se encarga el Paleomagnetismo. Para el período que denominamos “arqueológico” la disciplina toma el nombre de Arqueomagnetismo, es decir, la rama del Paleomagnetismo encargada del estudio del campo magnético en el pasado a partir de estructuras arqueológicas calentadas, tales como hornos, hogares, cerámicas o ladrillos. Para épocas mucho más antiguas la información del campo es obtenida a partir del estudio de sedimentos y rocas ígneas. Aunque los sedimentos también proporcionan información del campo magnético en la época arqueológica, el proceso de adquisición de la remanencia, es decir, el proceso por el cual la información del campo en el pasado queda registrada en el sedimento, es más complejo que el asociado a las estructuras arqueológicas calentadas, registrándose la información del campo con un retraso que no ocurre cuando tratamos con estruc-

turas calentadas, donde la adquisición es instantánea. Además, en las estructuras arqueológicas, al haber sufrido elevados calentamientos, la información del campo registrada es altamente estable.

De todo lo anterior es fácilmente deducible que la Arqueología se relaciona con el estudio del campo magnético en el pasado a través del Arqueomagnetismo. Los artefactos arqueológicos más interesantes desde el punto de vista arqueomagnético son, como ya mencionamos anteriormente, las estructuras que han sufrido elevados calentamientos como hornos, hogares, estructuras incendiadas y quemadas, cerámicas, ladrillos, etc. El proceso por el cual estas estructuras registran la información del campo magnético se denomina termorremanencia (ver Butler, 1998, para más detalles). Estos artefactos se componen de materiales que contienen minerales ferromagnéticos, los cuales tienen la propiedad de que, en presencia de un campo magnético, son capaces de retener la información de ese campo en su interior. A esta capacidad se la denomina remanencia. Estos minerales están caracterizados por tener una temperatura (la temperatura de Curie) a partir de la cual toda la información de carácter magnético que había en su interior es “borrada” (se convierten en paramagnéticos). Por el contrario, cuando un mineral ferromagnético se enfría desde una temperatura superior a la temperatura de Curie, adquiere de nuevo su capacidad de imanarse al alcanzar dicha temperatura, siendo capaces de registrar

la información del campo magnético presente durante su periodo de enfriamiento. Cuando la temperatura alcanza un valor umbral llamado temperatura de bloqueo, menor a la temperatura de Curie, la información del campo magnético que estos minerales acaban de registrar queda "bloqueada" y no varía aunque la dirección del campo magnético que actúa sobre ellos cambie (Fig.3). Los principales minerales ferromagnéticos presentes en las estructuras arqueológicas son la magnetita y la hematites.

La información del campo magnético que se puede obtener por estudios de arqueomagnetismo es la del momento en que se produjo el último calentamiento de la estructura y puede ser de dos tipos: direccional (se consigue información de

la declinación y de la inclinación), y de intensidad. La máxima cantidad de información se obtiene cuando la estructura de combustión ha permanecido *in situ* desde su último calentamiento y éste se ha producido a altas temperaturas ( $T > 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Si la estructura no ha permanecido *in situ*, la única información que se puede conseguir es la intensidad. Esto suele ocurrir principalmente con ladrillos y fragmentos de cerámica. No obstante, y aunque siempre es preferible tratar con estructuras *in situ* para poder obtener la máxima información posible, los estudios en cerámicas proporcionan actualmente una valiosa información pues la base de datos de intensidad está muy mal determinada, tanto global como regionalmente. Uno de los motivos es que el proce-

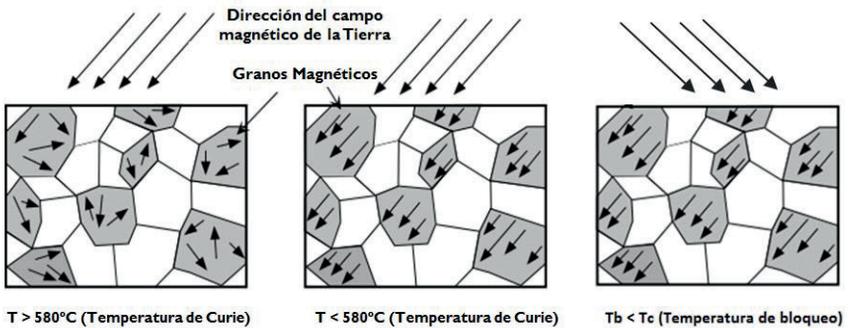


Fig. 3. Ilustración del proceso de termorremanencia de un material con minerales magnéticos. En la primera imagen se observan una serie de granos de magnetita sometidos a un campo magnético externo, con sus momentos magnéticos (representados por flechas en el interior de los granos) orientados aleatoriamente ya que la temperatura ha sobrepasado la temperatura de Curie de la magnetita ( $580^{\circ}\text{C}$ ). La segunda imagen muestra el proceso de orientación de los granos en la dirección del campo magnético externo según la temperatura desciende por debajo de la temperatura de Curie. La tercera imagen muestra cómo la remanencia permanece estable cuando la temperatura desciende por debajo de la temperatura de bloqueo, aunque el campo magnético externo cambie de dirección (ver texto para más detalles). Adaptada de Nelson (2012).

diminuto de medida de la arqueointensidad es muy complejo y lento, pudiendo producirse alteraciones químicas durante el tratamiento que impiden extraer información útil de las muestras. Actualmente el porcentaje de éxito de las medidas de arqueointensidad puede cifrarse en no más de un 50%. Debido a estos problemas, los datos de paleointensidad son aún muy escasos (ver por ejemplo el caso de Iberia en la Fig. 4c).

Los principales trabajos de arqueomagnetismo en la Península no comenzaron hasta finales de los años 80, principalmente gracias a la creación en 1989 del laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad Complutense de Madrid, UCM. Actualmente, el objetivo fundamental del grupo es completar las principales lagunas de datos existentes en Iberia. Con ello no sólo se avanzará en el conocimiento del comportamiento del campo magnético a nivel local en esta zona, sino que también ayudará a la datación más precisa de estructuras arqueológicas. A continuación se detallan las principales aportaciones de estas colaboraciones, tanto desde el punto de vista arqueológico como paleomagnético.

#### APORTACIONES DE LA ARQUEOLOGÍA AL PALEOMAGNETISMO

Uno de los resultados más directos del arqueomagnetismo es la construcción de curvas que indican cómo han evolucionado los elementos geomagnéticos (D, I, F) a lo largo del tiempo en un lugar determina-

do. A esto se le denomina construir una Curva de Variación Paleosecular (PSVC). Dada una determinada región se puede construir una curva de declinación, inclinación e intensidad en función del tiempo, ajustando los datos disponibles empleando diferentes metodologías: estadística bivariada estratificada (Le Goff *et al.*, 2002), estadística Bayesiana (Lanos, 2004; Lanos *et al.*, 2005), mínimos cuadrados repesados con bootstrap (Thébault y Gallet, 2010) o estadística Bayesiana estocástica (Hellio *et al.*, 2014).

Existen una gran cantidad de PSVCs ubicadas en diferentes zonas del globo (e.g. Iberia, Gómez-Paccard *et al.*, 2006; Francia, Hervè *et al.*, 2013; Alemania, Schnepf *et al.*, 2009; Reino Unido, Zananiri *et al.*, 2007; Italia, Tema *et al.*, 2006; Austria, Schnepf y Lanos, 2006).

Entre todas las regiones quizás la zona mejor investigada sea la europea (Fig.4). Todas estas curvas nos proporcionan una idea de cómo ha evolucionado el campo magnético a lo largo del tiempo de manera local, así como la cantidad de datos disponibles en cada una de estas zonas y sus errores de medida. Se observa claramente cómo la zona con mayor cantidad de datos es el Reino Unido, pero los datos presentan muy altas incertidumbres temporales por lo que la curva no está bien definida. La curva italiana es, por otra parte, la que presenta una menor cantidad de datos. Probablemente en la actualidad la curva mejor definida sea la curva francesa (Pavón-Carrasco *et al.*, 2011). Se trata, por tanto, no solo de aumentar

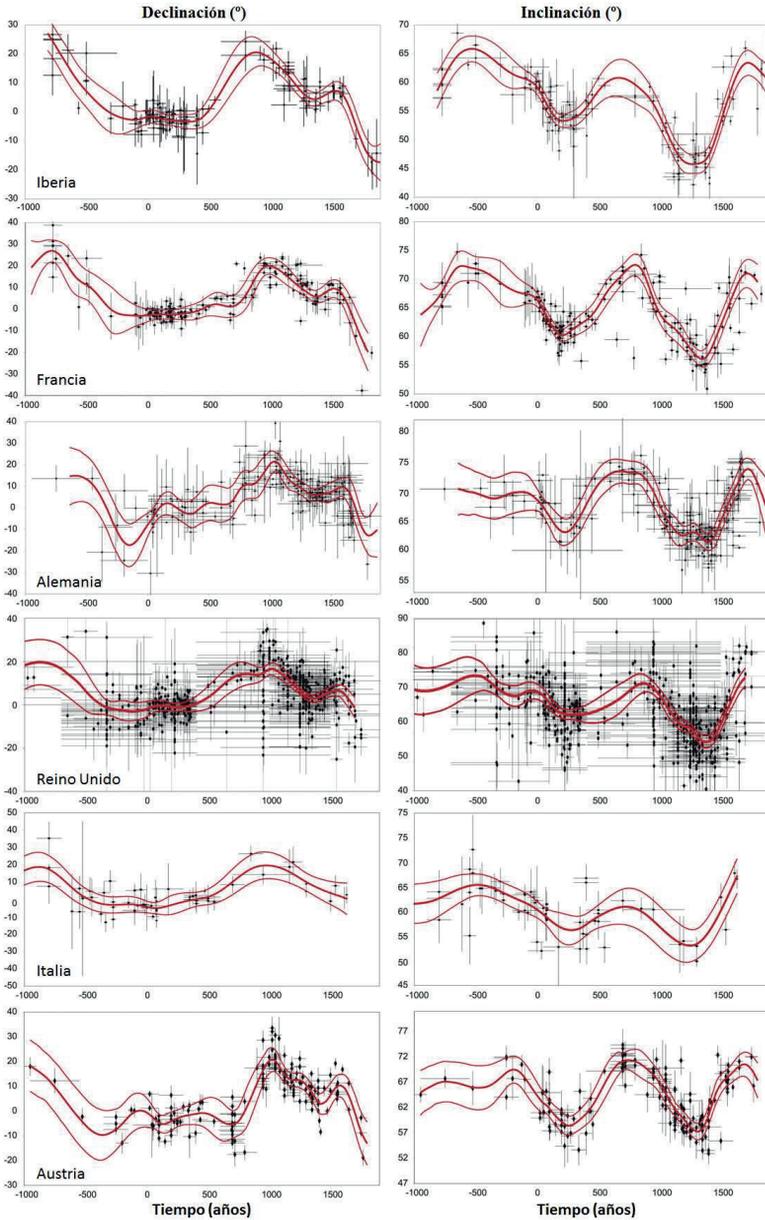


Fig. 4. PSVCs direccionales referidas a varias regiones del mundo, comparadas con la de Iberia para los últimos 3000 años. De arriba abajo: Iberia, Francia, Alemania, Reino Unido, Italia, Austria. Adaptada de Pavón-Carrasco *et al.* (2011).

la base datos, sino de mejorarla con datos de alta calidad y precisión.

La primera PSVC de Iberia se construyó en 2006 (Gómez-Paccard *et al.*, 2006) utilizando estadística Bayesiana, teniendo en cuenta los datos disponibles de Iberia, y datos del norte de África y el sur de Francia para completar la base de datos. Si consideramos los últimos trabajos disponibles hasta la fecha (Gómez-Paccard *et al.*, 2013), se puede observar en la Fig.5 que la cantidad de datos disponibles es todavía escasa y que éstos se encuentran inhomogéneamente distribuidos temporalmente. Destacan las tres grandes lagunas de datos entre los siglos XVI-XIX d.C., VI-XI d.C. y todo el período anterior a la época romana.

El grupo de Paleomagnetismo de la UCM, en colaboración con la asociación científico-cultural Zamora Protohistórica, ha comenzado un trabajo en el Norte de Portugal con el objetivo de mejorar la base de datos arqueomagnética durante el período de la Segunda Edad del Hierro, mediante el estudio de una serie de muestras procedentes de 30 hornos y hogares recogidos en los yacimientos de Castelinho y Crestelos (Fig. 6). El principal objetivo de este trabajo es obtener datos direccionales y de intensidad del campo magnético durante la Segunda Edad del Hierro e incluirlos en la actual base de datos de Iberia. Posteriormente se construirá una nueva PSVC que pueda ser empleada en estudios posteriores para realizar dataciones arqueomagnéticas más precisas de estructuras de combustión de la zona peninsular

(ver la siguiente sección para más detalles acerca de la técnica de datación arqueomagnética) y que nos permita un mejor conocimiento de la evolución del campo magnético en esta región del mundo.

Añadir nuevos datos a la base de datos actual no es sólo importante localmente. Desde el punto de vista global, la adición de nuevos datos de épocas y lugares con escasez de los mismos ayudaría a la mejora de los modelos globales del campo geomagnético y posibilitaría la realización de modelos de carácter regional en zonas del mundo donde todavía no es posible (por ejemplo, África). Esto también provocaría una mejora del conocimiento de algunas estructuras locales especialmente importantes que actualmente posee el campo magnético terrestre, como por ejemplo la denominada Anomalía del Atlántico Sur, una anomalía magnética negativa situada en el Atlántico Sur, de signo contrario al que cabría esperar en la zona, y que parece reflejar un “parche” de flujo invertido en la superficie de la frontera del manto y el núcleo externo de la Tierra (Gubbins, 1987; Hulot *et al.*, 2002; Olson y Amit, 2006). Determinar bien su surgimiento y evolución podría darnos más pistas acerca de la hipótesis que algunos autores plantean sobre la posibilidad de que esta estructura sea un precursor de una inversión de polaridad del campo magnético de la Tierra, si bien la escala en la que estiman que este fenómeno podría producirse oscila entre decenas de años y milenios, o bien que es completamente

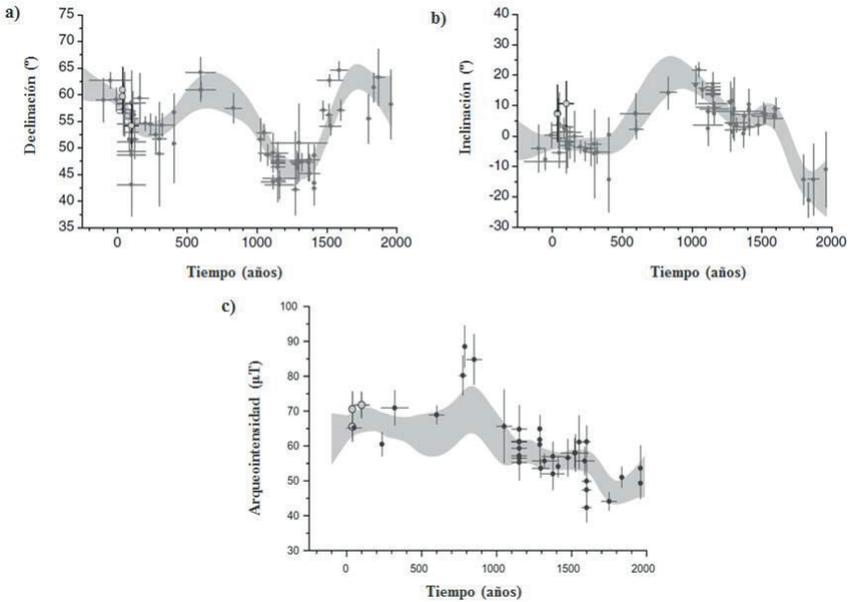


Fig. 5. Datos (a-b) direccionales y (c) de arqueointensidad disponibles en la Península Ibérica para los últimos 2000 años junto con la PSVC de Iberia (Gómez-Paccard *et al.*, 2006). Todos los datos están referidos a las coordenadas de Madrid. Adaptada de Gómez-Paccard *et al.* (2013).

te impredecible (Gubbins, 1987; Olson, 2002; De Santis *et al.*, 2004, 2007, 2013; Amit y Olson, 2010).

La estimación del momento magnético dipolar del campo a lo largo del tiempo también puede beneficiarse de la mejora de la base de datos, sobre todo de la de paleointensidad, ya que ambas cantidades son directamente proporcionales. Esto afectaría a los estudios en los cuales se emplea el momento magnético dipolar del campo, como la corrección del ritmo de producción de isótopos cosmogénicos, empleados a su vez para reconstruir la actividad solar del pasado, así como en estudios que correlacionan la

evolución del campo geomagnético con el clima pasado de la Tierra (e.g. Gallet *et al.*, 2005).

### APORTACIONES DEL PALEOMAGNETISMO A LA ARQUEOLOGÍA

Por su parte, el arqueomagnetismo puede ayudar a datar estructuras que hayan sufrido elevados calentamientos. A través de las PSVCs de la región en la cual se haya recogido la estructura sometida a estudio, podemos saber, a partir de los datos de declinación, inclinación e intensidad medidos, y comparándolos con los valores de las PSVCs, en qué época el campo mag-

nético tuvo esos valores, y así determinar la edad en la que la estructura sufrió su último calentamiento de una manera precisa. Esto también se puede hacer usando modelos regionales (europeo, etc) y globales, variando en cada caso la precisión lograda en la datación dependiendo del número de datos de los modelos, la metodología empleada, etc (para más información se puede consultar el trabajo de Pavón-Carrasco *et al.*, 2011).

Otras de las aportaciones que se pueden realizar desde el Paleomagnetismo a la Arqueología es la datación a partir de sedimentos, sobre todo en cuevas. Así es cómo, por ejemplo, se llevaron a cabo las dataciones de restos fósiles humanos en Atapuerca (Parés *et al.*, 2013; Parés y Pérez-González, 1995).

En algunas ocasiones es también posible determinar la temperatura máxima de calentamiento que sufrió la estructura estudiada, así como la historia de la manufactura de cerámicas, ladrillos, etc., saber el lugar de procedencia de los materiales empleados, el modo de construcción y/o de cocción de los materiales, su orientación relativa, etc. Un ejemplo interesante de esto es la investigación paleomagnética realizada en las grandes pirámides de Egipto (Túnyi y El-hemaly, 2012), con el objetivo de verificar la hipótesis según la cual los bloques empleados en la construcción de las pirámides fueron producidos *in situ* por una técnica descrita en detalle por Demortier (2009).



Fig. 6. Vista aérea del yacimiento de Crestelos, dividido entre su parte alta (a la izquierda de la imagen), Povoado de Crestelos, y su parte baja (derecha de la imagen), Quinta de Crestelos.

La reconstrucción de cerámicas rotas es una aplicación que ha sido también explorada (e.g. Burnham y Tarling, 1975). Al ser estructuras calentadas y conociendo los fragmentos que pertenecen a una misma estructura, se deduce que todos ellos debieron sufrir su último calentamiento a la vez, por lo que la dirección del campo registrada debe ser la misma para todos. Haciendo que esta dirección coincida en todos los fragmentos se consigue la reconstrucción total o parcial de la cerámica.

## CONCLUSIONES

La necesidad de obtener nuevos datos de la región de Iberia, sobre todo de los periodos anteriores a la época romana, los siglos VI a XI d.C. y XVI a XIX d.C. es fundamental para un buen conocimiento del campo magnético local en el pasado. Eso implicaría una mejora en la PSVC de Iberia lo que a su vez repercutiría en una mejora de la datación arqueomagnética en esta región. Además se mejorarían los modelos globales y regionales del campo geomagnético y el aumento de la comprensión de las principales características del campo. Actualmente gracias al trabajo llevado a cabo por el grupo de Paleomagnetismo de la UCM y la asociación científico-cultural Zamora Protohistórica se está completando la base de datos de Iberia durante la Segunda Edad del Hierro, una época en la que actualmente se carecía de datos.

La colaboración implicaría también un aumento de la información de interés arqueológico, puesto que en algunas ocasiones el estudio

de una determinada estructura de combustión puede proporcionar información sobre los materiales usados en su construcción, su proceso de fabricación, la manufactura de los artefactos estudiados, la temperatura máxima que han alcanzado e incluso sería posible ayudar en la reconstrucción de determinadas piezas cerámicas. Una colaboración permanente entre ambas disciplinas produciría datos que complementarían la información arqueológica y arqueomagnética actualmente disponible y que no se podrían determinar siguiendo otro tipo de metodologías.

## REFERENCIAS

- H. AMIT y P. OLSON: "A dynamo cascade interpretation of the geomagnetic dipole decrease". *Geophys. J. Int.*, 181 (2010), 1411-1427.
- R. J. P. BURNHAM y D. H. TARLING: "Magnetization of shards as an assistance to the reconstruction of pottery vessels". *Stud. Conserv.*, 20, 3 (1975), 152-157.
- R. F. BUTLER: *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Electronic Edition: 1998.
- U. R. CHRISTENSEN, J. AUBERT, G. HULOT: "Conditions for Earth-like geodynamo models". *Earth Planet. Sci. Lett.* 296, 3-4 (2010), 487-496.
- A. DE SANTIS, R. TOZZI, L. R. GAYA-PIQUE: "Information content and K-entropy of the present geomagnetic field" *Earth Planet. Sc. Lett.*, 218 (2004), 269-275.
- A. DE SANTIS: "How persistent is the present trend of the geomagnetic field to decay and, possibly, to reverse?" *Phys. Earth Planet. In.*, 162 (2007), 217-226.

- A. DE SANTIS, E. QAMILI, G. SPADA, P. GASPERINI: "Geomagnetic South Atlantic Anomaly and global sea level rise: A direct connection?" *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 74 (2012), 129-135.
- A. DE SANTIS, E. QAMILI, L. WU: "Toward a possible next geomagnetic transition?" *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13 (2013), 3395-3403, doi: 10.5194/nhess-13-3395-2013.
- G. DEMORTIER: "Revisiting the construction of the Egyptian pyramids". *Europhys. News*, 40, 1 (January-February 2009), 27 - 31.
- E. FRIIS-CHRISTENSEN, H. LÜHR, G. HULOT: "Swarm : A constellation to study the Earth's magnetic field". *Earth Planets Space*, 58, 4 (April, 2006), 351-358.
- E. FRIIS-CHRISTENSEN, H. LÜHR, D. KNUDSEN, R. HAAGMANS: "Swarm - An Earth Observation Mission investigating Geospace". *Adv. Space Res.*, 41, 1 (2008), 210-216.
- Y. GALLET, A. GENEVEY, F. FLUTEAU: "Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?" *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236 (2005), 339-347.
- C. F. GAUSS: *Intensitas vis Magneticae Terrestris ad Mensuram Absolutam Revocata*. Dieterich, Göttingen: 1833.
- M. GÓMEZ-PACCARD, A. CHAUVIN, P. LANOS, G. MCINTOSH, M. L. OSETE, G. CATANZARITI, V. C. RUIZ-MARTÍNEZ, J. I. NÚÑEZ: "The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula. Comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models", *Geochemi., Geophys., Geosyst.*, 7, 12 (2006), Q12001, doi: 10.1029/2006GC001476.
- M. GÓMEZ-PACCARD, E. BEAMUD, G. MCINTOSH, J. C. LARRAS-OAÑA: "New archaeomagnetic data recovered from the study of three Roman kilns from North-East Spain: a contribution to the Iberian palaeosecular variation curve". *Archaeometry*, 55, 1 (2013), 159-177.
- D. GUBBINS: "Mechanism for geomagnetic polarity reversals". *Nature*, 326 (1987), 167-169.
- G. HELLIO, N. GILLET, C. BOULIGAND, D. JAULT: "Stochastic modelling of regional archaeomagnetic series". *Geophys. J. Int.*, 199, 2 (2014), 931-943.
- G. HERVÉ, A. CHAUVIN, P. LANOS: "Geomagnetic field variations in Western Europe from 1500BC to 200AD. Part I: Directional secular variation curve". *Phys. Earth Planet. In.*, 218 (2013), 1-13.
- G. HULOT, C. EYMIN, B. LANGLAIS, M. MANDEA, N. OLSEN: "Small-scale structure of the geodynamo inferred from Ørsted and Magsat satellite data". *Nature*, 416 (2002), 620-623.
- PH. LANOS: "Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism, in *Tools for constructing chronologies: crossing disciplinary boundaries*". Vol. 177, edited by C. Buck, and A. Millard, 43 - 82, Springer-Verlag, London: 2004.
- P. LANOS, M. LEGOFF, M. KOVACHEVA, E. SCHNEPP: "Hierarchical modelling of rchaeomagnetic data and curve estimation by moving average technique". *Geophys. J. Int.*, 160 (2005), 440-476
- M. LE GOFF, Y. GALLET, A. GENEVEY, N. WARMÉ: "On archaeomagnetic secular variation curves and archaeomagnetic dating". *Phys. Earth Planet. In.*, 134 (2002), 203-211.

- S. A. NELSON: *Continental Drift, Sea Floor Spreading and Plate Tectonics. Course of Physical Geology at Tulane University*: 2012
- N. OLSEN, E. FRIIS-CHRISTENSEN, R. FLOBERGHAGEN, P. ALKEN, C. D. BEGGAN, A. CHULLIAT, E. DOORNBOS, J. TEIXEIRA DA ENCARNACÃO, B. HAMILTON, G. HULOT, J. VAN DEN IJSSEL, A. KUVSHINOV, V. LESUR, H. LÜHR, S. MACMILLAN, S. MAUS, M. NOJA, P. E. H. OLSEN, J. PARK, G. PLANK, C. PÜTHE, J. RAUBERG, P. RITTER, M. ROTHER, T. J. SABAKA, R. SCHACHTSCHNEIDER, O. SIROL, C. STOLLE, E. THÉBAULT, A. W. P. THOMSON, L. TÖFFNER-CLAUSEN, J. VELÍMSKÝ, P. VIGNERON, P. N. VISSER: "The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products". *Earth Planets Space*, 65, 11 (November 2013), 1189-1200,
- P. OLSON: "The disappearing dipole". *Nature*, 416 (2002), 591-594.
- P. OLSON y H. AMIT: "Changes in earth's dipole". *Naturwissenschaften*, 93, 11 (November, 2006), 519-542.
- J. M. PARÉS y A. PÉREZ-GONZÁLEZ: "Paleomagnetic age for hominid fossils at Atapuerca archaeological site, Spain". *Science*, 269 (1995), 830-832.
- J. M. PARÉS, L. ARNOLD, M. DUVALL, M. DEMURO, A. PÉREZ-GONZÁLEZ, J. M. BERMÚDEZ DE CASTRO, E. CARBONELL, J. L. ARSUAGA: "Reassessing the age of Atapuerca-TD6 (Spain): new paleomagnetic results". *J. Archaeol. Sci.*, 40 (2013), 4586-4595.
- F. J. PAVÓN-CARRASCO, M. L. OSETE, J. M. TORTA: "Regional modeling of the geomagnetic field in Europe from 6000 to 1000 B.C.". *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11(2010), Q11008.
- F. J. PAVÓN-CARRASCO, J. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. L. OSETE, J. M. TORTA: "A Matlab tool for archaeomagnetic dating". *J. Archaeol. Sci.* 38 (2011), 408-419.
- F. J. PAVÓN-CARRASCO, M. L. OSETE, J. M. TORTA, A. DE SANTIS: "A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data". *Earth Planet. Sci. Lett.*, 388 (2014), 98-109.
- E. SCHNEPP y PH. LANOS: "A preliminary secular variation reference curve for archaeomagnetic dating in Austria". *Geophys. J. Int.*, 166, 1 (2006), 91-96.
- E. SCHNEPP, P. LANOS, A. CHAUVIN: "Geomagnetic Paleointensity between 1300 and 1750 AD derived from a bread oven floor sequence in Lubeck, Germany". *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 8 (2009), Q08003.
- E. TEMA, I. HEDLEY, PH. LANOS: "Archaeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve". *Geophys. J. Int.*, 167 (2006), 1160 - 1171.
- E. THÉBAULT y Y. GALLET: "A bootstrap algorithm for deriving the archeomagnetic field intensity variation curve in the Middle East over the past 4 millennia BC". *Geophys. Res. Lett.*, 37 (2010), L22303.
- I. TÚNYI y I. A. EL-HEMALY: "Paleomagnetic investigation of the great egyptian pyramids". *Europhys. News*, 43, 6 (November-December, 2012), 28 - 31.
- I. ZANANIRI, C. M. BATT, PH. LANOS, D. H. TARLING, P. LINFORD: "Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating". *Phys. Earth Planet. Int.*, 160, 2 (2007), 97 - 107.