

Arqueomagnetismo: aplicación al estudio del campo magnético de la Tierra y a la caracterización de yacimientos arqueológicos

Archaeomagnetism: its application to the study the Earth's magnetic field and the characterization of archaeological sites

MIRIAM GÓMEZ-PACCARD¹, FRANCISCO JAVIER PAVÓN-CARRASCO^{2,1} Y ÁNGEL CARRANCHO³

¹ Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM); Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España. E-mail: mgomezpaccard@igeo.ucm-csic.es

² Departamento Física de la Tierra I, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. E-mail: fjpavon@ucm.es

³ Área de Prehistoria, Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos (UBU), Burgos, España. E-mail: acarrancho@ubu.es

Resumen El arqueomagnetismo generalmente se define como el estudio e interpretación de las propiedades magnéticas de materiales arqueológicos calentados a alta temperatura. Esta técnica proporciona una importante herramienta aplicable al ámbito de las Ciencias de la Tierra y especialmente, a la Arqueología. El arqueomagnetismo se basa en dos fenómenos físicos: la existencia de variaciones espacio-temporales del campo magnético terrestre y la capacidad de ciertos materiales arqueológicos que han sufrido procesos de calentamiento a alta temperatura de adquirir una magnetización termoremanente. Esta magnetización es estable, paralela y proporcional al campo magnético terrestre presente en el momento de enfriamiento del material arqueológico. Por ello, a partir del estudio de la termoremanencia adquirida por materiales arqueológicos de distintas edades se pueden establecer curvas de la variación secular del campo magnético terrestre. Una vez establecidas, estas curvas regionales constituyen una nueva herramienta para la datación de yacimientos arqueológicos. Además, el arqueomagnetismo puede aportar información muy valiosa en el ámbito de la Arqueología ya que permite identificar y caracterizar objetos arqueológicos quemados y fuegos paleolíticos. En este trabajo se explican de forma didáctica los principios básicos de esta técnica y se presenta un caso práctico en el que se procede a la datación arqueomagnética de un horno arqueológico.

Palabras clave: Arqueomagnetismo, campo magnético de la Tierra, datación arqueomagnética, Geomagnetismo, Paleomagnetismo.

Abstract Archaeomagnetism is generally defined as the study and interpretation of the magnetic properties of archaeological baked materials. This technique provides an important tool for Earth Sciences research and particularly for Archaeology. It relies on two physical phenomena: spatial and temporal changes of the geomagnetic field and the ability of certain burned archaeological materials to acquire a thermoremanent magnetization. This magnetization is stable, parallel with and proportional to the ambient field in which the heated materials have cooled. For this reason, for any particular region secular variation curves can be constructed by studying well-dated archeological burned materials. Once established, these regional curves can be used as a dating tool for archaeological features from the same region. In addition, the study of the magnetic properties of archaeological materials can provide a wealth of information including insight into their composition, provenance and paleofiring conditions. In this contribution, the principal physical bases and applications of this technique are reviewed from a non-exhaustive didactical perspective.

Keywords: Archeomagnetic Dating, Archeomagnetism, Earth's magnetic field, Geomagnetism, Paleomagnetism.

INTRODUCCIÓN

El campo magnético de la Tierra no es constante y cambia continuamente a escalas de tiempo muy diversas. La variación del campo geomagnético, detectable cuando se comparan los valores medios anuales observados en una misma localidad durante varios años, constituye lo que llamamos variación secular del campo geomagnético. Estas variaciones se manifiestan a través de cambios tanto de dirección como de intensidad (más detalles en Villalaín, 2016, en este volumen). Los registros históricos del campo magnético de la Tierra, existentes desde aproximadamente el año 1600 para datos direccionales y 1836 para la intensidad, proporcionan una visión bastante precisa de las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético a lo largo de los últimos 4 siglos (Jackson *et al.*, 2000). Sin embargo, para conocer el campo magnético terrestre más allá del periodo cubierto por las observaciones directas, es necesario recurrir a la capacidad de ciertas rocas y materiales **arqueológicos que** han sufrido procesos de calentamiento a alta temperatura (preferiblemente $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) **de** adquirir una magnetización termorremanente (Villalaín, 2016). Esta magnetización es estable, paralela y proporcional al campo magnético de la Tierra presente en el momento de enfriamiento del material arqueológico. Estos dos fenómenos físicos, la variación secular del campo magnético terrestre y la magnetización termorremanente, constituyen los dos pilares fundamentales del arqueomagnetismo. Como veremos a continuación, a partir del estudio de la termorremanencia adquirida por materiales arqueológicos de distintas edades (bien datados por otras técnicas), se pueden establecer curvas regionales de la variación secular del campo magnético terrestre (también conocidas como curvas de variación paleosecular). Una vez establecidas, estas curvas constituyen una nueva herramienta para la datación de yacimientos arqueológicos. Para ilustrar el uso del arqueomagnetismo como técnica de datación, al final de esta contribución se presenta un caso práctico de datación arqueomagnética donde se enumeran de manera didáctica los distintos pasos que se deben realizar para datar una estructura según el método arqueomagnético.

ESTRUCTURAS ARQUEOLÓGICAS CALENTADAS COMO HERRAMIENTA PARA ESTUDIAR EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

El gran potencial del arqueomagnetismo radica en el hecho de que muchas de las estructuras y materiales que se encuentran en yacimientos arqueológicos están compuestos principalmente de arcillas que contienen minerales ferromagnéticos (principalmente óxidos de hierro como la magnetita). Además, muchos de estos materiales arcillosos han sido sometidos a procesos de calentamiento intenso en el pasado. Gracias a ello, estructuras bastante comunes como hornos, hogares, tumbas de incineración, suelos quemados y otras estructuras de combustión son capaces de actuar como “brújulas fósiles” al adquirir una magnetización remanente que queda bloqueada de forma permanente en ellos. Esta magnetización es paralela y proporcional al campo magnético presente en el momento de enfriamiento (Villalaín, 2016). Es importante señalar que la magnetización termorremanente así adquirida es destruida si se vuelve a calentar el material con posterioridad por encima de una cierta temperatura llamada temperatura de bloqueo (Villalaín, 2016). Pero cuando se produce el nuevo enfriamiento, el material vuelve a magnetizarse según las nuevas características del campo magnético de ese momento. Por ello, la termorremanencia adquirida por materiales arqueológicos quemados refleja el campo geomagnético presente durante el último calentamiento sufrido por el material (ej., última utilización de un horno arqueológico o la fecha de un incendio). De este modo los materiales arqueológicos quemados constituyen un registro muy eficiente del campo magnético de la Tierra en el pasado. El estudio de la magnetización termorremanente grabada en materiales arqueológicos en los que la edad del calentamiento ha sido determinada mediante métodos independientes, constituye el método más eficaz para analizar la variación secular del campo magnético terrestre durante los últimos milenios. El arqueomagnetismo es, precisamente, la rama de la ciencia que se ocupa de ello. Los estudios que conciernen a la orientación del campo magnético terrestre, definida por la Declinación y la Inclinación (ver artículo de Villalaín, 2016, en este volumen) se les llama arqueodireccionales mientras que aquellos que investigan la intensidad del campo magnético de la Tierra se denominan estudios de arqueointensidad (o paleointensidad). Aunque esta técnica tiene su origen en investigaciones e ideas centenarias es una disciplina considerablemente moderna. Fue en Francia donde a inicios del s. XX varios investigadores aplicaron, por primera vez, los métodos paleomagnéticos a estructuras arqueológicas. Lograron así definir las características del campo magnético terrestre en Francia durante los últimos dos mil años y obtuvieron las primeras curvas de variación secular de los distintos parámetros que definen el campo magnético en esta región (Thellier y Thellier, 1959). Desde entonces la técnica arqueomagnética ha experimentado un gran desarrollo y, actualmente, existen varios grupos de investigación que estudian y profundizan en diversos aspectos relacionados con esta temática. En la figura 1 se pueden ver varios ejemplos de materiales en los que se ha aplicado con éxito la técnica arqueomagnética como hornos, hogares u otras estructuras de combustión. A partir del estudio arqueomagnético de estas estructuras se ha podido determinar la magnetización termorremanente asociada a cada una de ellas y, deducir, las características del campo magnético terrestre presente en el momento del último calentamiento sufrido por estos materiales. Por ejemplo, el horno arqueológico de la figura 1a ha permitido obtener las características del campo magnético terrestre del s. IX d.C. (fecha del abandono de este horno arqueológico) en Raqqada en Túnez (Gómez-Paccard *et al.*, 2012).

El primer paso para realizar un estudio arqueomagnético es la toma de muestras en el yacimiento arqueológico. Lógicamente, para poder estudiar la

Fig. 1. Ejemplos de materiales arqueológicos estudiados mediante la técnica arqueomagnética. a) Horno, Raqqada (Túnez), b) Hogar, Michoacán (México), c) Episodios de combustión, Cueva de El Mirador (España), d) Hogar, La Ferradura (España).



Fig. 2. De la excavación al laboratorio. a-b) Detalles del proceso de muestreo: para poder orientar las muestras en el sistema de referencia geográfico se marca en cada muestra la dirección del norte magnético y la dirección del sol. c-d) Dos tipos de magnetómetro habitualmente utilizados en los laboratorio de paleomagnetismo para medir la termorremanencia (Laboratorio de Paleomagnetismo CCIT UB-CSIC, Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, Barcelona).

dirección del campo magnético terrestre antiguo debemos estudiar estructuras *in situ* que no se hayan movido desde el momento de adquisición de la **termorremanencia** que vamos a determinar en el laboratorio y que es portadora de la información que queremos obtener. Estructuras como hogares, termas y suelos quemados similares a las representadas en la figura 1 son candidatos idóneos. En los estudios direccionales es particularmente importante determinar la dirección magnética con la mayor precisión posible. Para ello es fundamental tomar un número representativo de muestras bien repartidas por toda la estructura (unas 10-15 muestras suelen ser suficientes) y orientar las muestras en el sistema geográfico con el menor error posible. Los procedi-

mientos de muestreo son variados y dependen de la naturaleza y grado de cohesión del material elegido. En materiales duros (como algunas rocas o ladrillos) se suelen emplear perforadoras eléctricas o de gasolina acopladas a brocas diamantadas. Sin embargo, en la mayoría de los materiales arqueomagnéticos es necesario recurrir a la toma de bloques de mano. En las figuras 1 y 2 se pueden ver varios muestreos arqueomagnéticos en los que se ha utilizado escayola para obtener muestras de mano. La escayola permite construir una superficie horizontal que puede orientarse con gran precisión utilizando una brújula solar y/o magnética (Figs. 2a y 2b). Una vez orientada, la superficie de escayola y el material quemado que se encuentra justo debajo –que es lo que en realidad nos interesa ya que es el portador de la señal magnética que queremos estudiar– deben ser extraídos con especial cuidado para evitar perder la orientación de las muestras. En el laboratorio se procede posteriormente a la consolidación y preparación de los especímenes arqueomagnéticos (cilíndricos o cúbicos). Éstos deben tener el tamaño adecuado para poder ser medidos en los magnetómetros de los laboratorios de arqueomagnetismo (Figs. 2c y 2d). A partir del estudio de la termorremanencia “grabada” en los especímenes y mediante un tratamiento estadístico de los resultados, se obtiene una dirección (declinación e inclinación) e intensidad medias, ambas con un error asociado. Estos valores permiten describir el vector campo geomagnético en la localidad de la estructura estudiada y correspondiente al momento del último calentamiento de la estructura. Es importante señalar que el protocolo necesario para determinar la intensidad del campo magnético del pasado (llamada arqueointensidad) es mucho más largo y delicado que los experimentos arqueomagnéticos en los que sólo

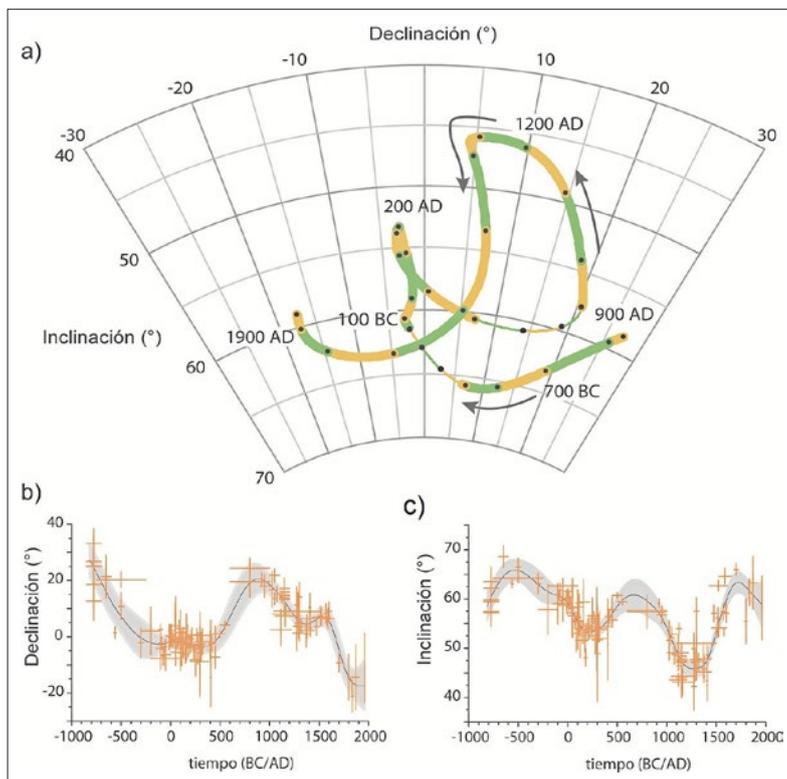


se estudia la dirección del campo. En contrapartida, para determinar la paleointensidad también se pueden estudiar objetos arqueológicos desplazados no orientados (como tejas, ladrillos, cerámicas...) ya que no es necesario referenciar las muestras en el sistema geográfico para determinar el módulo del vector. Una explicación detallada de la metodología utilizada en estudios arqueomagnéticos se puede encontrar en Tauxe (1998).

CURVAS REGIONALES DE REFERENCIA DE LAS VARIACIONES TEMPORALES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Gracias a la técnica arqueomagnética y mediante el estudio de estructuras arqueológicas bien datadas de una misma región podemos, por tanto, describir las variaciones regionales del campo magnético terrestre durante los últimos milenios. Por ejemplo, los estudios llevados a cabo en los últimos años han permitido publicar el primer catálogo de datos arqueomagnéticos de España (Gómez-Paccard *et al.*, 2006a) y la primera curva de variación secular direccional para Iberia para los últimos 3000 años (Gómez-Paccard *et al.*, 2006b; Fig. 3). Esta curva se obtuvo a partir del estudio de hornos arqueológicos de distintas edades comprendidas entre 850 a.C. y 1950 d.C. Para obtener la curva media (Fig. 3a y línea negra en b y c) así como los errores asociados (bandas grises en figuras 3b y c) se utilizó, en este caso, la estadística bayesiana. Aunque es evidente que sigue siendo necesario estudiar nuevas estructuras arqueomagnéticas para aumentar la densidad de datos para algunas épocas históricamente poco representadas y así mejorar la precisión de esta curva, los alcances logrados han permitido el uso de la técnica de datación arqueomagnética en la Península Ibérica con bastante éxito (ver, por ejemplo, Gómez-Paccard y Beamud, 2008).

Si comparamos la curva de la Península Ibérica con la de otras regiones cercanas como Francia o Alemania, se puede comprobar que la evolución



temporal del campo magnético terrestre no es exactamente igual (ver Gómez-Paccard *et al.*, 2006b para más detalles). Este hecho evidencia que la variación secular del campo magnético terrestre no es uniforme temporal ni espacialmente y, por ello, se debe determinar de manera independiente en cada una de las regiones del planeta. Sin embargo, hoy en día existen todavía muchas regiones muy poco exploradas desde un punto de vista arqueomagnético. En Carrancho *et al.* (2015) se puede encontrar una revisión actualizada de los estudios arqueomagnéticos realizados hasta el momento. Si representamos el número de datos arqueomagnéticos existentes en un mapa de la superficie de la Tierra (Figs. 4 a, b, c) y en función del tiempo (Fig. 4d) se pue-

Fig. 3. Curva de variación secular (direccional) para Iberia. Obtenida a partir del estudio de materiales arqueológicos quemados de cronología bien definida. Figura modificada de Gómez-Paccard *et al.* (2006b).

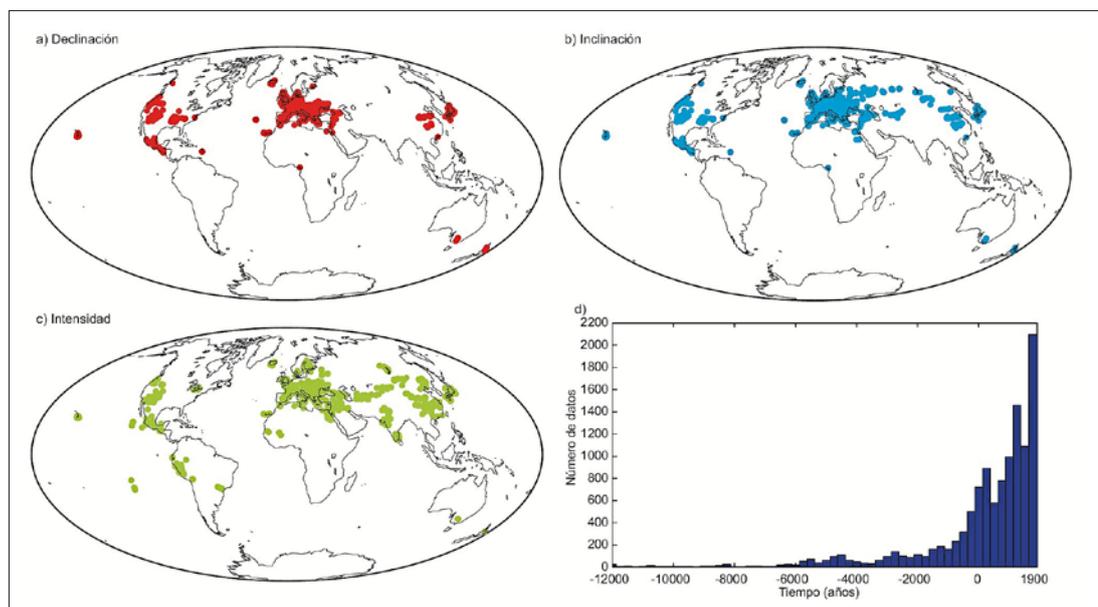


Fig. 4. Distribución mundial de datos arqueomagnéticos para los últimos 14 milenios. a-c) Mapa con los datos direccionales y de intensidad, d) Distribución temporal de los datos direccionales y de intensidad (todos los datos conjuntos).

de ver claramente que la distribución de los datos es no homogénea. La mayoría de datos provienen del continente europeo y de América del Norte, y en el hemisferio Sur existen muy pocos datos disponibles. Esta escasez de datos limita claramente nuestra capacidad para describir con precisión las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético y, por tanto, limita las aplicaciones actuales de esta técnica a los últimos 2-3 milenios y a algunas regiones del planeta. La adquisición de nuevos datos arqueomagnéticos permitirá hacer factible, en un futuro próximo, la construcción de nuevas curvas regionales de referencia que, como vamos a ver en el siguiente apartado, proporcionarán una nueva herramienta de datación aplicable a materiales arqueológicos quemados.

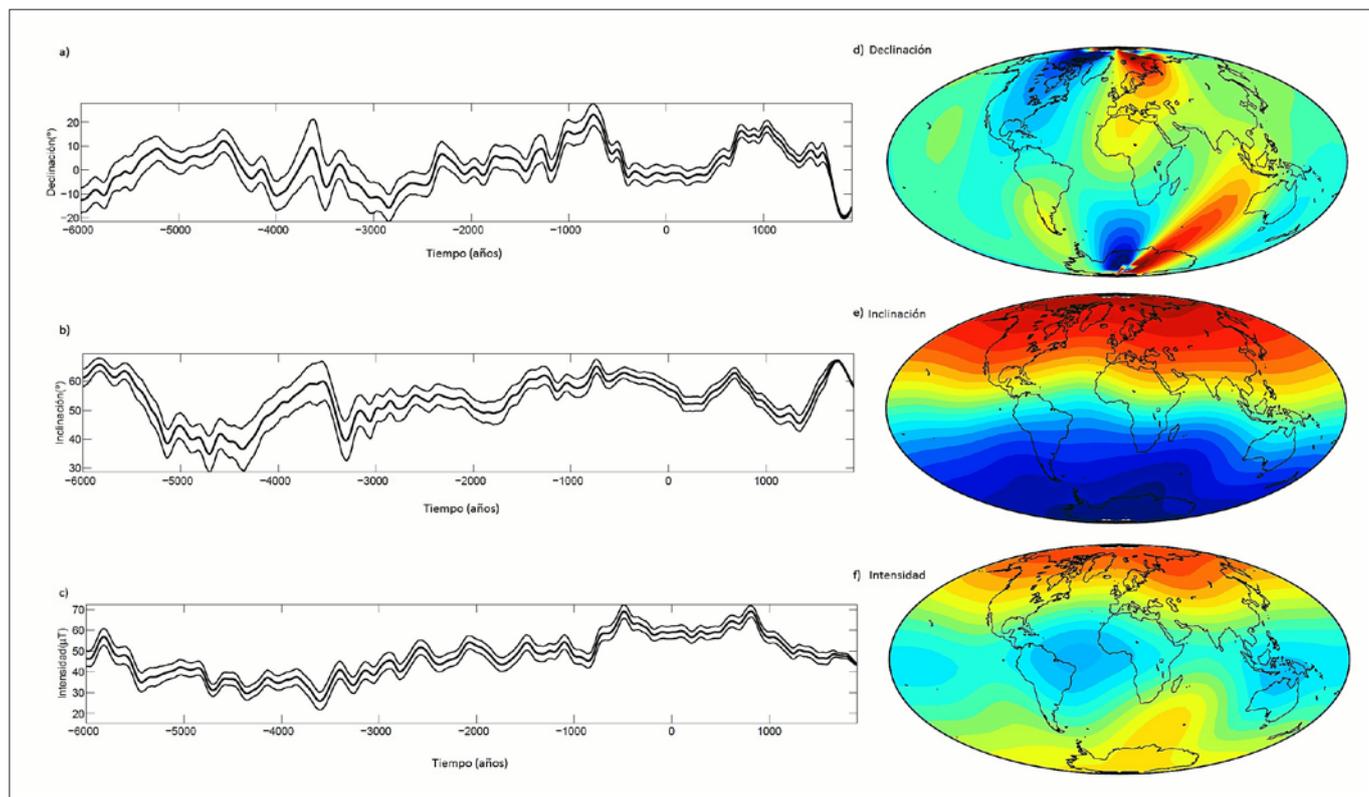
EL ARQUEOMAGNETISMO COMO TÉCNICA DE DATACIÓN

Ha quedado claro que ciertos materiales arqueológicos proporcionan un registro único del campo magnético terrestre. Y también que el estudio de materiales en los que la edad de calentamiento es conocida por otros métodos independientes permite estudiar las variaciones espacio-temporales del campo magnético de nuestro planeta. Las curvas regionales de variación secular así establecidas son la base del método arqueomagnético de datación. Estas curvas de referencia o curvas “patrón” se establecen a partir de distintas herramientas matemáticas. Una de ellas es realizar un tratamiento estadístico (ej.: ventanas móviles, estadística bayesiana) sobre el conjunto de datos disponibles para una región en concreto. El método es aplicable a regiones de unos 600 km

de radio. Así se ha obtenido, por ejemplo, la curva de variación secular de la Península Ibérica que hemos visto anteriormente (Fig. 3). Otra forma de abordar el problema es el establecimiento de modelos geomagnéticos regionales o globales a partir del análisis en armónicos sobre la esfera (ver Pavón-Carrasco *et al.*, 2009, 2014). Estos modelos permiten obtener una descripción de las variaciones espaciales y temporales del campo geomagnético en cualquier punto de la región considerada, generando para cualquier punto una curva de variación secular de referencia que puede ser usada para la datación. La figura 5 muestra, por ejemplo, las curvas de variación secular obtenidas en Madrid para los últimos 8000 años dadas a partir del modelo global SHA.DIF.14k y los mapas de los elementos geomagnéticos para el año 1200 d.C. (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014). Curvas similares se pueden obtener para otros periodos o regiones pero, evidentemente, la fiabilidad de las mismas depende de la cantidad, de la calidad y de la distribución espacio-temporal de los datos utilizados para su construcción.

La técnica arqueomagnética de datación consiste en comparar las características del campo magnético terrestre “grabado” en una estructura arqueológica de edad desconocida, con la curva de variación secular “patrón” de la región correspondiente. A partir de la comparación de los valores de declinación, inclinación e intensidad geomagnéticas obtenidos a partir del estudio arqueomagnético de la estructura a datar con las curvas patrón de referencia, se pueden obtener los rangos de edad más probables para cada uno de los parámetros magnéticos. La combinación de los resultados obtenidos para cada parámetro permite obtener la datación arqueomagnética final a un cierto nivel

Fig. 5. Variación del campo geomagnético en el pasado. a-c) Curva de variación secular del campo magnético de la Tierra en Madrid para los últimos 8000 años. d-f) Mapas de los elementos geomagnéticos para el año 1200 d.C. dados por el modelo global arqueomagnético SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2014).



de confianza y que, en general, se establece en un 95% (para más detalle sobre la técnica de datación ver Pavón-Carrasco *et al.*, 2011). El método arqueomagnético de datación es, por tanto, similar a la datación radiocarbónica, donde se comparan estadísticamente los datos obtenidos para la estructura/muestra estudiada con aquellos proporcionados con una curva patrón. La técnica de datación arqueomagnética se aplica ya con éxito en varias regiones, especialmente en Europa, donde existen las curvas patrón de referencia mejor establecidas e incluso la primera curva direccional para Europa y para el Neolítico que extiende la técnica de datación hasta el 5500 a.C. (Carrancho *et al.*, 2013). En la actividad práctica presentada al final de este trabajo se expone un ejemplo de cómo esta técnica permite datar una estructura arqueológica a partir de la herramienta de datación desarrollada por Pavón-Carrasco *et al.* (2011).

OTRAS APLICACIONES DEL ARQUEOMAGNETISMO AL ESTUDIO DE YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS

La datación es probablemente la aplicación más conocida del arqueomagnetismo. Sin embargo, la versatilidad de esta técnica permite obtener otro tipo de información arqueológica como, por ejemplo, la identificación de fuegos paleolíticos, la estimación de temperaturas de calentamiento en materiales arqueológicos quemados o la identificación de posibles procesos post-deposicionales. Veamos algunos ejemplos.

Identificación y caracterización de fuegos paleolíticos

La identificación de estructuras de combustión en yacimientos arqueológicos, generalmente se realiza por la presencia de cenizas, carbones, sedimentos rubefactados (enrojecidos), etc. Cuando se trata de estructuras de combustión históricas como hornos o muros quemados, la identificación es sencilla y deja poco lugar a la duda. Sin embargo, en yacimientos paleolíticos (de más de 10.000 años de edad), su identificación puede ser bastante problemática. Dependiendo de su antigüedad y estado de conservación, el contexto puede verse seriamente afectado por agentes ambientales como agua o aire, llegando incluso a hacer irreconocible cualquier evidencia de fuego en el registro arqueológico. Éste suele ser el caso de hogares o fuegos paleolíticos donde las evidencias de alteración térmica (ej.: cenizas, carbones) suelen ser pocas, ambiguas y generalmente mal preservadas.

Esta técnica se basa en el hecho de que los minerales ferromagnéticos son muy sensibles a modificar sus propiedades magnéticas al ser calentados. Las transformaciones que induce el calentamiento en la mineralogía magnética contribuyen a crear anomalías distintivas del área circundante no quemada. Una de estas anomalías es, por ejemplo, la susceptibilidad magnética. Éste es un parámetro que informa entre otras cosas sobre la concentración de minerales ferromagnéticos que hay en el material. Valores elevados de suscepti-

bilidad magnética en materiales calentados generalmente se asocian a un aumento significativo en la concentración de minerales altamente magnéticos producidos por la acción del fuego. Desde un punto de vista mineralógico, estas anomalías magnéticas pueden atribuirse a la transformación de ciertos óxidos e hidróxidos de hierro, sulfuros, carbonatos o silicatos en fases más magnéticas como la magnetita y/o maghemita (Evans y Heller, 2003). Por eso, la medida de parámetros magnéticos dependientes de la concentración mineral como la susceptibilidad magnética en muestras del sedimento potencialmente quemado frente al área circundante no quemada, debiera reflejar un contraste notable –a veces de hasta varios órdenes de magnitud– que permita identificar fuego. Más allá del potencial del método para este fin, éste es un ejemplo de colaboración mutua entre arqueólogos y geofísicos y, como veremos, no el único.

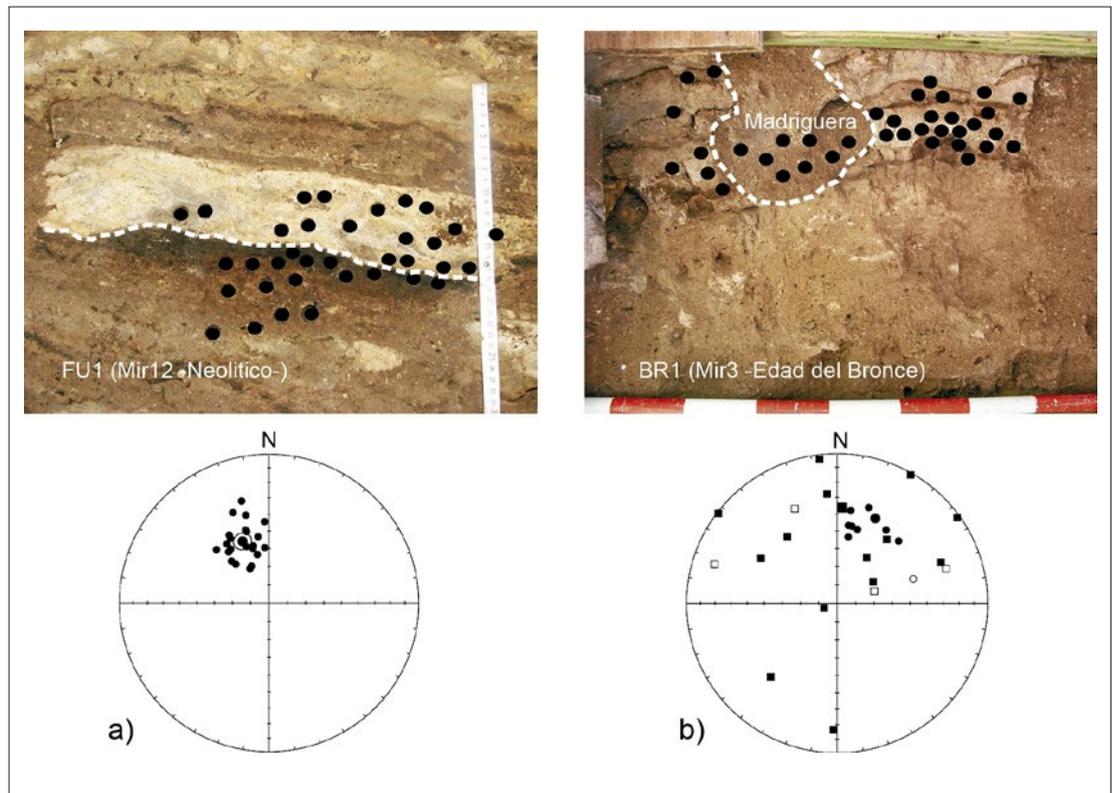
Determinación de paleotemperaturas

Otra aplicación de los métodos magnéticos al estudio de materiales arqueológicos quemados es la posibilidad de determinar su última temperatura de calentamiento. Conocer la temperatura a la que un material arqueológico ha sido calentado es interesante porque puede ayudar a reconstruir las condiciones tecnológicas en las que una estructura de combustión fue usada en el pasado. El uso del arqueomagnetismo para determinar paleotemperaturas ha sido explorado por varios autores (por ejemplo, Linford y Platzman 2004; Hroudá *et al.* 2003). A continuación describimos un ejemplo sencillo para entender el procedimiento: imaginemos que estamos estudiando una muestra quemada de un hogar prehistórico y que el mineral magnético presente es magnetita. Si esta muestra en su último calentamiento alcanzó una cierta temperatura (ej.: 350 °C), la nueva magnetización adquirida habrá reseteado parcialmente la magnetización originalmente registrada por el sustrato cuando éste se formó. Mediante un proceso de desmagnetización en un laboratorio de paleomagnetismo, es posible determinar dicha temperatura aislando la magnetización original y la adquirida posteriormente durante el último calentamiento.

Identificación de procesos post-deposicionales en fuegos arqueológicos

Se entiende por procesos post-deposicionales todas aquellas alteraciones físico-químicas que distorsionan la posición original de un material arqueológico o su composición mineralógica. Identificar estos procesos en estructuras de combustión arqueológicas es relevante porque si estos procesos son lo suficientemente severos, pueden tener implicaciones significativas en la interpretación cultural de un nivel o un yacimiento arqueológico. Dependiendo del grado de alteración, estos procesos pueden provocar desplazamientos de restos arqueológicos (óseos, líticos e incluso el propio sedimento), dentro de la estratigrafía a distancias que van desde unos pocos centímetros hasta incluso metros. Nos estamos aquí refiriendo a fuegos u hogares prehistóricos, especialmente susceptibles a sufrir removilización mecánicas del sedimento.

Fig. 6. Estudio direccional en dos episodios de combustión de la cueva de El Mirador (Burgos). (a) Episodio neolítico bien conservado. (b) Episodio alterado por una madriguera. Abajo sus correspondientes estereogramas con las direcciones arqueomagnéticas medias de las muestras estudiadas. Los círculos en la figura 6b representan las muestras quemadas no bioturbadas y los cuadrados, las muestras de dentro o anexas a la madriguera y que sí han sufrido bioturbación (no *in situ*). Modificado de Carrancho et al. (2012).



El método arqueomagnético es también útil para identificar si una estructura está o no *in situ* también en materiales duros de cronologías históricas como hornos, termas, muros, etc., debido a que cualquier proceso que conlleve una reorganización mecánica de la estructura de combustión (ej.: bioturbación) implicará un desordenamiento de la dirección del campo magnético terrestre originalmente registrada cuando la estructura se enfrió por última vez.

Para ilustrar esta aplicación, en la figura 6 se representan dos fuegos prehistóricos estudiados por Carrancho *et al.* (2012) en la Cueva de El Mirador (Sierra de Atapuerca, Burgos). Uno es un fuego neolítico aparentemente *in situ* con una disposición estratigráfica ordenada (cenizas sobre un fino lecho carbonoso; Fig. 6a) y el otro es un fuego de la Edad del Bronce parcialmente bioturbado por una madriguera de conejo (Fig. 6b). Ambos fueron intensivamente muestreados y los resultados direccionales obtenidos indican claramente cómo la dispersión obtenida por las direcciones del campo geomagnético en el fuego bioturbado (Fig. 6b) es mucho mayor que en el otro (Fig. 6a). Lo interesante es que las muestras con un comportamiento direccional anómalo no sólo proceden de la zona bioturbada (dentro de la madriguera; Fig. 6b), sino también de la que aparentemente está intacta. Esto indica que el arqueomagnetismo es especialmente útil para identificar zonas de la estructura que han sufrido alteraciones post-deposicionales y que a escala macroscópica (visualmente) no se distinguen. En resumen, el análisis de direcciones arqueomagnéticas, combinado con el estudio de propiedades magnéticas y observaciones macroscópicas constituye una poderosa herramienta para evaluar cuándo un fuego está realmente *in situ*.

Estudios de cronología relativa de eventos de combustión paleolíticos

Las ocupaciones de grupos neandertales en yacimientos del Paleolítico Medio peninsular (ca. 250-40 mil años antes del presente) con frecuencia se caracterizan por contener densas acumulaciones de material lítico u óseo en torno a estructuras de combustión u hogares. Estas acumulaciones se conocen en la literatura arqueológica como *palimpsestos*. Estas superficies están tan densamente estratificadas que es muy difícil determinar si corresponden a una o más ocupaciones humanas y sobre todo, estimar si son temporalmente distintas o no. En este contexto el arqueomagnetismo puede ser de gran ayuda debido a que permite determinar diacronías temporales entre hogares expuestos en la misma superficie de excavación en yacimientos paleolíticos. Considerando a cada hogar como unidad analítica básica (cada hogar es un evento temporal único y aislado), la aplicación del método se basa en las sutiles variaciones que experimenta el campo magnético terrestre con el tiempo (*variación secular*) y en la capacidad de estos materiales quemados de registrar dichas variaciones. Es decir, se trata de identificar si la dirección arqueomagnética registrada por varios hogares del mismo nivel es distinta para determinar su diacronía. Conviene recordar que en esta aplicación no se hace una datación arqueomagnética en sentido estricto, ya que ésta sólo es posible en áreas geográficas donde previamente se cuente con curvas de variación secular que alcancen las cronologías que se pretenden estudiar y, como se ha señalado anteriormente, en la actualidad sólo existen curvas bien establecidas para los últimos 2-3 milenios. El mérito de esta aplicación está en poder individualizar eventos de ocupación y determinar si son temporalmente diacrónicos, lo que para los prehistoriadores es algo muy valioso.

ACTIVIDAD PRÁCTICA: DATACIÓN ARQUEOMAGNÉTICA DE UNA ESTRUCTURA ARQUEOLÓGICA

En esta sección se desarrolla un caso práctico de datación arqueomagnética usando el modelo regional Europeo de campo geomagnético válido para los últimos 3000 años: el modelo SCHA.DIF.3k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2009). Como se indicó anteriormente, la datación consiste en la comparación estadística de los elementos geomagnéticos proporcionados por la estructura arqueológica a datar, con unas curvas patrón válidas para la región en la que se encuentra el yacimiento. Esta comparación puede ser llevada a cabo de diferentes formas dependiendo de qué parámetro estadístico es el usado para determinar la datación (ver Pavón-Carrasco *et al.*, 2015). En nuestro caso, vamos a usar una comparación estadística basada en el producto de las funciones de probabilidad de cada elemento geomagnético, ya sea del artefacto arqueológico a datar como de la curva patrón usada. Los pasos a seguir se describen a continuación:

Paso 1. Una vez determinados en el laboratorio de arqueomagnetismo los elementos geomagnéticos asociados a la estructura arqueológica cuya edad es desconocida, es necesario identificar claramente qué parámetros son necesarios para la datación. Como ejemplo, se propone un caso real de un horno (Spasov *et al.*, 2008) cuya edad se desconoce y que proporciona los siguientes valores de campo geomagnético: *Declinación* (D) = 15.0° , *Inclinación* (I) = 64.7° e *Intensidad* (F) = $69.4 \mu\text{T}$. A esta información “magnética” hay que sumar las coordenadas del sitio arqueológico a la que pertenece la estructura, pues tendremos que referir la curva patrón a dichas coordenadas. En este caso, se trata de un horno de un yacimiento localizado en Bélgica con coordenadas $50^\circ 39' 51''\text{N}$, $4^\circ 40' 38''\text{E}$.

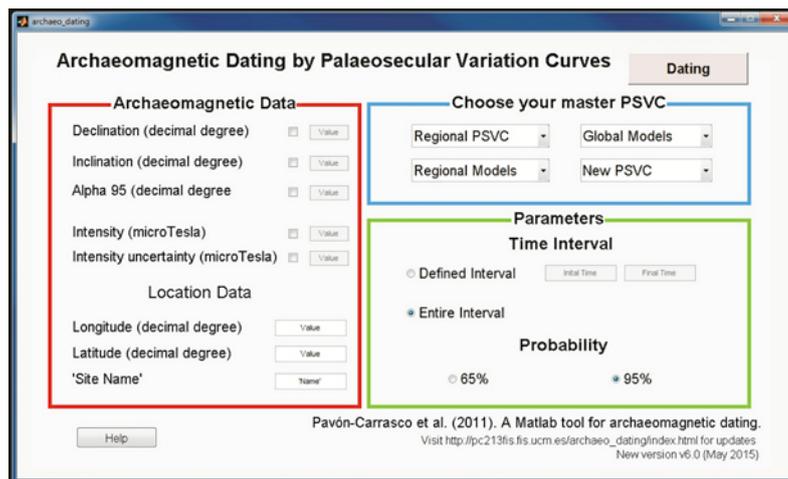
Paso 2. Para llevar a cabo la datación no basta solo con los valores medios de los elementos geomagnéticos dados en el paso 1, sino que son necesarios además los errores asociados a los mismos y que vienen determinados gracias al proceso estadístico que se lleva a cabo durante el proceso de medida en el laboratorio. Para la dirección (D e I) dicho error es un ángulo y se denomina α_{95} , que corresponde a un cono de confianza alrededor del valor medio de la dirección con una probabilidad del 95%. Para la intensidad (F) se usa la desviación estándar (denotada como σ_F) resultante tras medir la misma en todos los especímenes que fueron tomados del mismo horno. Para nuestro caso de estudio, dichos valores son de $\alpha_{95} = 1.0^\circ$ y $\sigma_F = 1.1 \mu\text{T}$.

Paso 3. Una vez detallados los parámetros necesarios por parte de la estructura a datar, se tiene que seleccionar la mejor curva patrón que describa la variación temporal del campo geomagnético en dichas coordenadas. En el caso que nos ocupa, es decir un horno en Bélgica cuya edad sabemos que está contenida en los últimos 3000 años, la mejor opción es sintetizar dichas curvas con el modelo regional Europeo SCHA.DIF.3k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2009) que

proporcionará la variación de la declinación, inclinación e intensidad y sus errores al 95%.

Paso 4. Después de la selección de las curvas patrón se puede proceder a la datación. En este caso se ha usado el software desarrollado por Pavón-Carrasco *et al.* (2011) que aplica la estadística de Lanos (2004) para obtener la función de probabilidad final que proporcionará la edad más probable de la estructura. El software, llamado *archaeo_dating*, se encuentra disponible en <https://earthref.org/ERDA/1134/> y funciona bajo lenguaje Matlab. En la figura 7 se muestra cómo funciona dicho programa ya que es necesario para desarrollar este ejemplo práctico.

Fig. 7. Programa de datación arqueomagnética. Se muestra la ventana interactiva del programa de datación arqueomagnética *archaeo_dating* que se usa para la práctica.



Paso 5. En el área roja de la figura 7 (se recomienda consultar la versión digital) hay que añadir los parámetros geomagnéticos de la estructura a datar, es decir, declinación (D), inclinación (I) e intensidad (F) con sus respectivos errores. Además, se incluyen las coordenadas del sitio arqueológico y el nombre de la estructura. Después, en la zona azul se selecciona la fuente de la curva patrón, que como se ha indicado es el modelo regional SCHA.DIF.3k. Hay que tener en cuenta que el software dispone de muchas más curvas locales y modelos globales/regionales pero que deben ser usados con mucha precaución (ver para más detalle Pavón-Carrasco *et al.*, 2011). Finalmente en la zona verde se elige el intervalo temporal (a veces, por consideraciones arqueológicas se puede conocer qué intervalos de edad no son posibles) y la probabilidad final de la datación con un intervalo del 65% o 95% de confianza, según se desee.

Paso 6. Una vez incluidos todos estos datos, se presiona el botón “Dating” y como salida el programa te ofrece una imagen con las diferentes comparaciones estadísticas para cada elemento geomagnético, así como un mapa de la localización del sitio arqueológico y la función de probabilidad final para la edad de la estructura (Fig. 8). En el caso estudio, la edad final se establece entre los años 1019 y 1135 con un 95% de probabilidad.

Los pasos indicados anteriormente son necesarios para llevar a cabo la datación y obtener la edad más probable de la estructura.

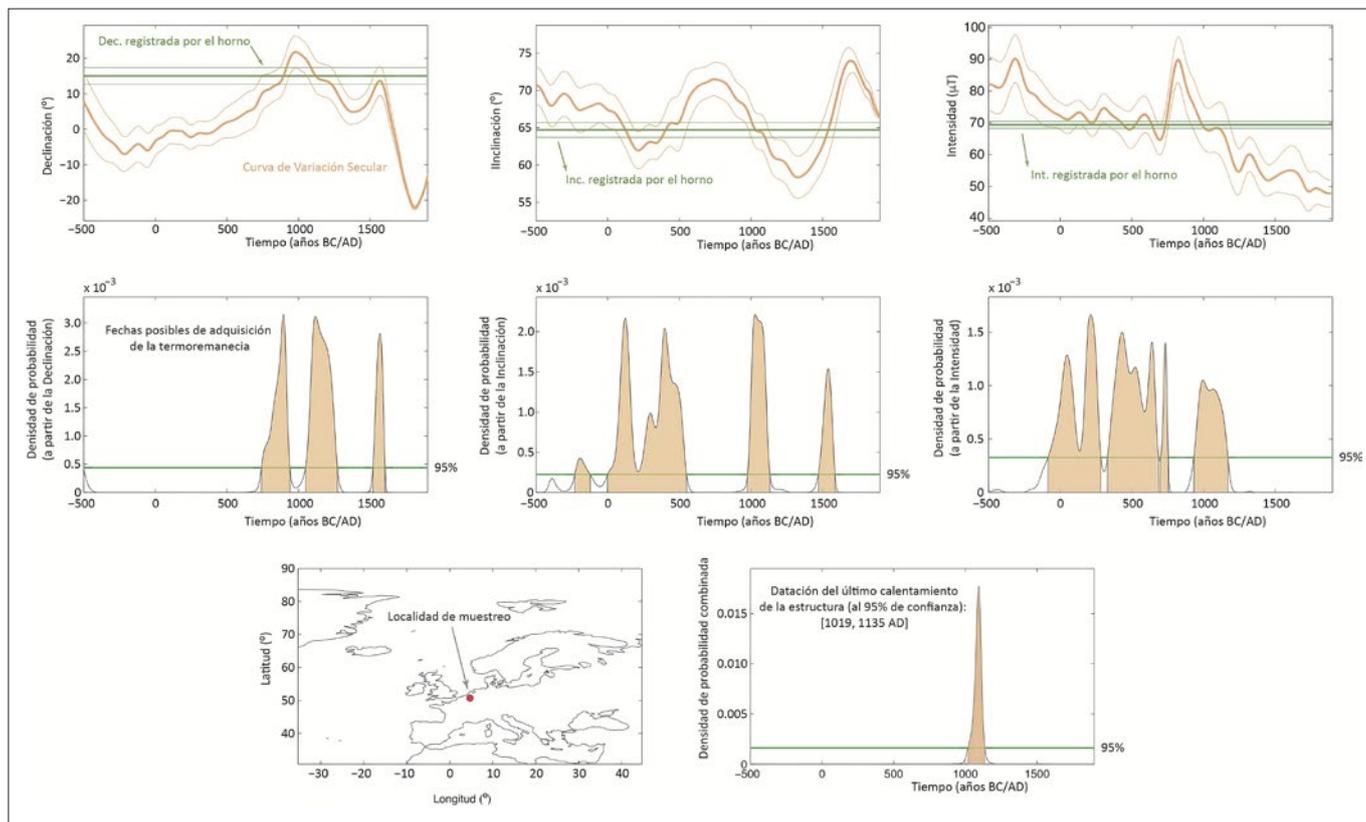


Fig. 8. Datación arqueomagnética de horno en Bélgica. En la parte superior se muestra las curvas patrones para la declinación, inclinación e intensidad (curvas rojas) con su error al 95% (bandas rojas). Además se muestra el dato que se va a datar (curva azul) con su error (bandas verdes). En el panel central se indican las diferentes funciones de probabilidad de cada elemento geomagnético. Y en la parte inferior un mapa con la localización del sitio arqueológico y la datación final. Se recomienda consultar la versión digital.

CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo resume algunos de los contenidos más básicos sobre el arqueomagnetismo. Se trata de un área de investigación multidisciplinar con importantes aplicaciones en el ámbito de la Geofísica y de la Arqueología. Por ello la enseñanza del arqueomagnetismo en cualquier nivel educativo tiene un alto potencial didáctico ya que integra varios conceptos de la Física, las Ciencias de la Tierra, la Arqueología y la Historia. Esta técnica se basa en la capacidad de algunos materiales arqueológicos sometidos a procesos de calentamiento a alta temperatura de adquirir una magnetización terromanente estable a lo largo del tiempo. Además, esta magnetización es paralela y proporcional al campo magnético externo presente en el momento de enfriamiento del material arqueológico. Por ello, a partir del estudio de la terromanencia adquirida por materiales arqueológicos de distintas edades y de una misma región se puede reconstruir las variaciones del campo geomagnético en la región correspondiente. Las curvas regionales así establecidas constituyen una potente herramienta de datación aplicable a materiales arqueológicos calentados a alta temperatura. El enfoque práctico que se presenta en el ejercicio de datación de una estructura arqueológica puede ser una herramienta útil para favorecer un aprendizaje más significativo de los distintos conceptos abordados.

BIBLIOGRAFÍA

Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Vergès, J.M. y Vallverdú, J. (2012). Assessing postdepositional processes in archaeo-

logical cave fires through the analysis of archaeomagnetic vectors. *Quaternary International*, 275, 14–22.

Carrancho, A., Villalaín, J.J., Pavón Carrasco, F.J., Osete, M.L., Straus, L.G., Vergès, J.M., Carretero, J.M., Angelucci, D.E., González Morales, R. Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M. y Carbonell, E. (2013). First directional European Palaeosecular Variation Curve for the Neolithic based on archaeomagnetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 380, 124-137.

Carrancho, A., Gogichaishvili, A., Kapper, L., Morales, J., Soler, A.M. y Tema, E. (2015). Geomagnetic applications in archeology: state of the art and recent advances. En: *New Developments in Paleomagnetism Research* (Ed. Lev. V. Eppelbaum), Nova Science Publisher.

Evans, M.E. y Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics*. Academic Press, San Diego, CA. 299 pp.

Gomez-Paccard, M., Catanzariti, G., Ruiz-Martínez, V.C., McIntosh, G., Nuñez, J.I., Osete, M.L., Chauvin, A., Lanos, P., Tarling, D.H., Bernal-Casasola, D. y Thiriot, J., "archaeological working group" (2006a). A catalogue of Spanish archaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 166, 1125-1143.

Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M.L., Catanzariti, G., Ruiz-Martínez, V.C. y Nuñez, J.I. (2006b). The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula. Comparison with other data from Western Europe and with global geomagnetic field models. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7, 1-20, Q12001.

Gómez-Paccard, M. y Beaud, E. (2008). Recent achievements in archaeomagnetic dating in the Iberian Peninsula: Application to four Spanish structures. *Journal of Archaeological Science*, 35, 1389-1398.

Gómez-Paccard, M., McIntosh, G., Chauvin, A., Beaud, E., Pavón-Carrasco, F.J. y Thiriot, J. (2012). Archaeomagnetic and rock magnetic study of six kilns from North

Africa (Tunisia and Morocco). *Geophysical Journal International*, 189, 169-186.

Hroudá, F., Müller, P. y Hanák, J. (2003). Repeated progressive heating in susceptibility vs. temperature investigation: A new palaeotemperature indicator? *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 653-657.

Jackson, A., Jonkers, A.R.T. y Walker, M.R. (2000). Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 358, 957-990.

Lanos, Ph. (2004). Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism. En: *Tools for constructing chronologies: crossing disciplinary boundaries*. Eds.: C. Buck y A. Millard, vol. 177, 43-82, Springer-Verlag, London.

Linford, N.T. y Platzman, E. (2004). Estimating the approximate firing temperature of burnt archaeological sediments through an unmixing algorithm applied to hysteresis data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 147 (2-3), 197-207.

Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. y Gaya-Piqué, L.R. (2009). A regional archaeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: applications to archaeomagnetic dating. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, Q03013, doi: 10.1029/2008GC002244.

Pavón-Carrasco, F.J., Rodríguez-González, J., Osete, M.L. y Torta, J.M. (2011). A matlab tool for archaeomagnetic dating. *J. Archaeol. Sci.*, 38(2), 408-419.

Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. y De Santis, A. (2014). A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 388, 98 - 109.

Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Campuzano S., McIntosh, G. y Martín-Hernandez, F. (2015). Recent Developments in Archeomagnetism: The Story of the Earth's past magnetic field. En: *New Developments in Paleomagnetism Research*. Ed.: Lev. V. Eppelbaum. Nova Science Publisher.

Spassov, S., Hus, J., Geeranerts, R. y Heller, F. (2008). Archaeomagnetic dating of a High Middle Age likely iron working site in Corroy-le-Grand (Belgium). *Phys. Chem. Earth*, 33, 544-556.

Tauxe, L. (1998). *Paleomagnetic Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Thellier, E. y Thellier, O. (1959). Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de Geophysique*, 15, 285-376.

Villalaín Santamaría, J.J. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. Fundamentos del Paleomagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, xxx-xxx. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 15 de junio y aceptado definitivamente para su publicación el 4 de agosto de 2016.