

Identificación de episodios climáticos fríos mediante el registro de susceptibilidad magnética en la secuencia lacustre del *maar* del Fuentillejo (Ciudad Real)

Identification of cold events using the magnetic susceptibility record from Fuentillejo maar-lake sequence (Ciudad Real, Spain)

L. Galán¹, J. Vegas¹, J.L. Gallardo-Millán², M.B. Ruiz-Zapata³,
M.J. Gil-García³, J.E. Ortiz⁴, L. Moreno⁴, A. García-Cortés¹ y T. Torres⁴

1. Instituto Geológico y Minero de España - IGME. Ríos Rosas 23, 28003-Madrid. l.galan@igme.es, j.vegas@igme.es, garcia.cortes@igme.es
2. Dpto. Ingeniería Geológica y Minera, Universidad Castilla-La Mancha. Plaza Manuel Meca 1, 13400 Almadén, Ciudad Real. JoseLuis.GMillan@uclm.es
3. Departamento Geología, Edificio de Ciencias, Universidad de Alcalá de Henares. 28871 Alcalá de Henares (Madrid). blanca.ruiz@uah.es
4. ETSI de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Ríos Rosas 21, 28003 Madrid. joseeugenio.ortiz@upm.es, trinidad.torres@upm.es

Resumen: El *maar* de Fuentillejo está localizado en la Región Volcánica Central de Campo de Calatrava (Ciudad Real). Desde su inicio se ha comportado como un sistema cerrado y presenta una potencia total de 142 m de sedimentos lacustres, organizados en 23 unidades sedimentarias. Se ha realizado un estudio de la susceptibilidad magnética y densidad aparente de los sedimentos, mediante un equipo de testificación *multisensor Geotek*. Para obtener la edad del registro se han efectuado dataciones absolutas mediante radiocarbono, U-Th y con el estudio de polaridad magnética, obteniéndose un modelo de edad que permite datar el sondeo FUENT-1 en torno a los 350 ka. Los datos del registro de susceptibilidad magnética, junto con las dataciones efectuadas, permiten identificar una secuencia de eventos erosivos relacionados con los últimos estadios glaciares (LGM: Último Máximo Glaciar y los estadios isotópicos MIS 6 y 8). El registro de susceptibilidad magnética se encuentra atenuado por procesos de disolución de los óxidos de Fe-Ti.

Palabras clave: Paleomagnetismo, multisensor Geotek, susceptibilidad magnética, lago en *maar*.

Abstract: The Fuentillejo *maar* is located in the Central Spanish Volcanic Field of Campo de Calatrava (Ciudad Real). Fuentillejo *maar-lake* was a closed system where up to 142 m depth of lacustrine sediments were deposited. Magnetic susceptibility and bulk density were measured by a GEOTEK multisensor core logger. The chronological framework was constructed based on radiocarbon and U-Th methods, as well as a detailed study of magnetic polarity, yielding an age model that covers last 350 ka. Intervals with terrigenous sediments correspond to high magnetic susceptibility values. These intervals were correlated with erosive events during the Last Glacial Maximum and the MIS 6 and 8 isotopic stages. The record of magnetic susceptibility is attenuated by dissolution processes of Fe-Ti oxides.

Key words: Paleomagnetism, GEOTEK multisensor core logger, magnetic susceptibility, *maar-lake*.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las propiedades físicas de los sedimentos lacustres resulta de gran interés debido a la estrecha relación que tienen con los cambios climáticos ocurridos a escala regional. El objetivo de este trabajo consiste en el análisis de alta resolución de las propiedades físicas del registro lacustre del *maar* de Fuentillejo, en el que se ha perforado el sondeo FUENT-1, de 142,4 m de profundidad (Vegas et al., 2006).

Esta laguna está situada al SO de Valverde de Calatrava (Ciudad Real), en la región volcánica de

Campo de Calatrava (Fig. 1). Tiene un diámetro de 400 m y una lámina de agua estacional que no supera los 0,5 m. Contiene aguas de composición hipersalina y es un sistema cerrado (Vegas et al., 2010), de ahí su interés para el estudio de los cambios ambientales que han tenido lugar en el sector central de la Península Ibérica durante el Pleistoceno superior y Holoceno.

METODOLOGÍA

Los testigos recuperados del sondeo FUENT-1 (más del 95% del total), se han conservado en una cámara refrigerada a 4°C. Para su descripción han sido divididos mediante una guillotina electroosmótica, definiéndose 23 unidades sedimentarias (Figura 2) (Vegas et al., 2006).

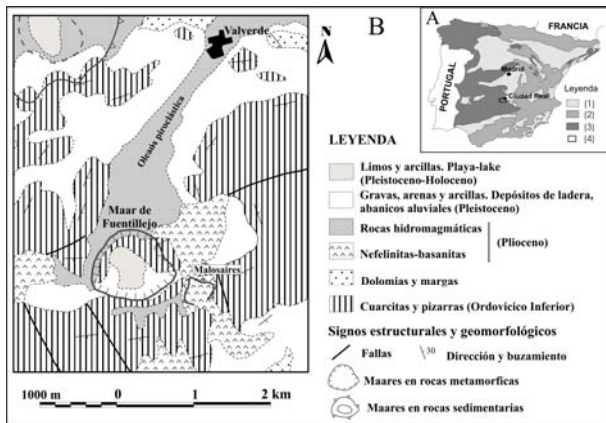


FIGURA 1. A. Mapa de situación en la Península Ibérica. B. Mapa geológico del maar de Fuentillejo, Ciudad Real (Simplificado de Portero et al., 1988).

La medida continua de propiedades físicas se ha realizado con *Multisensor Core Logger* Geotek (Laboratorios IGME), con los sensores de densidad aparente (Da) y susceptibilidad magnética (SM). El sensor de densidad consta de una fuente de ^{137}Cs que emite un haz de rayos γ a 662 keV. El dispositivo mide cuentas por segundo (cps), que al procesarse se transforman en valores de Da (g/cm^3) o *gamma bulk density*. La SM estima la concentración de minerales magnetizables por unidad de volumen (*Volume Susceptibility*, k). El equipo dispone de dos sensores *Bartington*: anular **MS2C** para los testigos enteros y puntual de contacto **MS2E**, para los seccionados.

Se han tomado 54 muestras dobles a lo largo de todo el sondeo para el estudio de polaridad magnética. Los análisis de la Magnetización Remanente Natural se han realizado en el laboratorio de paleomagnetismo del Instituto de Ciencias de la Tierra «Jaume Almera» (CSIC). Las muestras (cajas 2x2 cm) se midieron en un magnetómetro superconductor 2G SRM755R, tras ser desmagnetizadas con campos alternos y mediante calentamiento, siguiendo una pauta de desmagnetización progresiva (Gallardo-Millán et al., 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las 23 unidades sedimentarias reflejan los cambios en los aportes detríticos, la química de las aguas y los componentes orgánicos a lo largo de la historia del lago (Fig. 2). El comienzo de la sedimentación estuvo dominado por aportes detríticos (unidades 1, 2, 3 y 4), que corresponden con episodios erosivos de las laderas interiores del cráter después de la erupción volcánica. Estos sedimentos alternan con ritmitas detríticas en un fondo anóxico (unidades 2 y 4). Las unidades 5 y 6 suponen un cambio en la dinámica y química lacustres, con la sedimentación de ritmitas con materia orgánica y carbonatos micríticos. La unidad 7 representa un periodo erosivo, muy similar a las unidades 1 y 3. Este tipo de eventos se repiten en

las unidades 9 y 11. Las unidades 8, 10, 12, 13 y 14 son típicas de ambiente profundo, con una sedimentación finamente laminada en condiciones anóxicas (ritmitas orgánicas y carbonáticas), con intercalaciones detríticas de poco espesor. La unidad 15 es evaporítica, con una elevada salinidad y la disminución de la lámina de agua. La unidad 16 marca un nuevo cambio brusco y rápido hacia ambiente de lago profundo. Los sedimentos de la unidad 16 y 17 están finamente laminados. La unidad 18 es una capa de sapropel de más 20 m de potencia, indicativa de un medio lacustre profundo meromórfico. Estas facies anóxicas profundas favorecieron la preservación de la materia orgánica. Estos hechos se repitieron de nuevo en la unidad 20. Por último, las unidades 21, 22 y 23 corresponden con una sedimentación de ambientes más someros, para los últimos 46 ka Cal BP. Hay una alternancia de periodos lacustres con periodos palustres, con frecuentes exposiciones subaéreas. La unidad 23 corresponde al registro sedimentario desde el Último Máximo Glaciar y el Holoceno. Durante este intervalo hubo un aporte importante de sedimentos detríticos.

Las dataciones realizadas (Tablas I y II) han permitido establecer un modelo de edad-profundidad basado en la interpolación lineal entre la media de las edades calibradas (Vegas et al., 2010). El estudio paleomagnético pone de manifiesto que todo el registro de FUENT-1 se encuentra dentro del *chron* Brunhes (1n) con polaridad normal. Sin embargo, se detectan excursiones con inversiones de la polaridad que se han descrito anteriormente (p.e. Hirokuni, 2005). La primera de ellas (41,57 a 50 m) correspondería al evento *Blake*, con una edad de 115-122 ka. La segunda (135,90 a 141,86 m) está asociada con el evento *Calabrian Ridge 1* de 310-320 ka.

Prof. m	Muestra	Años ^{14}C B.P.	Años Cal BP
6,75	Beta-190136	16540±90	20240-19210
16,91	Beta-190140	30880±360	36780-35260
18,40	Beta-177581	42620±1490	49230-43313

TABLA I. Dataciones de radiocarbono. Edades calibradas B.P. 2 sigma al 95% de probabilidad, con el programa CalPal, versión Mayo 2005 (Cologne Radiocarbon Calibration Palaeoclimate Research Package, www.calpal.de).

	61.15 m	62.00 m
U-238	0.06	0.06
Th-232	0.07	0.04
U-234/U-238	1.29+/-0.06	1.19+/-0.06
Th²³⁰/Th²³²	2.620+/-0.193	3.788+/-0.309
Th²³⁰/U²³⁴	0.71+/-0.04	0.79+/-0.04
EDAD	125705+12962/-11688	155731+19441/-16659

TABLA II. Dataciones radiométricas mediante U-Th en nahcolita. Realizadas en el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera-ICTJA-CSIC.

Los registros de SM (Fig. 2) presentan una precisión superior al de otras variables discretas. Sin embargo, en ocasiones se halla distorsionado por los cambios diagenéticos sufridos por los sedimentos de la laguna de Fuentillejo (Galán et al., 2009). La SM varía entre 0 y 374×10^{-5} SI y se han establecido tres clases:

SM-1: 374 a 100×10^{-5} SI. Predominan minerales ferri y paramagnéticos en los sedimentos limosos siliciclásticos de ambientes lacustres óxicos de la unidad 23. Son los valores más altos de SM (Fig. 2), estableciéndose una relación entre los procesos erosivos y la concentración de minerales magnéticos detríticos. En Fuentillejo los procesos eólicos y los abanicos aluviales son los principales responsables del aporte de la fracción lítica a los sedimentos. Esta clase se correlaciona con episodios erosivos relacionados con los periodos más fríos y áridos.

SM-2: 50 a 100×10^{-5} SI. Valores moderados a bajos con predominio de minerales paramagnéticos. Se encuentran en los sedimentos carbonáticos (dolomicritas) masivos y capas de nahcolita de ambiente con muy baja lámina de agua o de tipo *mud-flat*, también en las unidades con dolomicritas laminadas de alta lámina de agua. Se asocian a una reducción de los procesos erosivos en la cuenca de drenaje, con bajo aporte de minerales magnéticos, clima árido-cálido y sedimentación carbonática en la laguna.

SM-3: $<50 \times 10^{-5}$ SI. Predominan los minerales diamagnéticos. Se encuentran en los sapropelas limosos y sedimentos laminados de ambientes meromícticos y reductores. Los valores muy bajos se deben a la disolución de los óxidos de Ti-Fe detríticos en condiciones reductoras durante la diagénesis temprana.

CONCLUSIONES

1.- Los máximos valores de SM se encuentran en la unidad 23 (LGM y Holoceno) y están relacionados con una buena preservación en los sedimentos detríticos de los óxidos de Fe-Ti, procedentes de la erosión de rocas en la cuenca de drenaje.

2.- En el intervalo de 18 a 78 m (unidades 22 a 13). La señal de SM es muy baja y no permite establecer correlaciones con claridad. Esto se debe a la presencia de materiales carbonatados, evaporíticos y sapropélicos y a la disolución de los óxidos de Fe-Ti durante la eodiagénesis.

3.- Desde los 78 m hasta la base del sondeo (unidades 12 a 1), hay intervalos más elevados de SM, así como frecuentes hiatos y la pérdida de textura original en los niveles de arenas durante las operaciones de perforación. Los valores más altos de SM de las unidades inferiores (1 a 3) se podrían correlacionar con

los episodios más fríos y áridos de los estadios isotópicos marinos (MIS) 6 y 8, durante los cuales se produjo una reactivación de los procesos erosivos en la cuenca de drenaje (Fig. 2).

AGRADECIMIENTOS

Proyectos CGL2004-06212/BTE y CGL2008-06042 del Plan Nacional de Investigación y proyecto interno del IGME "Estudio paleoclimático del Maar de Fuentillejo" (CC 54.020).

REFERENCIAS

- Cande, S.C. y Kent, D.V. (1995): Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic. *Journal Geophysical Research*, 97: 13917-13951.
- Channell, J.E.T. (2006): Late Brunhes polarity excursions (Mono Lake, Laschamp, Iceland Basin and Pringle Falls) recorded at ODP site 919 (Irminger Basin). *Earth and Planetary Science Letters*, 244: 378-393.
- Galán, L., Vegas, J. y García-Cortés, A. (2009): Reconstrucción paleoclimática del centro de la Península Ibérica durante los últimos 50 ka cal. BP, a partir de los datos físicos y geoquímicos del registro lacustre del maar de Fuentillejo (Campo de Calatrava, Ciudad Real). *Geogaceta*, 46: 119-122.
- Gallardo-Millán, J.L., Vegas, J., García-Cortés, A. L., Galán, L., Pérez-González, A. y Martín-Serrano, A. (2008): Primeros resultados del estudio magnetoestratigráfico del registro lacustre del maar de Fuentillejo (Región volcánica del Campo de Calatrava, Ciudad Real). Implicaciones cronológicas. *Geo-Temas*, 10: 245-248.
- Hirokuni, O. (2005): Recurrent geomagnetic Excursions: a review for the Brunhes normal polarity chron. *Journal of Geography*, 114: 174-193.
- Petit, J. R., Jouzel, J. D., Raynaud, N., Barkov, I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., M., Kotlyakov, V., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. y Stievenard, M. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.
- Portero, J.M., Ramírez, J.I., Ancochea, E. y Pérez-González, A. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 784 (Ciudad Real)*. IGME, Madrid.
- Vegas, J., García-Cortés, A., Galán, L., Pérez-González, A. y Martín-Serrano, A. (2006): El registro sedimentario lacustre del maar de Fuentillejo (Ciudad Real). *Boletín Geológico y Minero*, 117: 339-349.
- Vegas, J., Ruiz-Zapata, B., Ortiz, J.E., Galán, L., Torres, T., García-Cortés, A., Gil-García, M.J., Pérez-González, A. y Gallardo-Millán, J.L. (2010):

Identification of arid phases during the last 50 ka cal BP from the Fuentillejo maar lacustrine record (Campo de Calatrava Volcanic Field, Spain). *Journal of Quaternary Science*, 25: 1051-1062.

Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E. y

Labracheri, M. (2002): Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21: 295-305.

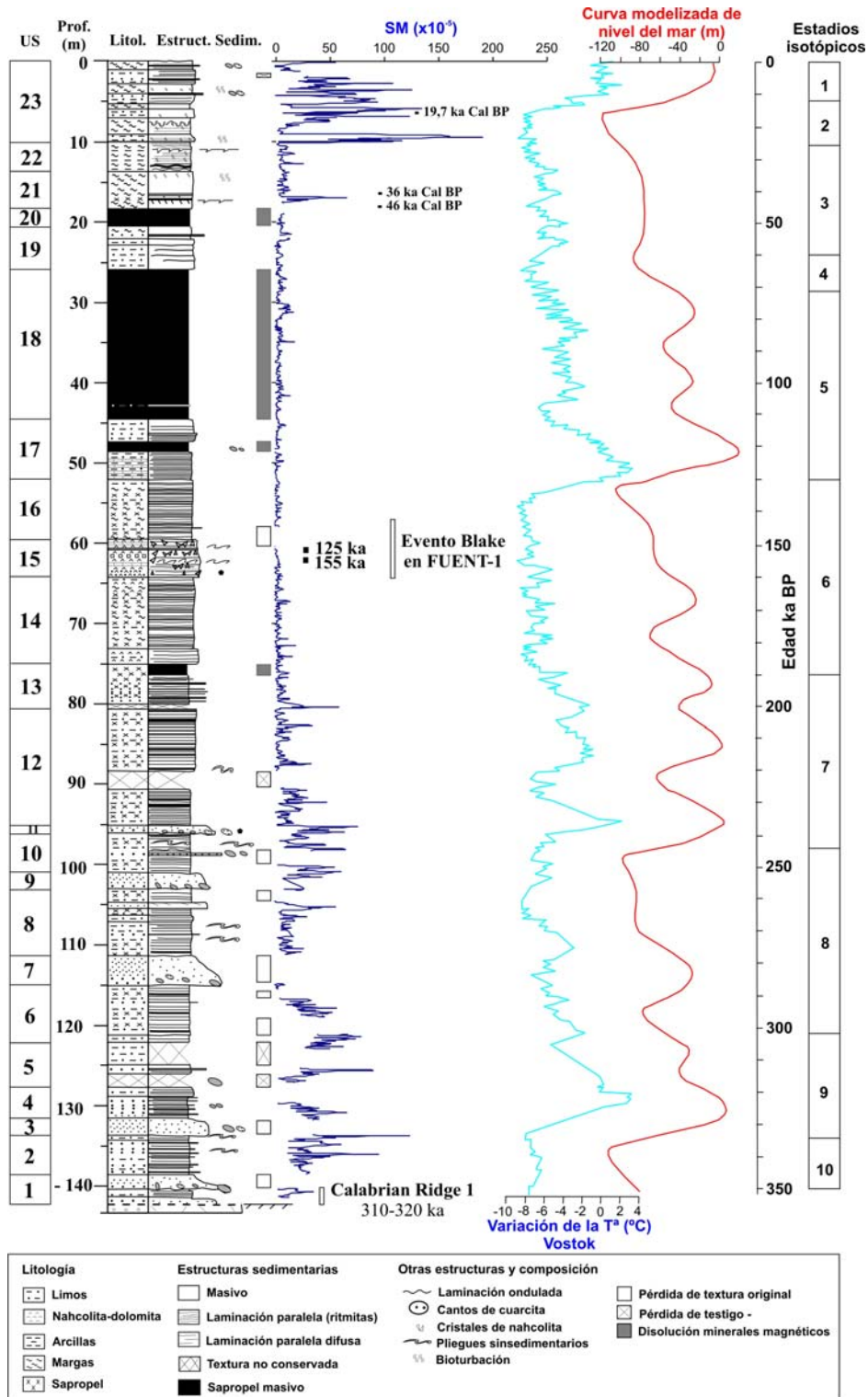


FIGURA 2: Columna del sondeo FUENT-1 de la laguna del maar de Fuentillejo (Ciudad Real). US: Unidades sedimentarias según Vegas et al. (2006). Susceptibilidad magnética (SM) en función de la profundidad. Se incluyen las excursiones paleomagnéticas de los Eventos Blake y Calabrian Ridge 1 y las edades radiométricas. Correlaciones de la SM con el registro de variación de temperatura (°C) del sondeo Vostok, Antártida (Petit et al., 1999) y la curva modelizada del nivel del mar (m) (Waelbroeck et al., 2002) con escala temporal (en ka BP).