

# 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)

*Paleoclimatic reconstruction of central Iberian Peninsula during the last 50 ka cal. BP, based on physical and geochemical data from the Fuentillejo maar lacustrine record (Campo de Calatrava, Ciudad Real)*

Luís Galán <sup>(1)</sup>, Juana Vegas <sup>(2)</sup> y Ángel García-Cortés <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> IGME. Área de laboratorios y Servicios. La Calera, 1, 28760 Tres Cantos. l.galan@igme.es

<sup>(2)</sup> IGME. Área de Investigación en Patrimonio Geológico-Minero. Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. j.vegas@igme.es, garcia.cortes@igme.es

## ABSTRACT

*Physical (magnetic susceptibility and gamma density measurements) and geochemical (TOC, Fe and Ti analysis) analysis were performed to characterize the sedimentary record in Fuentillejo maar-lake (Campo de Calatrava Volcanic Field) in order to reconstruct the paleoenvironmental evolution, which controlled deposition of different sedimentary facies. The upper 20 m of FU-1 sequence point out variations in clastic input, water chemistry and organic fraction in the lake throughout the last 50 kyr cal. BP. Magnetic susceptibility are roughly influenced by diagenetic changes in organic rich sediments.*

**Key words:** Multi-sensor core logger, magnetic susceptibility, gamma density, maar-lake, paleoclimate, Pleistocene-Holocene

*Geogaceta*, 46 (2009), 119-122

ISSN: 0213683X

## Introducción

El sondeo FU-1 (142,40 m) fue perforado en el año 2002 en la laguna del *maar* de Fuentillejo o de la Posadilla (provincia de Ciudad Real) (Fig. 1). El objetivo de este trabajo consiste en el estudio de los parámetros físicos y químicos de los sedimentos del registro FU-1 para establecer una serie de modelos sedimentológicos que expliquen la evolución paleoambiental de la región para los últimos 50 ka Cal BP. Para ello, se han empleado técnicas de correlación multivariante a los registros físicos continuos obtenidos con el testificador MSCL-Geotek y otras variables discretas (geoquímicas y sedimentológicas) para los testigos de los 20 m iniciales del registro lacustre de FU-1 (Galán *et al.*, 2007; Galán, 2008). Este equipo es un referente a nivel mundial para la obtención de forma continua, no destructiva y automática de parámetros geofísicos en testigos de sondeos (Rothwell, 2006).

## Situación geográfica y geológica

El *maar* de Fuentillejo se localiza al suroeste de Valverde de Calatrava (Ciudad

Real) (Fig. 1), en la Región Volcánica de Campo de Calatrava (CCVA). El volcanismo de CCVA se desarrolla, al menos, en dos fases (Ancochea, 1983). La primera durante el Mioceno superior (8,7-6,4 Ma) fue de carácter ultrapotásico; mientras que durante la segunda (4,7-1,75 Ma) fue un volcanismo alcalino y ultraalcalino. Esta etapa, en la que se encuadra el episodio eruptivo de Fuentillejo, se prolonga hasta el Pleistoceno inferior (1,3 Ma), aunque los datos magnetoestratigráficos la extienden, al menos, hasta los 0,7 Ma (Gallardo-Millán, 2005). Los *maares* son una de las manifestaciones más frecuentes del volcanismo y en sus cráteres se forman las numerosas lagunas y registros lacustres de esta región (González-Cárdenas *et al.*, 2002; Martín-Serrano *et al.*, 2009).

La erupción freatomagmática que originó este *maar* tuvo lugar entre pizarras y cuarcitas del Ordovícico inferior en la Sierra de Medias Lunas, formándose un cráter y una oleada piroclástica de 4 km de longitud (Fig. 1). El *maar* de Fuentillejo tiene un diámetro externo de 1.400 m e interno de 450 m. Desde su origen, el interior del cráter alberga una laguna que ha sido un sistema cerrado.

## Metodología

El sondeo FU-1 fue perforado con una sonda Craelius D-900. La división longitudinal se realizó con guillotina de corte electrosmótico y los testigos están en cámara refrigerada a 4° C (Vegas *et al.*, 2006). El dispositivo Geotek utilizado (Laboratorios del IGME) tiene una configuración estándar, con los sensores en línea. Para este trabajo se han seleccionado los datos de densidad aparente y susceptibilidad magnética, con 1 cm de espaciado.

**Densidad aparente:** Depende de la mineralogía, cementación, materia orgánica, porosidad y contenido en agua de los sedimentos. Se determina por la atenuación de un haz de rayos gamma transmitido por una fuente encapsulada de <sup>137</sup>Cs. El haz radiactivo llega al testigo a través de un colimador y es captado por un contador que transmite valores de cps (cuentas por segundo).

**Susceptibilidad magnética relativa (K):** Para su medida directa sobre testigos seccionados, Geotek ha incorporado un dispositivo puntual MS2E de *Bartington Instruments Ltd.*, obteniéndose valores de K (x10<sup>-5</sup> SI).

**Geoquímica inorgánica de elementos mayores:** Fluorescencia de rayos-X, equipo

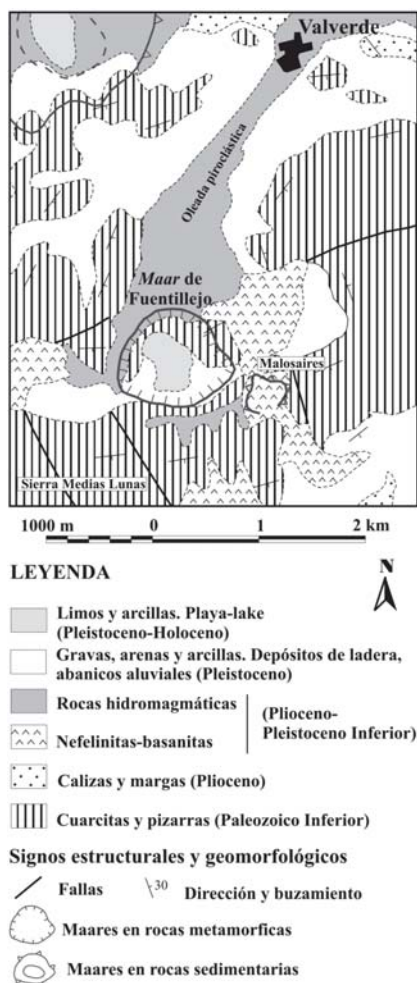


Fig. 1.- Mapa geológico de la zona del maar de Fuentillejo (simplificado de Portero et al., 1988).

Fig. 1.- Geological map of Fuentillejo maar area (simplified from Portero et al., 1988).

MagiX de PANalytical (laboratorios IGME). En este trabajo se emplean %TiO<sub>2</sub> y %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como indicadores del aporte de terrígenos.

**Contenido en carbono:** Analizador elemental ELTRA CS-800 (Laboratorios IGME). Porcentaje de carbono orgánico total (TOC) calculado por la diferencia entre el carbono total (TC) y el carbono inorgánico (TIC), mediante calcinación (2 horas a 550° C).

**Dataciones por radiocarbono:** El empleo de esta técnica es difícil, debido a la escasez de macrorrestos orgánicos en estos sedimentos lacustres. Las dataciones de radiocarbono (AMS en materia orgánica total) se realizaron en Beta Analytic Inc. (Vegas et al., 2009).

**Resultados**

**Estratigrafía:**

Se han estudiado los 20 primeros metros del registro de FU-1, que comprenden las siguientes unidades (Vegas et al., 2006) (Fig. 2):

Fig. 2.- Columna estratigráfica de los primeros 20 m del sondeo FU-1.

Fig. 2.- Stratigraphic section of the first 20 m of FU-1 core.



**Unidad 20 (20 a 18,20 m):** Limos sapropélicos de color negro, fétidos, masivos y ligeramente laminados.

**Unidad 21 (18,20 a 14,40 m):** Capas decimétricas de dolomicritas azules. En su base hay láminas centimétricas de limos sapropélicos de color negro. A techo, se identifican estructuras de bioturbación.

**Unidad 22 (14,40 a 10 m):** Capas decimétricas de margas crema, masivas y muy bioturbadas. A 11,31 m hay un nivel con grietas de desecación relleno por arcillas. En su mitad superior se observa laminación paralela. El techo está marcado por una capa de margas nodulosas.

**Unidad 23 (10 a 0 m):** Alternancia de capas métricas a decimétricas de limos arenoso-arcilloso marrones, con capas de margas gris-crema, masivas y bioturbación hacia techo. Hay dos capas de arenas con matriz limo-arcillosa con cantos de rocas metamórficas y volcánicas (4,16-4,30 m y 0,50-0,62 m).

**Parámetros físicos:**

**Susceptibilidad magnética (SM):** Varía entre 0 y 374 x10<sup>-5</sup> SI. Se han establecido tres clases:

**Clase SM-1:** K de 374 a 100 x10<sup>-5</sup>SI. Valores altos. Sedimentos con minerales ferri y paramagnéticos.

**Clase SM-2:** K de 50 a 100 x10<sup>-5</sup>SI. Valores moderados a bajos. Predominan los paramagnéticos.

**Clase SM-3:** K <50 x10<sup>-5</sup>SI. Valores muy bajos. Predominan los minerales diamagnéticos.

La clase SM-1 sólo aparece en la unidad 23 (sub-unidades 23.1, techo de 23.3, 23.5 y base de 23.7); SM- 2 caracteriza a los techos de las sub-unidades 21.1, 23.4 y 23.7, base de 23.3 y en 23.6. SM-3 se encuentra en las unidades 20, 21 y 22.

**Densidad aparente (DA):** Las medidas de DA registradas varían entre 1,2 y 2,2 g/cm<sup>3</sup>, por lo que se han establecido dos clases: DA-1, para valores altos y DA-2, para los bajos, con el límite en 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

**Geoquímica:**

**Contenido en carbono orgánico total (TOC):** Varía entre 0,1 y 5,2 %.

**Clase TOC-1:** Sedimentos con TOC >3%. Son las unidades con mayor producción orgánica.

**Clase TOC-2:** Para las unidades con un TOC comprendido entre 1,5 y 3 %.

**Clase TOC-3:** Porcentajes de TOC <1,5% con predominio de los componentes detríticos.

**Geoquímica inorgánica: Contenido en Ti y Fe.** Los porcentajes de TiO<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oscilan entre 2 a 8% y 0,40 a 1,70%, respectivamente. Experimentan una tendencia pareja a lo largo de la serie:

**Valores de TiO<sub>2</sub> >0,70% y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >4,50%.** Estos valores se asocian con la presencia de detríticos (unidades 23 y 21).

**Valores de TiO<sub>2</sub> <0,70% y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <4,50%.** Bajo contenido en óxidos metálicos y predominio de material carbonático (unidades 20 y 22).

**Geocronología:**

De las 11 dataciones se han eliminado cinco (Vegas *et al.*, 2006, 2009), puesto que sus posiciones estratigráficas sugieren que se trata de materiales antiguos removilizados. Con los datos aceptados (Tabla I) se ha efectuado un modelo de edad-profundidad basado en la interpolación lineal de las edades calibradas (Fig. 3).

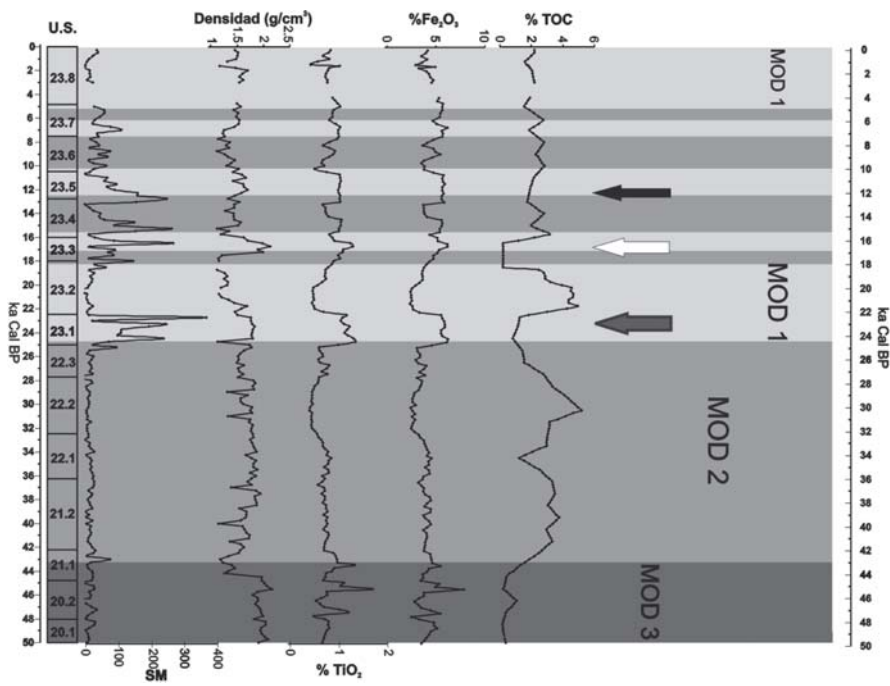
**Discusión**

Se realizó un primer análisis de correlación con las variables SM, DA, %TiO<sub>2</sub>, %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y %TOC (Tabla II) para la secuencia completa de 20 m. Los valores más altos de correlación positiva ocurren entre Fe y Ti (0,93), por su relación con las rocas volcánicas y metamórficas de la cuenca de drenaje. La SM también tiene valores de correlación relativamente altos con los óxidos de Fe(III) y Ti (0,55 y 0,52, respectivamente). Por el contrario, estas variables tienen muy baja correlación con TOC y con DA.

Posteriormente, el análisis de correlación se repitió para diferentes tramos de la serie, que coinciden con las unidades estratigráficas. Este análisis separado ha permitido discriminar tres modelos sedimentológico-ambientales.

**Modelo 1: Sedimentos limosos siliciclásticos de ambientes lacustres óxicos de lámina de agua baja.** Sub-unidades 23.1, 23.5, techo de 23.3 y base de 23.7 y tienen los valores más altos de SM (clase SM-1) (Fig. 3). Las correlaciones entre SM y los óxidos de Fe y Ti son las más altas (Tabla III). En cambio, no hay correlación, o una débil correlación negativa de estas variables con %TOC. Esto sugiere una fuerte relación entre los procesos erosivos y la concentración de minerales magnéticos detríticos (p.e. titano-magnetita). En cuencas lacustres con un área fuente muy reducida, como la de Fuentillejo, los procesos eólicos y los abanicos aluviales son los principales responsables del aporte de la fracción lítica a los sedimentos. Los valores más altos de SM y DA, junto con los bajos contenidos en TOC y las altas proporciones de terrígenos (elevados %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y %TiO<sub>2</sub>), que caracterizan a gran parte de la unidad 23, se correlacionan con episodios erosivos en la cuenca de drenaje (Galán, 2008) y están relacionados con los periodos más fríos y áridos ocurridos al final del Pleistoceno superior, como el evento Heinrich-2 (HE-2), el Último Máximo Glaciar, el HE-1 y el *Younger Dryas*, así como algunos cortos episodios fríos del Holoceno (Fig. 3).

**Modelo 2: Sedimentos carbonáticos (dolomicritas azules) de ambiente lacustre de muy baja lámina de agua o de tipo mud-**



**Fig. 3.- Registros físicos y geoquímicos del sondeo FU-1 (laguna de Fuentillejo, Ciudad Real), con indicación de los modelos sedimentario-ambientales predominantes en cada unidad estratigráfica y de los principales eventos fríos y áridos (erosivos) en la cuenca. Escala temporal según modelo edad-profundidad en ka Cal BP. Barras gris claro: Modelo 1. Barras gris intermedio: Modelo 2. Barra gris oscuro: Modelo 3. Flecha gris: HE-2; flecha blanca: HE-1 y flecha negra: *Younger Dryas*.**

*Fig. 3.- Physical and geochemical data of FU-1 core (Fuentillejo maar-lake, Ciudad Real). Sedimentary models for the stratigraphic units and the main arid and cold (erosive) events in the basin. Age scale is according to the age-depth model in kyr Cal BP. Light grey bars: Model 1. Medium grey bars: Model 2 and dark grey bar: Model 3. Grey arrow: HE-2; white arrow: HE-1 and black arrow: *Younger Dryas*.*

*flat.* Caracteriza a las unidades 21 y 22. También aparece en los techos de 21.1, 23.4 y 23.7, base de 23.3 y en 23.6 (Fig. 3). La correlación entre la SM con Fe y Ti son los más bajos (0,11 y 0,19, respectivamente) de los tres modelos establecidos (Tabla IV). También muestra una baja correlación negativa (-0,35) con el %TOC. Los porcentajes de Fe y Ti también son muy bajos. Estos factores se asocian a una reducción de los procesos erosivos en la cuenca de drenaje, con bajo aporte de minerales magnéticos, clima árido-cálido y predominio de la sedimentación carbonática en la laguna (Vegas *et al.*, 2009).

**Modelo 3: Sapropelas limosas y sedimentos laminados de ambientes meromíticos y reductores.** Caracteriza a la unidad 20 y la

sub-unidad 21.1 (Fig. 3). Tiene valores muy bajos de SM (Clase SM-3) y una correlación muy baja con el resto de variables (Tabla V), debido a que los óxidos de Ti-Fe detríticos han sido disueltos en condiciones reductoras durante la diagénesis temprana (Williamson *et al.*, 1998). Durante el rápido enterramiento de la materia orgánica se favorece la disolución de los óxidos de hierro férricos y la precipitación de minerales diagenéticos no magnéticos (p.e. pirita), como sucede en lagos eutróficos.

**Conclusiones**

La combinación de las variables físicas SM y DA con los datos sedimentológicos, geoquímicos y geocronológicos de FU-1

Prof.(m)	Muestra	años <sup>14</sup> C B.P.	años Cal B.P.	Mediana Cal B.P.
0,65	Beta-204449	1.570±40	1.540-1.360	1.450
3,22	Beta-215418	3.750±40	4.240-3.980	4.110
6,75	Beta-190136	16.540±90	20.240-19.210	19.725
14,45	Beta-190139	25.470±210	30.860-30.100	30.480
16,91	Beta-190140	30.880±360	36.780-35.260	36.020
18,40	Beta-177581	42.620±1,490	49.230-43.313	46.270

**Tabla I.- Dataciones calibradas por AMS <sup>14</sup>C en los sedimentos del registro FU-1.**

*Table I.- AMS <sup>14</sup>C calibrated ages for FU-1 sediments.*

Matriz de correlación (FU-1: 0-20 m)					
Los valores en cursiva indican p < ,05000					
Variabes	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%TiO <sub>2</sub>	%TOC	SM (Kx10 <sup>-5</sup> SI)	DA(g/cm <sup>3</sup> )
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,00				
%TiO <sub>2</sub>	<b>0,93</b>	1,00			
%TOC	-0,52	-0,60	1,00		
SM (Kx10 <sup>-5</sup> )	<b>0,55</b>	<b>0,52</b>	-0,26	1,00	
DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,02	-0,00	-0,31	-0,07	1,00

FU-1: Modelo 1, 0-10 m					
N=89					
Variabes	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%TiO <sub>2</sub>	%TOC	SM (Kx10 <sup>-5</sup> SI)	DA g/cm <sup>3</sup>
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,00				
%TiO <sub>2</sub>	<b>0,92</b>	1,00			
%TOC	<b>-0,70</b>	<b>-0,79</b>	1,00		
SM (Kx10 <sup>-5</sup> )	<b>0,55</b>	<b>0,57</b>	<b>-0,43</b>	1,00	
DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,40	0,42	<b>-0,44</b>	0,28	1,00

FU-1: Modelo 2, 10-17 m					
N=70					
Variabes	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%TiO <sub>2</sub>	%TOC	SM (Kx10 <sup>-5</sup> SI)	DA (g/cm <sup>3</sup> )
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,00				
%TiO <sub>2</sub>	<b>0,92</b>	1,00			
%TOC	-0,39	<b>-0,55</b>	1,00		
SM (Kx10 <sup>-5</sup> )	<b>0,11</b>	<b>0,19</b>	-0,35	1,00	
DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,10	-0,00	-0,03	0,10	1,00

FU-1: Modelo 3, 17-20 m					
N=30					
Variabes	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%TiO <sub>2</sub>	%TOC	SM (Kx10 <sup>-5</sup> SI)	DA (g/cm <sup>3</sup> )
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,00				
%TiO <sub>2</sub>	<b>0,92</b>	1,00			
%TOC	-0,06	0,12	1,00		
SM (Kx10 <sup>-5</sup> )	0,33	0,32	0,05	1,00	
DA (g/cm <sup>3</sup> )	0,06	-0,11	<b>-0,81</b>	-0,20	1,00

(Fig. 3) han aportado una valiosa información sobre los cambios paleoambientales ocurridos en la región durante los últimos 50 ka cal. BP y manifiestan una serie de fluctuaciones rápidas en el nivel del lago. Los registros de MSCL-Geotek, especialmente la SM, presentan una precisión superior a la de las determinaciones geoquímicas, siendo de gran utilidad para fijar los límites entre unidades estratigráficas en FU-1, aunque algunos parámetros físicos están fuertemente distorsionados por los cambios diagenéticos de los sedimentos dolomíticos y sapropélicos, debiendo ser objeto de análisis más detallados. Se ha comprobado que el parámetro SM se encuentra fuertemente controlado por procesos erosivos y eodiagenéticos sobre los minerales ferromagnéticos. Durante los periodos anóxicos se han registrado valores bajos de SM en los sedimentos sapropélicos, debido a la reducción de los óxidos de Fe(III) detríticos en la diagénesis temprana en presencia de materia orgánica.

Existe una relación directa entre los procesos erosivos en la cuenca de drenaje, una alta actividad de los abanicos aluviales y la concentración de minerales magnéticos procedentes de las rocas volcánicas y suelos en el área fuente. Están relacionados con los periodos más fríos y áridos ocurridos al final del Pleistoceno superior como el evento Heinrich-2 (HE-2), el Último Máximo Glaciar, el HE-1 y el *Younger Dryas* y algunos cortos episodios del Holoceno. En cambio, las facies carbonáticas con bajos contenidos en Fe y Ti, indican una estabilización de la cuenca de drenaje, con la reducción drástica de los procesos erosivos y la formación de dolomicritas primarias en un ambiente de baja lámina de agua y condiciones áridas, pero más cálidas.

**Agradecimientos**

Proyecto CGL2004-06212/BTE «Variabilidad climática y ambiental en el centro de la Península Ibérica durante el Cuaternario. Estudio de alta resolución del

**Tabla II Matriz de correlación multivariante para los primeros 20 m de FU-1**

*Table II: Multi-variate correlation matrix of the top 20 m of the FU-1 core*

**Tabla III.- Modelo 1. Matriz de correlación multivariante para los 10 m del techo de FU-1 (Unidad 23)**

*Table III.- Model 1. Multi-variate correlation matrix of the top 10 m of the FU-1 core (Unit 23)*

**Tabla IV.- Modelo 2. Matriz de correlación multivariante para el tramo entre 10 y 17 m de profundidad del sondeo FU-1.**

*Table IV.- Model 2: Multi-variate correlation matrix between 10 to 17 m depth of the FU-1 core.*

**Tabla V.- Modelo 3. Matriz de correlación multivariante para el tramo entre 17 y 20 m de profundidad del sondeo FU-1.**

*Table V.- Model 3: Multi-variate correlation matrix between 17 to 20 m depth of the FU-1 core.*

registro lacustre del sondeo FU-1 (laguna de Fuentillejo, Ciudad Real)». Proyecto interno IGME (CC 54.020) «Estudio Paleoclimático del Maar de Fuentillejo».

**Referencias**

Ancochea, E. (1983). *Evolución espacial y temporal del volcanismo reciente de España Central*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 675 p

Galán, L., Vegas, J. y García-Cortés, A. (2007). En: *Contribuciones al estudio del periodo Cuaternario* (J. Lario y P.G. Silva, Eds.). AEQUA, Ávila, 187-188.

Galán, L. (2008). *Aplicación del multi-sensor core logger al estudio paleoambiental del maar de Fuentillejo. Campo de Calatrava, Ciudad Real*. Trabajo de investigación, DEA, Univ. Complutense de Madrid, 60 p.

Gallardo-Millán, J.L. (2005). *Evolución geodinámica de las cuencas neógenas del Campo de Calatrava (Ciudad Real) y su relación con el volcanismo reciente*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 322 p.

González-Cárdenas, E., García, J.L., Gosálvez, R.U., Morales, M. y Peinado, M. (2002). En: *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio* (A. Pérez-González, J. Vegas y M.J. Machado, Eds.). IGME-SGE, Madrid, 395-403.

Martín-Serrano, A., Vegas, J., García-Cortés, A., Galán, L., Gallardo-Millán, J.L., Martín-Alfageme, S., Rubio, F.M., Ibarra, P.I., Granda, A., Pérez-González, A. y García-Lobón, J.L. (2009). *Sedimentary Geology*, doi:10.1016/j.sedgeo.2009.07.005

Portero, J. M.; Ramírez J. I., Ancochea, E.; Gallardo, J. y Pérez-González, A. (1988). *Mapa Geológico de España 1:50.000. Hoja nº 784 (Ciudad Real)*. IGME.

Rothwell, R.G. (2006). En: *New techniques in core analysis*. Geological Society, London, Special Publications, 267, 1-29.

Vegas, J., García-Cortés, A., Galán, L., Pérez-González, A. y Martín-Serrano, A. (2006). *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. (2009). *Journal of Quaternary Science*, DOI: 10.1002/jqs.1262

Willianson, D., Jelinowska, A., Kissel, C., Tucholka, P., Gibert, E., Gasse, F., Massault, M., Taieb, M., van Campo, E. y Wieckowski, K. (1998). *Earth and Planetary Science Letters*, 155, 205-219.