

Índice Temático

Paleomagnetismo

C.S.R. Gomes, L.G. Pereira y D. Rey:

Resultados paleomagnéticos do Maciço Alcalino de Monchique (SW de Portugal): uma interpretação. 51

V.C. Ruiz-Martínez, A. Palencia-Ortas y J.J. Villalaín:

Resultados paleomagnéticos y de ASM en sedimentos del Triásico Superior de la Meseta Occidental Marroquí y del Cretácico Superior del cráton Africano: discusión en el contexto de la evolución geodinámica mesozoica del NW de África. 85

V.C. Ruiz-Martínez, V. Villasante, G. McIntosh, I. Palencia, K. El Kadiri y A. Chalouan:

Rotaciones locales vs. Variación Secular geomagnética: resultados paleomagnéticos preliminares del magmatismo (Mioceno Medio – Superior) del Arco Bético-Rifeño en el NE de Marruecos. 87

R. Soto , J.J. Villalaín y A.M. Casas-Sainz:

Geometría extensional del sector occidental de la cuenca Vasco-cantábrica a partir de datos paleomagnéticos. 93

J.J. Villalaín, R. Soto, A.M. Casas, M.P. Mata, G. Fernández y M.F. Bógalo:

Propiedades magnéticas de sedimentos remagnetizados en cuencas mesozoicas del norte de Iberia. 95

Magnetoestratigrafía

E. Beamud, M. Garcés, M. Montes, F. Nozal, J.P. Calvo, F. López-Olmedo y J. Luengo:

Magnetoestratigrafía del Mioceno de las cuencas del Tajo y del Duero. 9

M. L. Osete, P.-R. Gialanella, J. J. Villalaín, A. Goyd, J. J. Gómez y F. Heller:

Proposed Magnetostratigraphy for the Early-Middle Toarcian. 67

A. Rodríguez-Pintó, E. L. Pueyo, A. Barnolas, A. Pocoví, J. M. Samsó y I. Gil-Peña:

Magnetoestratigrafía Cisiense-Luteciense preliminar de la cuenca surpirenaica occidental. 81

Tectónica

L. M. Agirrezabala y J. Dinarés-Turell:

Paleomagnetic, paleocurrent and structural data as indicators of vertical-axis block rotations in the northern margin of the Basque-Cantabrian Basin. 1

M. Garcés y J. Gee:	
<i>Low-angle faulting and footwall rotation at the mid-Atlantic ridge</i>	43
I. Gil-Peña, B. Oliva, E. L. Pueyo y A. Barnolas:	
<i>Datos preliminares de la remagnetización Estephaniense del Ordovícico Superior del Pirineo Centro-meridional; implicaciones estructurales.</i>	47
E. L. Pueyo, M. A. López, B. Oliva, A. J. Sussman, J. C. Larrasoña, J. Dinarés, B. Beamud, R. Soto, M. Garcés, I. Gil-Peña, A. Rodríguez, Y. Almar, O. Fernández, J. J. Villalaín, M. Calvo, M. F. Bógalo, E. Costa, T. Mochales, O. Vidal, O. Pueyo-Anchuela, M. T. Román, A. Gil-Imaz, J. Navas and the GeoKin3DPyr group from the INTERREG IIIb- Pyrenean Network:	
<i>A preliminary compilation of the Pyrenean Paleomagnetic Database.</i>	73

Fábricas

B. Antolín Tomás, A. M. Casas, T. Román Berdiel, I. Gil Peña, B. Oliva y R. Soto:	
<i>Comparación entre la fábrica magnética y la fábrica obtenida a partir del análisis de imagen en el Plutón de Marimanha (Pirineo).</i>	5
H. Sant’Ovaia:	
<i>Fabrics magnéticos em granitos variscos da Zona Centro-Ibérica.</i>	89

Arqueomagnetismo

M. Calvo, D. Sologashvili, A. Goguitchaichvili, M. F. Bógalo, A. Carranco, J. J. Villalaín y G. Maisuradze:	
<i>Estudio paleomagnético del yacimiento paleoantropológico de Dmanisi (Georgia).</i>	13
A. Carranco, J. J. Villalaín y R. Soto:	
<i>Nuevas estrategias de muestreo arqueomagnético en sedimentos blandos de cuevas.</i>	15
A. Carranco, J. J. Villalaín, J. Vallverdú, D. E. Angelucci y J. M ^a Vergès:	
<i>Resultados arqueomagnéticos en sedimentos holocenos quemados de los yacimientos arqueológicos de la Sierra de Atapuerca.</i>	17
Ll. Casas, R. Risch, D. Gómez y J. Shaw:	
<i>Son Fornés archaeointensities, an example of the microwave use, a new tool for palaeointensity research.</i>	19
G. Catanzariti, G. McIntosh, E. D. Martínez, A. M. Monge Soares y M. L. Osete López:	
<i>Archaeomagnetic dating study of the vitrified wall at the Late Bronze Age settlement of Misericordia (Serpa, Portugal).</i>	23
M. Gómez-Paccard, A. Chauvin, Ph. Lanos, G. McIntosh, M.L. Osete, G. Catanzariti, V.C. Ruiz-Martínez y J.I. Núñez:	
<i>The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula.</i>	55

Magnetismo Ambiental

R. Coimbra, D. Rey, K. Mohamed y Federico Vilas:

Variação secular em sedimentos dos últimos 40 ka da margem Atlântica da Galiza: ambiente sedimentar e registo direccional do campo geomagnético. 25

R. Coimbra, D. Rey, K. Mohamed, F. Vilas y T. Frederichs:

Detecção de eventos de Heinrich através do estudo das propriedades magnéticas de sedimentos do Plistoceno Superior e Holoceno da Margem Ibero Atlântica. 29

A. F. Davila:

Superparamagnetic magnetite as part of the animal magnetic sense. 33

A. F. Dávila:

Biogenic magnetic crystals as fossil biomarkers on Mars (Charla Invitada). 35

R. Devesa, M.T. Barral y F. Díaz-Fierros:

Magnetismo ambiental y contaminación antropogénica en el río Anllóns (Galicia). Estudio preliminar. 39

C.S.R. Gomes, A.F. Rocha, D. Rey y LF. Neves:

Monitorização da matéria particulada: um estudo na cidade de Coimbra (Portugal). 53

T. Mochales, E.L. Pueyo y A.M. Casas:

Prospección magnética de estructuras kársticas en zonas periurbanas; un método eficaz para la elaboración de mapas de riesgos. 59

K. Mohamed, D. Rey, B. Rubio y F. Vilas:

Evolución magnetoambiental del sector sur de la plataforma continental gallega desde el LGM. 63

D. Rey, B. Rubio, K. Mohamed, R. Coimbra, F. Vilas, B. Alonso y G. Ercilla:

El registro magnetoambial de los cambios paleoclimáticos de los últimos 30.000 años en el Marge Atlántico de Galicia. 77

J.J. Villalaín y M.P. Mata:

Propiedades magnéticas de concreciones carbonatadas ligadas a escapes de gases en el talud continental del Golfo de Cádiz. 97

Paleomagnetic, paleocurrent and structural data as indicators of vertical-axis block rotations in the northern margin of the Basque-Cantabrian Basin

L. M. Agirrezabala (*), J. Dinarés-Turell (**)

(*) Estratigrafía eta Paleontología Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea, 644 P.K. Bilbo, l.agirrezabala@ehu.es

(**) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma, Italy

ABSTRACT

New consistent paleomagnetic, paleocurrent and structural data from turbiditic deposits around the Late Albian Aitzeta monoclinal syncline (northern margin of the Basque-Cantabrian Basin) indicate that Late Albian *C. auritus* Subzone and Tertiary (?) vertical-axis block rotations took place. Data evidence 27° of counterclockwise rotation (Deba block) during *C. auritus* Subzone, and 27° and 55° of counterclockwise (Galdonamendi and Mizkia blocks, respectively) and 40° of clockwise (Andutz block) rotations during Tertiary (?).

Key words: Block rotation, paleomagnetism, paleocurrents structure, Basque-Cantabrian Basin.

RESUMEN

Nuevos datos paleomagnéticos, de paleocorrientes y estructurales correspondientes a depósitos turbidíticos en torno al monocinal sinclinal de Aitzeta (margen norte de la Cuenca Vasco-Cantábrica) indican rotaciones de eje vertical de bloques de edad Albiense superior (Subzona *C. auritus*) y terciarias (?). Los datos evidencian una rotación antihoraria de 27° (bloque de Deba) durante la Subzona *C. auritus*, y rotaciones antihorarias de 27° y 55° (bloques de Galdonamendi y Mizkia, respectivamente) y horarias de 40° (bloque de Andutz) de edad terciaria (?).

Introduction

The Cretaceous northern margin of the Basque-Cantabrian Basin (Fig. 1) was located on the southwestern European plate margin, which was created by oblique opening of the Bay of Biscay rift. This rift margin was affected by major sinistral strike-slip deformation (e.g. Choukroune and Mattauer, 1978), which included the development of short-lived compressional tectonic structures like Aitzeta. Posterior Tertiary (Eocene) basin inversion caused northeastward thrusting and folding.

The Aitzeta monoclinal syncline is a Late Albian *C. auritus* Subzone deep-water transpressional fold associated to Mutriku fault (Agirrezabala et al., 2002, 2003) (Fig. 2). Anomalous preliminary paleocurrent data from adjacent pre-*auritus* turbidites (Agirrezabala, 1996) suggested possible counterclockwise vertical-axis rotation of the Deba block that would explain the Aitzeta contraction structure formation. With the object of proving possible *auritus* Subzone (syngrowth) vertical-axis rotations we acquired and analysed new paleomagnetic, paleocurrent

and structural data from pre- and post-*auritus* deposits of different domains around that structure.

Geological setting

The Black Flysch Group (Middle Albian - Middle Cenomanian) constitutes a deep-water siliciclastic unit deposited along the Pyrenean realm and northern margin and centre of the Basque-Cantabrian Basin (Souquet et al., 1985). In the northern margin of the basin northeast-derived small, confined turbidite systems filled sub-basins with faulted and folded

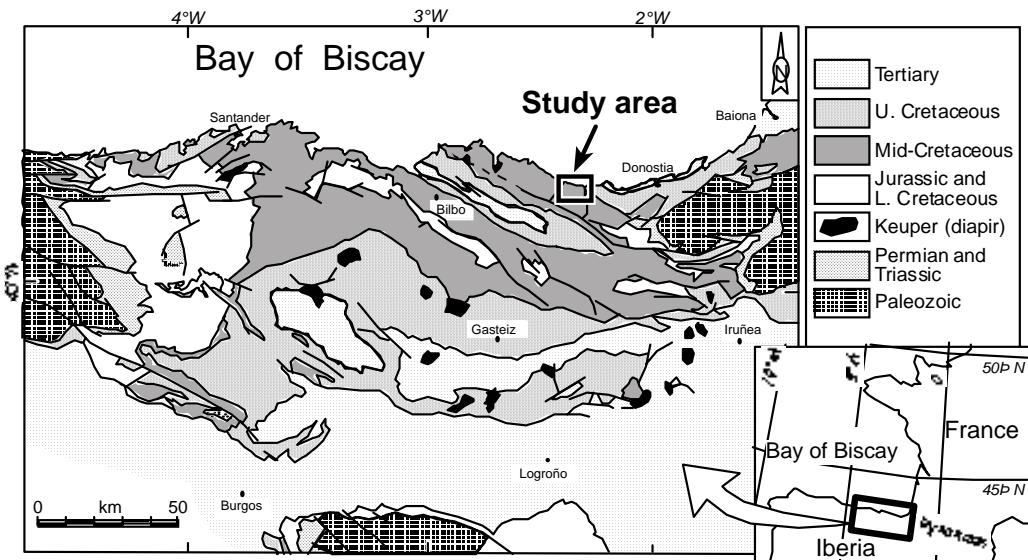


Fig. 1. Geological map of the Basque-Cantabrian Basin and indication of study area

Fig. 1. Mapa geológico de la Cuenca Vasco-Cantábrica e indicación del área de estudio

borders. Turbiditic dispersion systems and paleocurrents were parallel to confining tectonic structures (N40E and N110-120E) (e.g. Agirrezabala and García-Mondéjar, 1994; Agirrezabala, 1996). One of these confining structures corresponds to the Mutriku fault and associated Aitzeta monoclonal syncline.

Detailed stratigraphic, sedimentologic and structural data and very accurate ammonite-based datations of syntectonic deposits associated with the Aitzeta monoclonal syncline allow characterise the evolution of this structure. It constitutes a deep-water, fault-related transpressive fold that grew during ~1.3 My, Late Albian *auritus* Subzone, on the footwall of the right-hand reverse Mutriku fault. Two-phase growing caused overturning and denudation of the fold limb adjacent to Mutriku fault (Agirrezabala et al., 2002, 2003).

Data collection

A total of 80 samples for paleomagnetic study were collected from 9 sites corresponding to Black Flysch Group deposits (lutites and siderites); 4 of them are constituted of pre-*auritus* rocks and 5 of post-*auritus* rocks (Fig. 2). Besides our new data, Vandenberg's (1980) datum from Deba locality has been considered.

A total of 220 paleocurrents distributed in 11 sites were measured from sole mark structures (flute, prod, groove, bounce, crescent, skip casts). They were collected from both pre- and post-*auritus* sandstone turbidites east to Mutriku fault (Fig. 2).

Structural data supporting block rotations are mainly based on geological maps of 1:25.000 (Agirrezabala 1996, Agirrezabala et al., 2002) and 1:5000 scales (inedit).

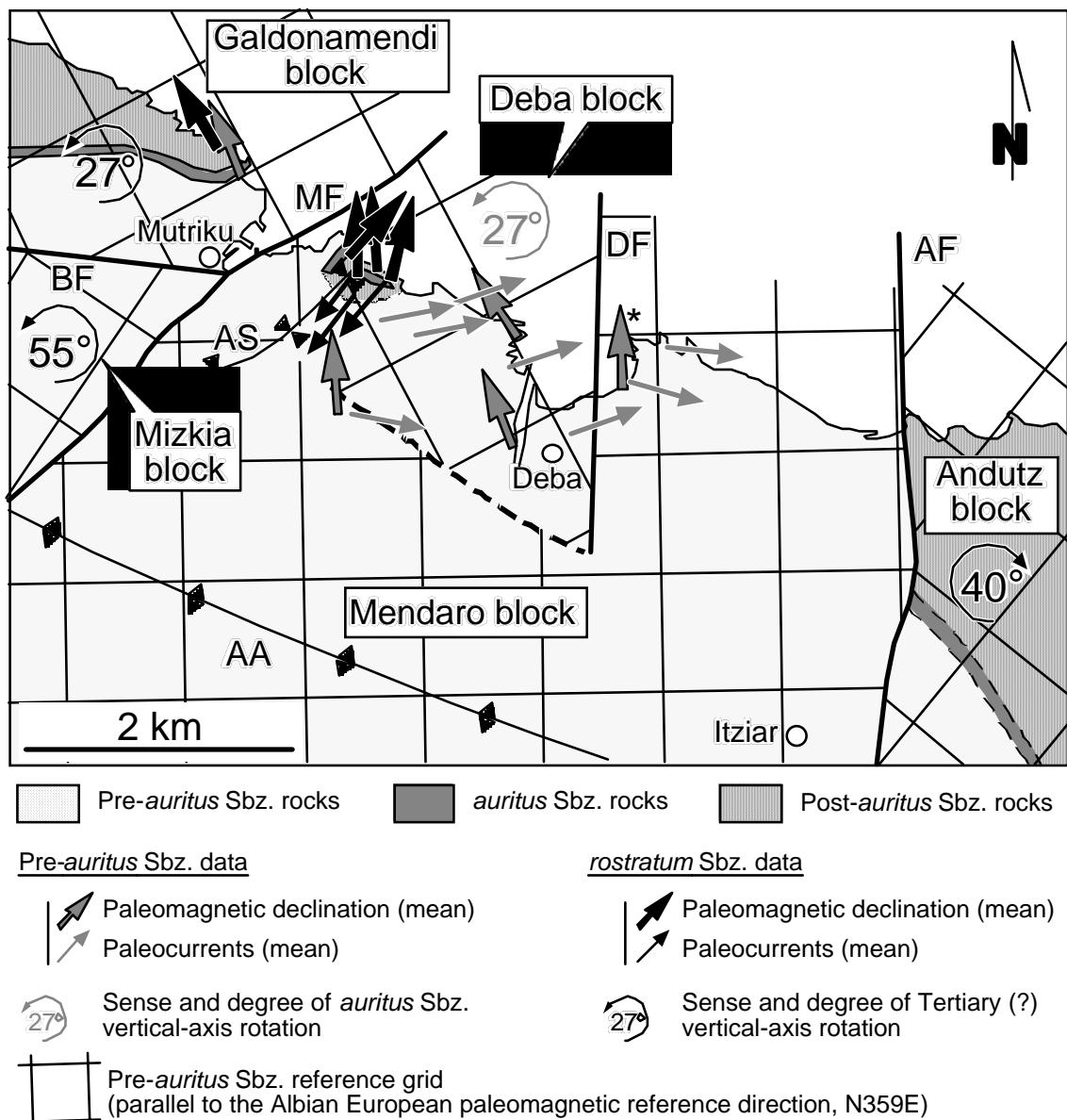
Results and conclusions

Obtained data, showed in Fig. 2, support Late Albian *auritus* Subzone and Tertiary (?) vertical-axis rotations on

the base of three criteria: a) deviations of paleomagnetic declination data from the Albian European reference direction (N359E); b) anomalous paleocurrent data with respect to Albian "normal" paleocurrents (N110E and N220E); and c) discordant tectonic structures with the main structural trend (N120E). Consistent results combined with a detailed stratigraphic framework allow reconstruction of the complex structural and depositional history of the area:

1) Late Albian pre-*auritus* Subzone (>102.2 My): Turbidity currents flowed east-southeastward ("normal" paleocurrents). Submarine highs (Galdonamendi block and Arno anticline) controlled confined flows.

2) Late Albian *auritus* Subzone (102.2-100.9 My): Deba block rotated ~27° counterclockwise and the Aitzeta fold grew (Agirrezabala et al., 2002). Rotation is indicated by both pre-*auritus* paleomagnetic declinations and paleocurrents of the Deba block, which show similar



MF: Mutriku fault; AF: Andutz fault; DF: Deba fault; BF: Berriatua fault; AA: Arno anticline; AS: Aitzeta monoclinal syncline; * Datum from Vandenberg (1980)

Fig. 2. Synthetic geological map and paleomagnetic and paleocurrent data (after standard bedding correction) of the study area

Fig. 2. Mapa geológico sintético y datos paleomagnéticos y de paleocorrientes (después de la corrección estándar de la estratificación) del área de estudio

deviations from paleomagnetic reference and "normal" paleocurrents, respectively. Overlying unrotated post-auritus (*rostratum* Sbz.) paleomagnetic declinations and "normal" paleocurrents postdate auritus Sbz. rotation.

3) Late Albion *M. rostratum* Subzone (100.9-100.2 My): Turbidity currents flowed south-southwest ("normal" paleocurrents) suggesting their partial unconfinement by disappearing or burial of the southern structural high (Arno anticline).

4) Tertiary (?): Galdonamendi and Mizkia blocks underwent counterclockwise rotations of ~27° and ~55°, respectively, and Andutz block rotated ~40° clockwise. Both Late Albion pre- and post-auritus paleomagnetic declinations in the Galdonamendi block show

$\sim 27^\circ$ counterclockwise deviation from reference direction; very similar rotation degrees are also deduced from the discordant structural trend of that block respect overall Tertiary (?) structural trend, as geologic map show. Similarly, in the cases of Mizkia and Andutz blocks, geological map shows Tertiary (?) fold traces discordant respect the general structural trend, inferring rotations of $\sim 55^\circ$ counterclockwise and $\sim 40^\circ$ clockwise, respectively. Deduced opposite rotations are interpreted as result of northeastward displacement of the unrotated Mendaro and Deba blocks and dragging of adjacent blocks (Galdonamendi, Mizkia and Andutz). On the other hand, paleomagnetic datum from the northwest limb of the Aitzeta monocline syncline (AS) shows a spurious rotation due to the conical character of the fold. Based on a nomogram of apparent rotations associated to conical folds from Pueyo et al. (2003) a spurious clockwise rotation of 26° is deduced for that site.

References

- Agirrezabala, L.M. (1996) El Aptiense-Albiense del Anticlinorio Nor-Vizcaíno entre Gernika y Azpeitia. Unpublished PhD Thesis, Euskal Herriko Unibertsitatea, 429 pp.
- Agirrezabala, L.M. and García-Mondéjar, J. (1994) A coarse-grained turbidite system with morphotectonic control (Middle Albian, Ondarroa, northern Iberia). *Sedimentology*, 41, 383-407.
- Agirrezabala, L.M., Owen H.G. and García-Mondéjar, J. (2002) Syntectonic deposits and punctuated limb rotation in an Albian submarine transpressional fold (Mutriku village, Basque-Cantabrian Basin, northern Spain). *Geological Society of America Bulletin*, 114 (3), 281-297.
- Agirrezabala, L.M., Owen H.G. and García-Mondéjar, J. (2003) Syntectonic deposits and punctuated limb rotation in an Albian submarine transpressional fold (Mutriku village, Basque-Cantabrian Basin, northern Spain). Errata. *Geological Society of America Bulletin*, 115 (6), 765-768.
- Choukroune, P. and Mattauer, M. (1978) Tectonique des plaques et Pyrénées: Sur le fonctionnement de la faille transformant nord-pyrénéene; comparaisons avec dès modèles actuels. *Bulletin de la Société Géologique de France*, ser. 5, 20, 689-700.
- Pueyo, E.L., Parés, J.M., Millán, H. and Pocovi, A. (2003) Conical folds and apparent rotations in paleomagnetism (a case study in the Southern Pyrenees). *Tectonophysics*, 362, 345-366.
- Souquet, P., Debrossas, E.J., Boirie, J.M., Pons, P., Fixari, G., Roux, J.C., Dol, J., Thieuloy, J.P., Bonnemaison, M., Manivit, H. and Peybernes, B. (1985) Le Groupe du Flysch Noir (Albo-Cenomanien) dans les Pyrénées. *Bulletin Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 9 (1), 183-252.
- Vandenberg, J. (1980) New paleomagnetic data from the Iberian Peninsula. *Geologie in Mijnbouw*, 59 (1), 49-60.

Comparación entre la fábrica magnética y la fábrica obtenida a partir del análisis de imagen del plutón de Marimanha (Pirineo)

Magnetic fabric and image analysis fabric in the Marimanha pluton (Pyrenees)

B. Antolín Tomás (*), A. M. Casas (*), T. Román Berdiel (*), I. Gil Peña (**), B. Oliva (***) , R. Soto (****)

(*) Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, borjanto@unizar.es

(**) Unidad de Geología y Geofísica, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

(***) Department of Geological Sciences, University of Michigan. Ann Arbor, USA.

(****) Laboratorio de Paleomagnetismo, Departamento de Física, Universidad de Burgos, Burgos.

ABSTRACT

A comparative analysis of the magnetic fabric and the image analysis fabric in the Marimanha granite is presented. The Marimanha pluton, located in the Axial zone of the Pyrenees, shows foliation and lineation trajectories concentric in map view and roughly parallel to the contour of the pluton. This concentric distribution appears locally modified in the northern border (with E-W orientation) where some foliations and lineations strike N-S. The orientation of the magmatic ellipsoid obtained from image analysis results shows that the k1 axis of the AMS closely approximates in orientation the X axis of the petrographic ellipsoid, although the Y and Z axes are switched in some sites.

Key words: granite, fabric, AMS, image analysis, Marimanha.

RESUMEN

Se presenta un análisis comparativo entre la fábrica magnética y la obtenida a partir del análisis de imagen de la orientación preferente de las biotitas en el granito de Marimanha. El plutón de Marimanha, situado en la zona axial pirenaica, muestra trayectorias de la foliación y lineación magnéticas concéntricas y paralelas a los contornos del plutón. Esta distribución aparece localmente modificada en su borde norte (de orientación E-W) donde toman direcciones N-S. La orientación de los elipsoides magmáticos obtenido a partir de los resultados del análisis de imagen muestran que existe una coincidencia aproximada en orientación del eje X del elipsoide petrográfico con el eje k1 del elipsoide magnético. Sin embargo los ejes Y y Z solamente coinciden en algunos casos y en otros están intercambiados.

Introducción

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) se puede representar como un elipsoide correspondiente a la fábrica magnética (Rochette, 1987). La orientación de este

elipsoide depende de la orientación de los minerales responsables del magnetismo inducido (Hrouda, 1982). Las medidas de ASM proporcionan la orientación y la magnitud de los ejes $k_1 > k_2 > k_3$ del elipsoide magnético. La fábrica magnética está caracterizada por la

lineación magnética (k_1) y la foliación magnética (perpendicular a k_3).

En los granitos paramagnéticos, sin magnetita, en los que los silicatos de hierro son los responsables de la susceptibilidad magnética, y en los granitos ferromagnéticos con granos de

magnetita (rica en hierro) de decenas de micrones a milímetros y con estructura en polidominios, suele existir un paralelismo entre la fábrica magnética y la fábrica magmática (Guillet et al., 1983; Grégoire et al., 1998; Bouchez, 2000). Sin embargo este paralelismo puede verse distorsionado en algunos granitos paramagnéticos, cuando los contenidos en turmalina o en cordierita son significativos (Rochette et al., 1994), y en los granitos ferromagnéticos con granos de magnetita de tamaño inferior a un micrón, compuestos por un solo dominio magnético, o monodominio. En estos casos la fábrica magnética no refleja la fábrica mineral debido a la anisotropía inversa de dichos minerales.

El análisis de las orientaciones preferentes de forma (SPO) de los principales minerales porta-dores de la susceptibilidad magnética es una técnica eficaz para verificar que los elipsoides de la fábrica magnética se corresponden con la orientación preferente de los cristales (Pignotta y Benn, 1999).

El plutón de Marimanha

El plutón hercínico de Marimanha aflora en la Zona Axial del Pirineo Central, y forma parte de la lámina cabalgante alpina de Gavarnie (Fig. 1). La estructura varisca de esta zona es el resultado de la superposición de dos sistemas principales de pliegues y cabalgamientos de vergencia sur con esquistosidad asociada (Carreras et al., 1994).

Respecto a su composición petrográfica el plutón de Marimanha muestra una zonación composicional (Palau, 1998) que varía de

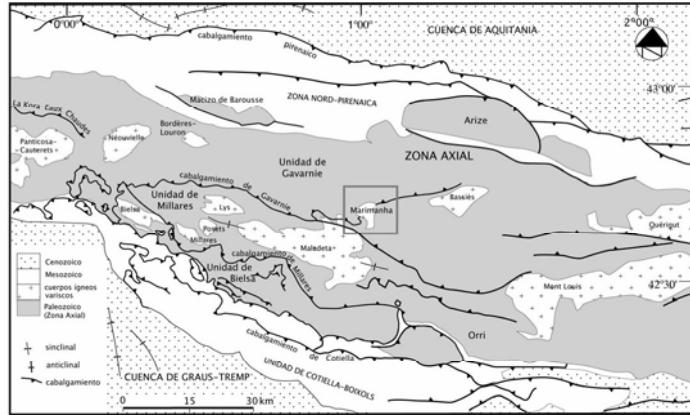


Fig. 1. Mapa general del Pirineo Axial y localización del plutón de Marimanha.

Fig. 1. Geological sketch of the Axial zone of the Pyrenees, showing the location of the Marimanha pluton.

leucogranito en las zonas más internas del plutón a granodioritas en el exterior y cuarzogabros en un pequeño afloramiento en el sur del cuerpo intrusivo (Fig. 2). La composición mineralógica dominante consiste en cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. En la facies granodiorítica más externa aparece también anfíbol. El principal mineral responsable del magnetismo inducido es la biotita, junto con el anfíbol en la facies más externa.

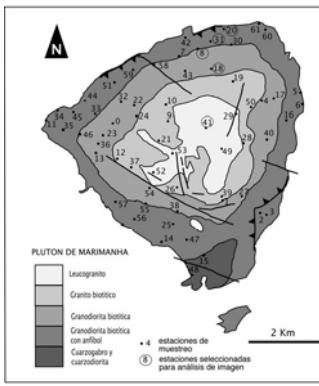


Fig. 2. Mapa de la zonación petrográfica del plutón de Marimanha (modificado de Palau, 1998).

Fig. 2. Petrological zonation of the Marimanha pluton (modified from Palau, 1998).

Se ha llevado a cabo un estudio de análisis de imagen en cinco estaciones del plutón de Marimanha (Fig. 2) representativas de todo el rango de valores de susceptibilidad magnética con la finalidad de verificar que los elipsoides de la fábrica magnética (Antolín et al., 2006) se corresponden con la

orientación preferente de los cristales de biotita y anfíbol.

Anisotropía de la susceptibilidad magnética

El plutón de Marimanha es un granitoide dominante paramagnético, tal como evidencian sus bajos valores de susceptibilidad magnética (susceptibilidad media para todo el plutón de 203×10^{-6} SI) (Fig. 3) (Antolín et al., 2006).

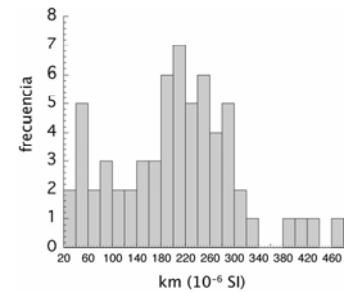


Fig. 3. Histograma de frecuencias de la susceptibilidad magnética (km).

Fig. 3. Frequency histogram of the magnetic susceptibility

La foliación y lineación magnéticas se orientan concentricamente y paralelamente a los contactos petrográficos (Antolín et al. 2006), dominando la orientación de foliaciones y lineaciones NE-SO con buzamientos e inmersiones variables (Fig. 4). Esta distribución aparece distorsionada localmente en su borde norte, donde se aborda el análisis de imagen (Fig. 2), dando lugar a direcciones perpendiculares de la foliación (E-W y N-S) que

pueden interpretarse como trayectorias sigmoidales.

direcciones principales del elipsode de la anisotropía de

indica la dirección de elongación preferente de las

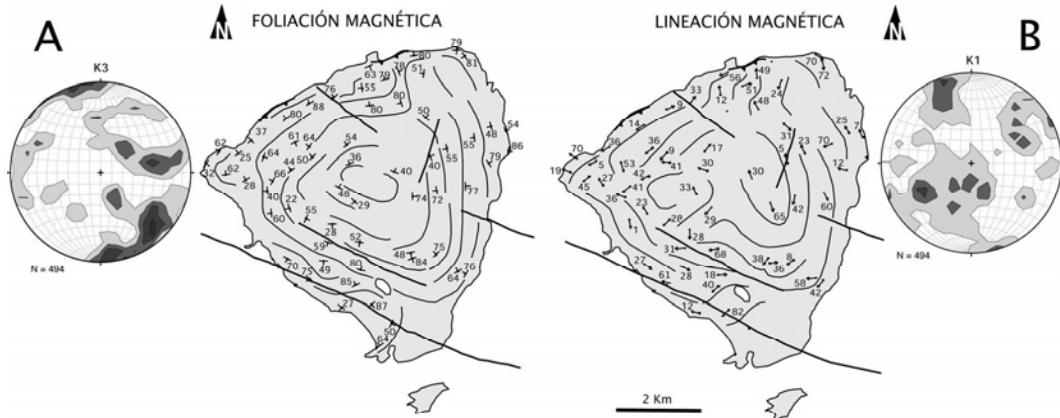


Fig. 4. Mapas estructurales del plutón de Marimanha. A, Foliaciones magnéticas. B, Lineaciones magnéticas.
Diagramas de densidad en proyección de Schmidt, hemisferio inferior, intervalos de contorno: 1%.

Fig. 4. Structural maps of the Marimanha pluton. A, Magnetic foliations, B, Magnetic lineations
Density diagrams in Schmidt net, lower hemisphere projection, contour intervals: 1%

Las muestras seleccionadas para el análisis de imagen pertenecen a las estaciones 41, 18, 8, 31 y 20 (Fig. 2). Las estaciones 41, 18 y 31 presentan fábricas magnéticas triaxiales con una buena definición de los tres ejes (ver Fig. 6), las estaciones 8 y 20 muestran fábricas magnéticas planares con una buena definición del eje k3, y distribución de k1 y k2 en el plano de la foliación (ver Fig. 6).

la susceptibilidad magnética.

Las imágenes escaneadas de las láminas delgadas se trataron para que los cristales de biotita y hornblenda quedarán registrados como negro y el resto de la lámina como blanco (Fig. 5). Las orientaciones preferentes de forma (SPO) de la biotita o de la biotita y hornblenda en cada imagen se han medido utilizando el programa INTERCPT (Launeau y Robin, 1996; Launeau y

biotitas (y hornblendas en su caso), la elipse refleja la intensidad de la orientación preferente de las biotitas (y hornblendas) (Launeau, 1990; Launeau y Cruden, 1998). El elipsode se ha reconstruido mediante el programa STRAIN3D (Bandom, 2006) a partir de las tres secciones elípticas obtenidas del análisis de imagen.

Cuando la ASM está controlada principalmente por los cristales de biotita, la traza

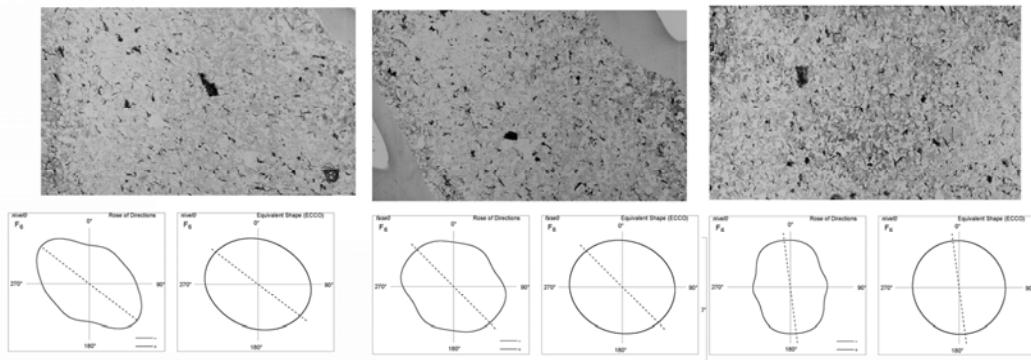


Fig. 5. Resultados del análisis de imagen de la orientación preferente de biotitas en tres planos ortogonales a las direcciones principales de ASM para la estación 41; negro: biotita, blanco: cuarzo y feldespato

Fig. 5. Results of the image analysis of the biotite preferred orientation in three planes orthogonal to the principal directions of the AMS for site 41; black: biotite, white: quartz and feldspar phases.

Análisis de imagen

Se realizaron tres láminas delgadas en cada una de las estaciones seleccionadas, dichas láminas se orientaron perpendicularmente a las

Cruden, 1998). La dirección de elongación preferente y la intensidad de la orientación preferente de los cristales de biotita (y hornblenda en su caso) en cada imagen se indican por rosas (Fig. 5). La línea de puntos en cada rosa

de la foliación definida por las biotitas deberá ser perpendicular a k3 y se observará en los planos k1-k3 y k2-k3, y la lineación definida por las biotitas deberá ser paralela a k1 y se verá en el plano k1-k2.

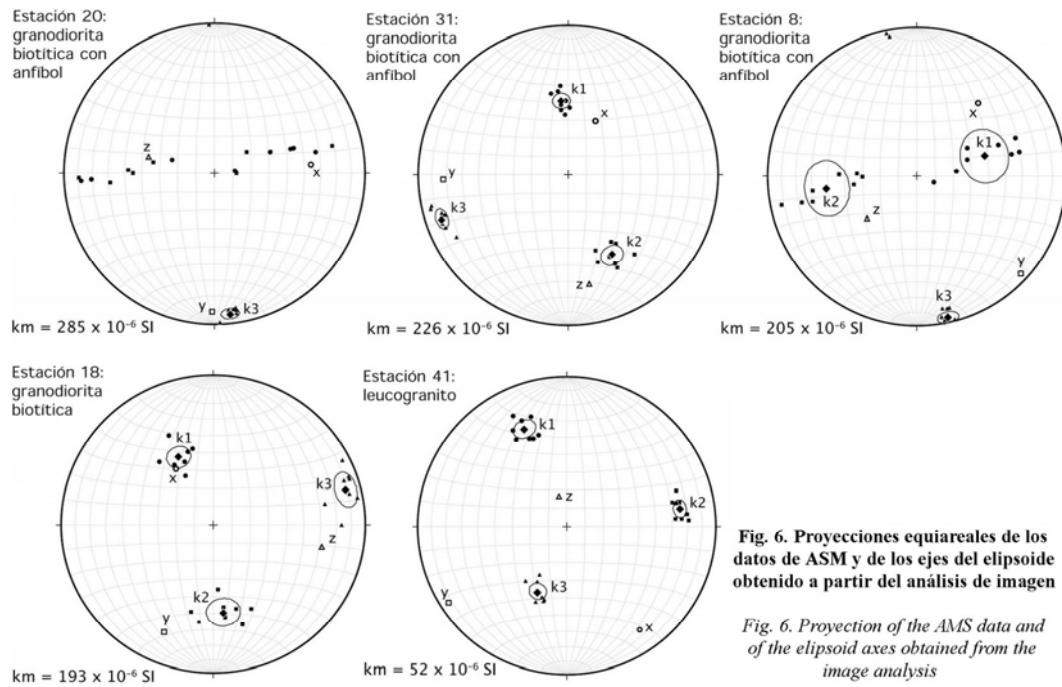


Fig. 6. Proyecciones equiáreas de los datos de ASM y de los ejes del elipsode obtenido a partir del análisis de imagen

Fig. 6. Projection of the AMS data and of the ellipsoid axes obtained from the image analysis

Los resultados del análisis de imagen (Fig. 6) muestran que existe una coincidencia aproximada en orientación del eje X del elipsode petrográfico con el eje k1 del elipsode de susceptibilidad magnética. Sin embargo los ejes Y y Z solamente coinciden en uno de los casos con los ejes k2 y k3 del elipsode de susceptibilidad. Este intercambio de ejes implica que a pesar de que las lineaciones petrográfica y magnética coinciden, esta equivalencia no se cumple para la foliación.

En el caso del granito de Marimanya, la variabilidad en las orientaciones de los ejes Y y Z que también se refleja en la existencia de foliaciones magnéticas perpendiculares en estaciones próximas (Fig. 4) podría explicarse en parte debido a la existencia de orientaciones bimodales en la disposición de los cristales de biotita y anfíbol. En cuanto a la relación de forma de los elipsoides, solamente en uno de los casos se ha encontrado una coincidencia aceptable, mientras que en general las fábricas magnéticas tienden a

ser más oblatas que las fábricas petrográficas.

Referencias

- Antolín-Tomás, B., Román-Berdiel, T., Casas, A.M., Gil-Peña, I., Oliva, B., Soto, R. (2006) The Structural and magnetic fabric study of the Marimanya granite (Axial Zone of the Pyrenees). Geophysical Research Abstracts 8, EGU General Assembly.
- Bouchez, J.-L. (2000) Anisotropie de susceptibilité magnétique et fabrique des granites. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes 330, 1-14.
- Brandon, M. (2006) STRAIN3D, University of Yale, <http://earth.geology.yale.edu/brandons/oftware/YALEDFM>.
- Carreras, J., Capella, I. (1994) Tectonic levels in the Paleozoic basement of the Pyrenees: a review and a new interpretation. J. Struct. Geol. 16, 1509-1524.
- Grégoire, V., Darrozes, J., Gaillot, P., Nédélec, A. (1998) Magnetite grain shape fabric and distribution anisotropy vs rock magnetic fabric: a three-dimensional case study. J. Struct. Geol. 20, 937-944.
- Guillet, P., Bouchez, J. L., Wagner, J. J. (1983) Anisotropy of magnetic susceptibility and magnetic structures in the Guérande granite massif (France). Tectonics 2, 419-429.
- Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rock's and its application in Geology and Geophysics. Geophys. Surveys 5, 37-82.
- Launeau, P. (1990) Analyse numérique des images et orientations préférentielles de forme des agrégats polyphasés: Application à l'analyse cinématique des granites. Ph.D. thesis, Université de Toulouse.
- Launeau, P., Cruden, A. R. (1998) Magnetic fabric acquisition mechanisms in a syenite: results of a combined anisotropy of magnetic susceptibility and image analysis study. J. Geophys. Res. 103, 5067-5089.
- Launeau, P., Robin, P. Y. (1996) Fabric analysis using the intercept method. Tectonophysics 267, 91-119.
- Palau i Ramírez, J. (1998) El magmatismo calcoalcalí del massís de Marimanya i les mineralitzacions As-Au-W associades. Institut cartogràfic de Catalunya. Monografies tècniques, 4, 340 pp.
- Pignotta, G. S., Benn, K. (1999) Magnetic fabric of the Barrington Passage pluton, Meguma Terrane, Nova Scotia: a two-stage fabric history of syntectonic emplacement. Tectonophysics 307, 75-92.
- Rochette, P. (1987) Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies. J. Struct. Geol. 9, 1015-1020.
- Rochette, P., Scaillet, B., Guillot, S., Le Fort, P., Pécher, A. (1994) Magnetic properties of the High Himalayan leucogranites. Earth Planet. Sci. Lett. 126, 217-234.

Magnetoestratigrafía del Mioceno de las cuencas del Tajo y del Duero

Magnetostratigraphy of the Miocene successions of the Tajo and Duero basins

E. Beamud (*), M. Garcés (**), M. Montes (**), F. Nozal (**), J.P. Calvo (****), F. López-Olmedo (**), J. Luengo (**)

* Laboratori de Paleomagnetisme Serveis de Suport a la Recerca UB – CSIC. Inst. de Ciències de la Terra "Jaume Almera" C/Solé i Sabaris s/n, 08028 Barcelona betbeamud@ub.edu

** Dept. Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Campus de Pedralbes, 08028-Barcelona

*** Dirección de Geología y Geofísica. Área de Cartografía Geológica. IGME. C/ Calera 1. 28760-Tres Cantos. Madrid.

**** Dirección General del IGME. Ríos Rosas 23. 28003-Madrid.

ABSTRACT

In this study we present the first magnetostratigraphic data for the Miocene sediments of the Tajo (Madrid area) and SE Duero Basins. These basins were infilled by fluvial and lacustrine sediments during Miocene times. Vertebrate remnants through the sedimentary succession yield a reasonable but partial dating of the sedimentary infilling. The composite magnetostratigraphic section of the Madrid basin spans from chron C5Br to chron C5An or C5n. In the SE Duero Basin, the magnetostratigraphic section spans from chron C5AB to chron C4Ar.

Key words: *Magnetostratigraphy, Miocene, Tajo, Duero*

RESUMEN

En este estudio presentamos los primeros datos magnetoestratigráficos de los sedimentos miocenos de las cuencas del Tajo (sector de Madrid) y del SE de la cuenca del Duero. Estas cuencas se llenaron durante el Mioceno con sedimentos fluviales y lacustres. Los restos fósiles que se encuentran a lo largo de la sucesión sedimentaria aportan una datación razonable pero incompleta al relleno sedimentario. La sección magnetoestratigráfica para la cuenca de Madrid se extiende del cron C5Br al cron C5An o C5n. En el SE de la cuenca del Duero, la sección magnetoestratigráfica se extiende del cron C5AB al cron C4Ar.

Introducción

El relleno sedimentario de las cuencas del Tajo (sector de Madrid) y del Duero (sector SE) se caracteriza por sedimentos detríticos fluviales y sedimentos carbonatados de origen lacustre-palustre. En la cuenca de Madrid, los sistemas lacustres incluyen también evaporitas. Estudios detallados, han permitido dividir la sucesión neógena de la cuenca de Madrid en 4 unidades estratigráficas genéticas, Unidad Inferior, Intermedia I y II y Superior

(Alberdi et al., 1983; Calvo et al., 1989). El relleno mioceno en el sector SE de la cuenca del Duero se caracteriza por los denominados "páramos calcáreos", resultado del contraste entre los niveles detríticos y los niveles carbonatados, más competentes y resistentes a la erosión. El registro sedimentario de la cuenca del Duero se organiza en 3 unidades estratigráficas secuenciales que se han denominado Unidad Páramo Inferior, Páramo Intermedio y Páramo Superior.

La edad de las distintas unidades ha sido establecida a partir de faunas de vertebrados presentes en las sucesiones neógenas. En la cuenca de Madrid, el conjunto de yacimientos de Paracuellos (PA III, PA VI y PA V) asigna una edad Aragoniense medio-superior para la Unidad Intermedia (Alcalá et al., 1994; Calvo et al., 1984; Herráez, 1993). Asimismo, la Unidad Intermedia está datada como Aragoniense superior en base al yacimiento de Villaluenga (VL) (Díaz de Neira et al., 1999). En

la cuenca del Duero, la edad de la Unidad del Páramo Intermedio está establecida en base al yacimiento de Piquera de San Esteban (PQ), situado en un canal conglomerático incidido sobre la base de la unidad, que aporta una edad Aragoniense superior (MN 7, Mazo y Jordá, 1994) y al yacimiento Valles de Fuentidueña, (VF) que asigna una edad Vallesiense inferior (MN 9, Alberdi et al., 1997).

A pesar de estas dataciones, no existe hasta el momento un registro cronológico continuo de la sucesión estratigráfica mioceña que rellena ambas cuencas. La imprecisión en la datación de estas unidades miocenas constituye un problema importante a la hora de establecer correlaciones fiables dentro de cada unidad estratigráfica y de analizar la ciclicidad sedimentaria o realizar estudios que requieran una cuantificación de los procesos sedimentarios.

En este trabajo se presentan los primeros resultados magnetoestratigráficos del Mioceno de ambas cuencas.

Metodología

En la cuenca de Madrid se muestrearon cuatro perfiles magnetoestratigráficos cubriendo la parte alta de la Unidad Inferior y los dos ciclos de la Unidad Intermedia. En total se muestrearon 125 estaciones en cerca de 300 m de serie.

Los dos perfiles muestreados en el sector SE de la cuenca del Duero cubren la parte alta de la Unidad del Páramo Inferior y las unidades del Páramo Intermedio y Superior. En la cuenca del

Duero se obtuvieron un total de 128 muestras distribuidas a lo largo de 207 m de serie.

Los análisis se han realizado en el Laboratorio de Paleomagnetismo de los Servicios Científicotécnicos de la Univ. de Barcelona – CSIC. Éstos han consistido en la desmagnetización térmica progresiva y posterior medida de la magnetización remanente natural (MRN) de 1 a 3 especímenes por estación. En todas las muestras se aplicaron un promedio de 15 pasos de temperatura creciente, alcanzando los 550 °C en las muestras del Duero y los 670 °C en las muestras de la cuenca de Madrid. La dirección de la magnetización característica de cada muestra se obtuvo mediante regresión lineal de los vectores de desmagnetización. De cada dirección se determinó la polaridad magnética mediante el cálculo de la latitud del polo geomagnético virtual (PGV).

Resultados

A partir de la posición y latitud del PGV es posible establecer la secuencia de cambios de polaridad magnética para los distintos perfiles de las dos cuencas y correlacionarlos con la escala de tiempo de polaridad geomagnética (ETPG) (Cande y Kent, 1995) (Figs. 1 y 2)

En la cuenca de Madrid, las secciones M45 y del Gurugú presentan un patrón de inversiones lo bastante característico como para permitir una buena correlación con la ETPG. La magnetozona inversa situada en la base de la serie M45 se correlaciona con el cron C5Br y

las magnetozonas N3 y N4 de la serie del Gurugú se correlacionan con los crones C5AD y C5AC, respectivamente. El registro en la sección del Cerro de los Guardias (CG) es bastante pobre, sin embargo la presencia de los yacimientos PA VI, PA V y PA III facilitan su correlación con la escala de tiempo. Así, la magnetozona normal de la base se correlaciona con el C5AD y la larga magnetozona inversa a techo del perfil se correlaciona con el cron C5Ar. La serie del Pico del Aguilu cuenta para su correlación con la ETPG con la presencia del yacimiento VL, situado unos metros por debajo de la base de la serie. Sin embargo, el patrón de inversiones de esta serie no reproduce fielmente las magnetozonas de la ETPG, por lo que son posibles varias correlaciones. En la figura 1 se representan las 2 opciones de correlación posibles a partir de la magnetoestratigrafía obtenida. En la opción A el doblete de magnetozonas normales N3-N4 a techo del perfil se correlaciona con el cron C5An, mientras que en la opción B, este doblete se correlaciona con el C5n e implica la presencia de un hiato entre la Unidad Intermedia II y III. A partir de la correlación magnetoestratigráfica presentada, la edad del relleno sedimentario de la cuenca de Madrid se extiende del cron C5Br al cron C5n si se admiten la hipótesis de correlación más amplia, lo cual representaría casi 6 Ma dentro del Mioceno medio y superior.

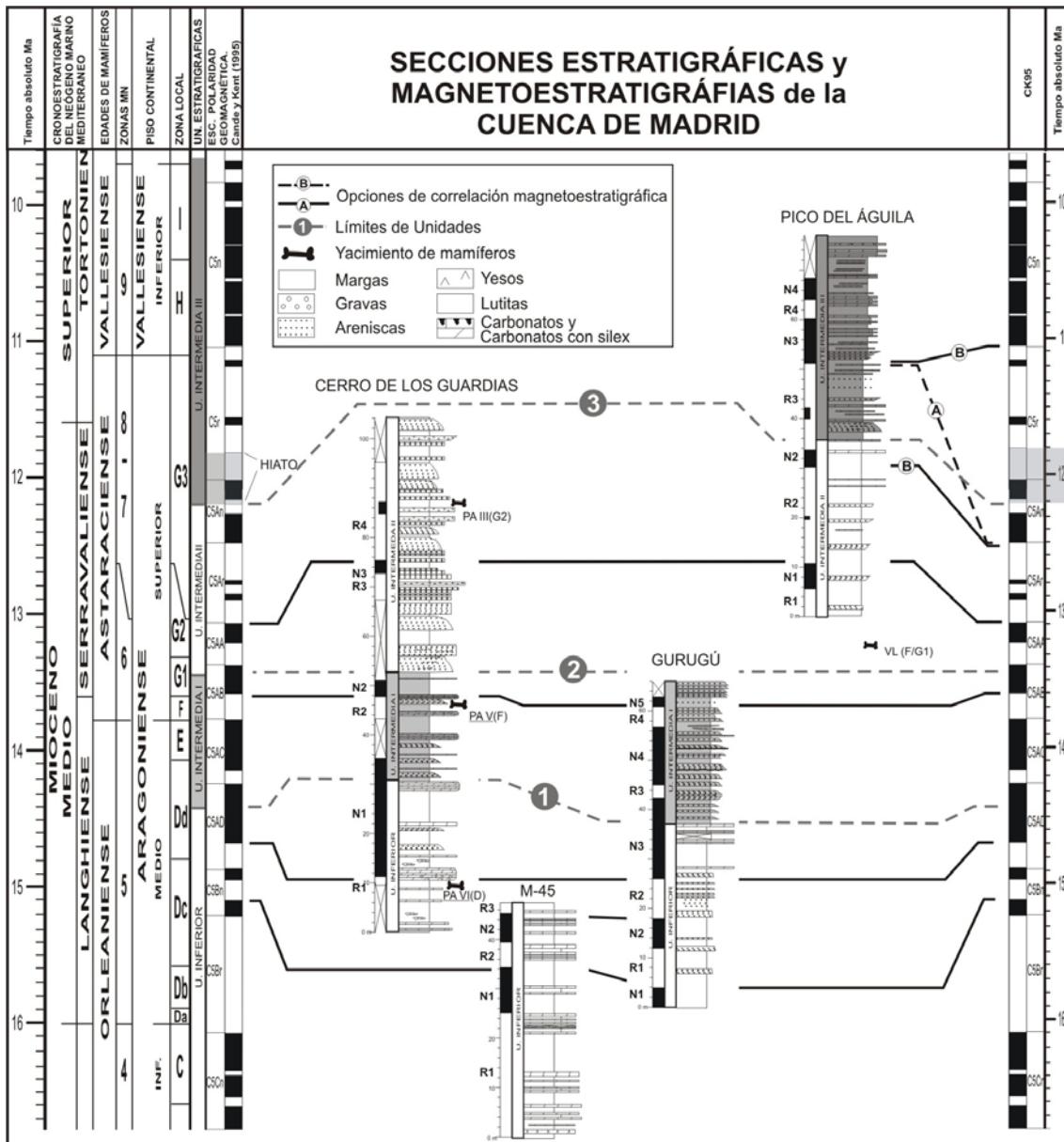


Figura 1- Correlación magnetoestratigráfica entre las secciones de la Cuenca de Madrid y la ETPG (Cande y Kent, 1995).
Figure 1- Magnetostratigraphic correlation of the Madrid Basin sections to the GTPS (Cande & Kent, 1995)

En la cuenca del Duero, la serie Valles de Fuentidueña presenta una correlación relativamente sencilla con la ETPG. La presencia de dos largas magnetozonas normales y la posición del yacimiento VF de edad Vallesiense inferior (MN9) facilitan su correlación con el cron C5n. La parte inferior de la serie de Piquera, no tiene equivalencia con la de los Valles de Fuentidueña y su correlación con la ETPG, en general es menos fiable. No obstante, el yacimiento situado en el canal conglomerático y atribuido a la biozona MN 7 (en la práctica

MN 7-8), ayuda a correlacionar la magnetozona N5 con el cron C5r.2n o con el cron C5An.1n. Por otra parte la gran magnetozona inversa constituida por el conjunto R4 y R5 sugiere una correlación con el cron C5Ar. Estas opciones de correlación magnetoestratigráfica implicarían sendos hiatos de diferente magnitud, ~700 Ka en el caso de la opción A o ~300 Ka en el caso de la ausencia del subcron C5An.1n (opción B).

Conclusiones

Las Unidades Inferior e Intermedia (I y II) de cuenca de Madrid se extienden del cron C5Br al cron C5An o C5n, lo que representa un registro sedimentario de entre 4 y 6 Ma dentro del Mioceno Medio-Superior, dependiendo de la opción de correlación aceptada. La opción de correlación más amplia, implica además la presencia de un hiato de cerca de 1 Ma entre la Unidad Intermedia II y III.

El registro sedimentario del SE de la cuenca del Duero se

extiende desde el cron C5AB al cron C4Ar.2n, si se admiten las hipótesis de correlación más amplias, lo cual representaría ~4,5 Ma desde el Mioceno medio hasta el Vallesiense. Se postula un hiato entre el límite de la unidades del Páramo Inferior e Intermedio que abarcaría entre ~300 y ~700 ka.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del IGME “Investigación Geológica de las hojas a escala 1:200.000 nº 38 (Segovia) y nº 45 (Madrid)” y “Elaboración de la cartografía geológica continua a escala 1:50.000 (Plan GEODE) en la Cuenca del Duero-Almazán”.

Referencias

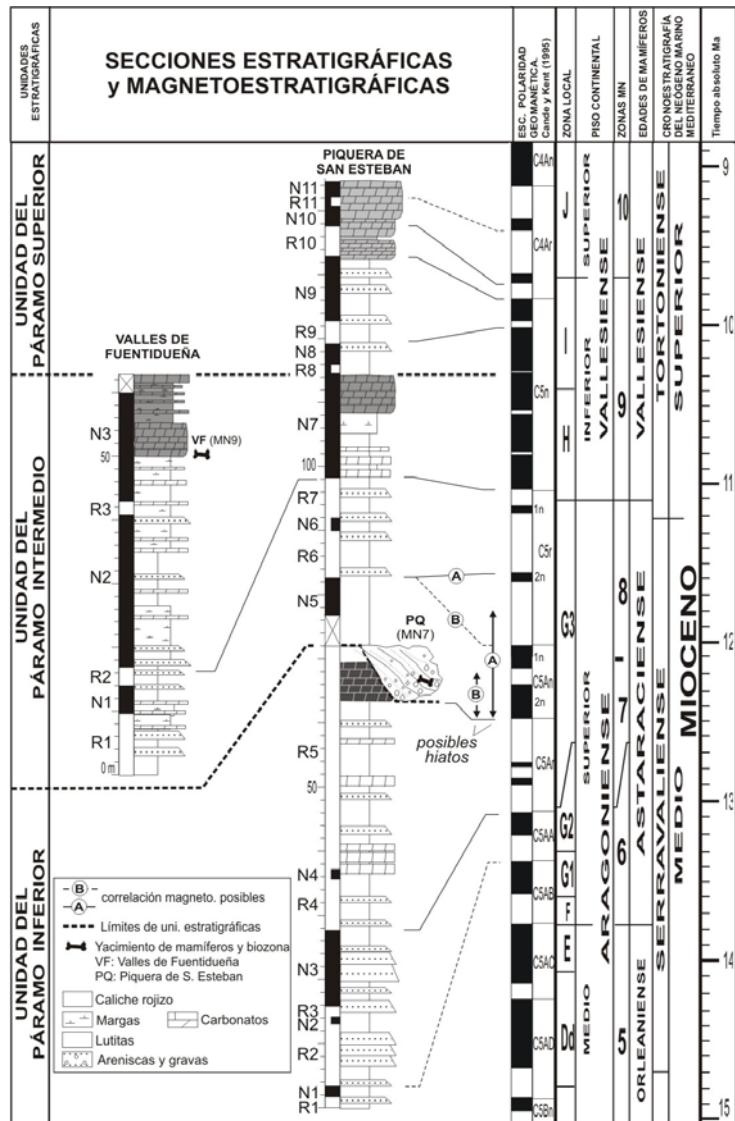


Figura 2.- Correlación magnetoestratigráfica entre las secciones estudiadas de la Cuenca del Duero y la ETPG (Cande y Kent, 1995).

Figure 2.- Magnetostratigraphic correlation of the studied sections in the Duero Basin to the GPTS (Cande y Kent, 1995).

Alberdi, M.T.; Hoyos, M.; Junco, F.; Lopez-Martínez, N.; Morales, J.; Sese, C. y Soria, D. (1983): Biostratigraphie et évolution sédimentaire du Néogène continental de l'aire de Madrid. Interim-Coll. RCMNS. Paleoclimatic Evol. Montpellier, 15-18.

Alberdi, M. T.; Azanza, B. y Cerdeño, E. (1997): Paleontology: Vertebrates of Los Valles de Fuentidueña (Segovia). En: Field Trip Guide Second Congress R. C. A. N. S. Salamanca (Spain): 40-45.

Alcalá, L., Alonso, A.M., Calvo, J.P., Hoyos, M. y Morales, J. (1994). Cenozoico de Madrid (Paracuellos del Jarama). Excursión B. X Jornadas de Paleontología, Madrid, 232-343.

Calvo, J. P., Ordóñez, S., Hoyos, M. y García del Cura, M. A., (1984). Caracterización sedimentológica de la unidad intermedia del Mioceno de la zona sur de Madrid. Revista de Materiales y Procesos Geológicos, 2: 145-176.

Calvo, J. P., Ordóñez, S., García del Cura, M. A., Hoyos, M., Alonso-Zarza, A.M., Sanz, M. E. y Rodríguez Aranda, J. P. (1989). Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid. Acta Geológica Hispanica, 24: 281-298.

Cande, S. C., y Kent, D. V., (1995). Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic: Journal of Geophysical Research, 100: 6093-6095.

Díaz de Neira, A., y López Olmedo, F., (1999): Memoria del Mapa Geológico de España E. 1:50.000, Hoja nº 604 Villaluenga: 2ª serie MAGNA, IGME, Madrid (en prensa).

Herráez, E., (1993). Micromamíferos (roedores y lagomorfos) del Mioceno del área de Madrid. Estudio sistemático y bioestratigráfico. Tesis doctoral. Univ. Complutense Madrid (inédita).

Mazo, A. V. y Jordá Pardo, J. F. (1994): Los Proboscídeos Neógenos de Piquera de San Esteban (Cuenca del Duero, Soria). Implicaciones bioestratigráficas. Estudios Geológicos 50: 239-245.

Estudio paleomagnético del yacimiento paleoantropológico de Dmanisi (Georgia)

A paleomagnetic study of the Dmanisi Paleoanthropological Site (Georgia)

M. Calvo (*), D. Sologashvili (**), A. Goguitchaichvili (***) M. F. Bógalo (*), A. Carrancho (*), J. J. Villalaín (*) y G. Maisuradze (**)

(*) Dpto. Física, Esc. Politécnica Superior, Univ. Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España, mcalvo@ubu.es

(**) Department of Geophysics, Ivane Javakhishvili State University of Tbilisi, Georgia

(***) Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, avto@geofisica.unam.mx

Resumen

El yacimiento prehistórico de Dmanisi se halla en el sur de la República de Georgia, en el Cáucaso, y es conocido porque en él se han hallado restos humanos y evidencia de industria lítica asociados con fauna Plio-Pleistocena. Las dataciones radiométricas mediante K/Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y los estudios paleomagnéticos llevados a cabo hasta el momento asignan a las unidades que contienen los mencionados hallazgos una edad máxima de 1.8 Ma. El yacimiento paleoantropológico está formado por sedimentos de origen volcanogenético de edad Plio-Pleistocena superpuestos a una sucesión de coladas basálticas. La secuencia litoestratigráfica del yacimiento comprende dos unidades deposicionales básicas: La unidad A, que se halla directamente sobre el basamento volcánico y la

unidad B, emplazada sobre la unidad A. Entre ambas se halla una capa formada por una concreción calcárea.

Se presentan en este trabajo nuevos datos paleomagnéticos de secciones continuas del yacimiento prehistórico (unidades A y B y capa de concreción calcárea) y de la colada volcánica subyacente. Los experimentos paleomagnéticos y de magnetismo de las rocas realizados incluyen la desimanación térmica y por campos alternos de 94 muestras así como registros de curvas termomagnéticas (k-T), experimentos de adquisición y desmagnetización de remanencia isotérmica (IRM) y estudios de anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM).

La colada basáltica y todas las muestras de la unidad A proporcionan polaridades normales, mientras que en la capa de concreción calcárea se reconocen polaridades

inversas. La unidad B se caracteriza por la presencia de direcciones inversas junto con otras de carácter intermedio. Se han interpretado éstas últimas como consecuencia de la coexistencia en las muestras afectadas de un componente inverso y otro secundario normal, ambos con espectros de temperaturas y campos de desbloqueo similares. Esta interpretación se ve apoyada por los resultados de los experimentos de ASM.

Como los restos humanos se han hallado en unidades caracterizadas tanto por polaridades normales como inversas y muestran ciertas diferencias entre sí, los resultados palaeomagnéticos del presente estudio parecen apuntar hacia la posibilidad de dos ocupaciones humanas diferentes en momentos distintos en el yacimiento de Dmanisi.

Nuevas estrategias de muestreo arqueomagnético en sedimentos blandos de cuevas.

A. Carrancho (*), J. J. Villalaín (*) y R. Soto (*)

(*) Lab. de Paleomagnetismo (Dpto. de Física, Universidad de Burgos). E. Politécnica Superior. Avda. Cantabria S/N 09006 Burgos; acarrancho@beca.ubu.es

ABSTRACT

La presencia de sedimentos quemados en cuevas supone un contexto potencialmente muy bueno para los estudios arqueomagnéticos. Sin embargo, su aplicación ha estado bastante limitada por las dificultades que suponen para su muestreo y orientación precisa la naturaleza no consolidada de estos materiales. Tradicionalmente, la extracción de muestras orientadas en materiales no litificados se ha solventado mediante diversas técnicas como la presión de cajitas de plástico contra el sedimento, el pegado de discos de plástico o incluso la extracción de bloques de mano que posteriormente eran submuestreados en el laboratorio. Todos estos procedimientos son eficaces aunque requieren el empleo de cierto tiempo en su preparación y no siempre pueden ser tratados térmicamente.

Presentamos una propuesta de muestreo de sedimentos blandos para materiales que requieran los diversos tratamientos de laboratorio empleados en Arqueomagnetismo y por supuesto, una alta precisión en la recogida de muestras. Con la ayuda de un tubo cilíndrico no magnético que incorpora un nivel que garantiza la entrada horizontal en el perfil, la muestra orientada es inyectada en recipientes que pueden ser medidos con comodidad en el laboratorio. Para la desimanación de campos alternos se emplean cajitas de plástico y para la desimanación térmica la muestra arqueológica es inyectada en cajitas de escayola no magnética. Estos recipientes de escayola incorporan un orificio de 3.6 cms³ realizado con moldes de silicona, destinados a albergar la muestra. Estas cajitas son selladas y consolidadas en el laboratorio de forma que soporten tratamiento térmico a temperaturas de hasta 700º C. Este método ha sido probado en varios yacimientos arqueológicos con éxito, comparando direcciones de muestras encapsuladas en plástico desimanadas por campos alternos con nuestras cajitas de escayolas que fueron desimanadas térmicamente. Los resultados obtenidos mediante este tipo de muestreo, reflejan una precisión comparable y ofrecen una vía de tratamiento alternativo para sedimentos blandos en Arqueomagnetismo.

Resultados arqueomagnéticos en sedimentos holocenos quemados de los yacimientos arqueológicos de la Sierra de Atapuerca.

A. Carrancho (*), J. J. Villalaín (*), J. Vallverdú (**), D. E. Angelucci (***) y J. M^a Vergès (**)

(*) Lab. de Paleomagnetismo (Dpto. de Física, Universidad de Burgos). E. Politécnica Superior. Avda. Cantabria S/N 09006 Burgos; acarrancho@beca.ubu.es

(**) Institut Català de Paleoecología Humana i Evolució Social. C/ Excorxador, s/n. 43003 Tarragona, Spain.

(***)Instituto Portugués de Arqueología. Avda. da India 136, Lisboa, Portugal.

ABSTRACT

La presencia recurrente de niveles quemados en los rellenos holocenos de las cuevas de la Sierra de Atapuerca, representa una valiosa fuente de información tanto desde el punto de vista arqueológico como paleomagnético. Este tipo de depósitos se originan por la quema periódica de residuos generados por la estabulación del ganado en el interior de las cuevas, una práctica habitual desde el Neolítico.

Estas estructuras de combustión comúnmente denominadas “fumiers”, presentan una sucesión de facies en tres unidades: cenizas, rubefacciones (subyacentes a las cenizas) y arcillas. Intensivos muestreos de varias de estas estructuras nos ha permitido estudiar por una parte la idoneidad de estas facies para estudios arqueomagnéticos y por otro lado conocer la composición, concentración y granulometría de la mineralogía magnética en este tipo de estructuras arqueológicas. Además de la desimanación sistemática térmica y por campos alternos decrecientes de la NRM, se han realizado diferentes análisis del magnetismo de las rocas como medidas de la NRM, susceptibilidad magnética, adquisición progresiva de la IRM y ARM, desimanación térmica de la IRM en 3 ejes, ciclos de histéresis y experimentos de viscosidad entre otros aspectos.

Se han obtenido varios puntos arqueomagnéticos para un tramo cronológico comprendido entre los ~5.300 y los ~6.300 yr B.P., y que cuenta con tres dataciones radiométricas para ese período. Esta información, aunque preliminar, abre nuevas expectativas para la ampliación de la curva de variación secular de Iberia a edades prehistóricas. Asimismo, los cambios que produce el fuego en la mineralogía magnética hacen del magnetismo de las rocas una herramienta muy útil en la caracterización de estructuras de combustión arqueológicas.

Son Fornés archaeointensities, an example of the microwave use, a new tool for palaeointensity research

Arqueointensidades en Son Fornés, un ejemplo del uso del sistema de microondas, un nuevo instrumento para investigación en paleointensidades

Ll. Casas (*), R. Risch (**), D. Gómez (*), J. Shaw(***)

(*) Dpt. de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Lluis.Casas@uab.es

(**) Dpt. de Pre-història, Universitat Autònoma de Barcelona

(***)Geomagnetism Lab., Earth and Ocean Science Dpt. University of Liverpool

ABSTRACT

A new tool has been recently developed at the Geomagnetism Lab. (University of Liverpool) to determine palaeo and archaeomagnetic intensities. The system consists of a microwave demagnetiser and a SQUID magnetometer. Measurements from the Son Fornés pre-historical village (Majorca) will be shown as an example. The samples are ceramics from different occupation levels corresponding to several periods (700-550 BC, 400 BC, 300 BC and 200-100 BC).

Key words: Microwaves, archaeomagnetism, archaeointensities

RESUMEN

En los últimos años, en el laboratorio de Geomagnetismo (Universidad de Liverpool) se ha desarrollado una nueva herramienta para determinar paleo y arqueointensidades. El sistema consiste en un desmagnetizador por microondas y un magnetómetro SQUID. Se han tomado como ejemplo medidas del poblado pre-histórico de Son Fornés (Mallorca). Las muestras son cerámicas procedentes de diversos niveles de ocupación, correspondientes a diferentes períodos (700-550 BC, 400 BC, 300 BC y 200-100 BC).

Introduction

Archaeomagnetism focuses on the study of the Earth's magnetic field evolution in historical and pre-historical times. During these times the possibilities of reading the old magnetic vector from magnetic field recorders are very much higher than in geological times because of the higher availability of well-dated material.

The study of the Earth magnetic field intensity is more complex and

constrained than directional analyses. Intensity determinations imply a progressive demagnetisation and remagnetisation of the sample. In general, palaeomagnetic laboratories perform a synchronized study of large quantities of samples (up to 80), full sets of samples are heated simultaneously. The results are obtained at the end of this long process and often the rate of successful measurements is rather low with the resulting waste of time.

Intensity determination

using the Microwave System sited at the University of Liverpool allows the treatment of individual samples, greatly reducing the measuring time. Moreover, the samples are much smaller than the standard palaeomagnetic core, thus thin ceramic pieces, otherwise not measurable, can be used as well.

The Microwave System is in a state of continuous improvement. We are confident that, in the near future this new tool will accelerate the growth of

archaeointensity databases.

The establishment of the first directional secular variation curve for the Iberian Peninsula [Núñez et al., 2003] encourages the compilation of archaeointensity data for this area to provide additional dating constraints to the archaeomagnetic technique for this region. A preliminary study of samples from the pre-historical village of Son Fornés has been carried out.

Son Fornés village

Son Fornés is located near Montuïri, in the central part of the island of Majorca (Spain). Several structures have been excavated including circular talaiots (cyclopean towers, 800-550 BC), housing structures, walls, streets and dumps. Only a few houses are considered contemporaneous with the talaiots, the rest are later structures from post-talaiotic (550-250 BC) or the classical (250-100 BC) periods.

Several ceramic samples of no value, but with contextual date, were selected to perform archaeointensity analyses. These were labelled according to their age as T (talaiotic, 700-550 BC), PTA (post-talaiotic, 4th century BC), PTB (post-talaiotic, 3rd century BC) and C (classical, 2nd-1st centuries BC), see fig. 1.



Fig. 1. Samples investigated

Fig 1. Muestras investigadas

The Microwave System

Intensity measurements assume that the natural remanence measured in the samples was induced thermally (thus, the NRM is a TRM). The TRM is proportional to the intensity of the geomagnetic field in which the sample cooled. Assuming that the proportionality constant has remained unchanged, the archaeointensity can be inferred by remagnetising the sample in a known field.

To control the uniformity of NRM, mineralogical changes or grain interaction issues, demagnetisation / stepwise remagnetisation processes are carried out following a Thellier-type experiment [Thellier & Thellier, 1959].

Typically, the sample is heated in an electric oven shielded from the Earth magnetic field and equipped with coil to produce a controlled magnetic field. The microwave system uses microwaves at different power levels to directly produce magnons in the magnetic minerals of the sample. In this way, for a given de/re)magnetisation power level, the overall temperature of the sample is much lower compared with the one reached using a conventional oven [Walton et al., 1993].

An additional advantage of this system is the individualised treatment of samples. Every sample is measured from the first remanence measurement until the last one without touching it. An automated system brings the sample to and from the microwave cavity (where it is radiated) and the built-in SQUID magnetometer. Every radiation step last for no more than 1 minute, a complete intensity measurement (including intermediate

control checks) can be performed in less than 2 hours.

The sample is a very small cylinder (5 mm diameter, 2 mm length) fixed at the end of a quartz rod. This small size makes it possible to measure pieces of thin ceramics extending a great deal the quantity of different materials potentially measurable using archaeomagnetic methods.

Samples from the Son Fornés site were measured using a Microwave System that operates in the 14 GHz frequency range

Additional characterisation

The magnetic properties of the samples were investigated using a Magnetic Measurements variable field translation balance (VFTB), Hysteresis loops, remanence coercivity and themomagnetic curves were acquired using the VFTB.

The Fe valences of paramagnetic phases and the fraction of magnetically ordered phases with respect to the total iron-bearing minerals were investigated using a conventional transmission Mössbauer spectrometer.

Results

Every piece of ceramics was subsampled and every subsample was subjected to a Microwave experiment. Samples showing unstable NRM directions or Zijderfeld plots (OVP plots) not pointing to the origin were disregarded with no further consideration. From a total of 40 subsamples, only 21 passed this first threshold, see table 1. Related to the levels where ceramics were found there is evidence of destructive fires, thus the low rate of unaltered NRMs is not surprising.

For samples with straight

NRM or identifiable characteristic NRM, the quality of pTRM was assessed together with pTRM tail checks, these are alteration and multi-domain (MD) control checks [Riisager & Riisager, 2001], 7 additional sub-samples were discarded due to negative checks.

Reliable archaeointensities were obtained for the remaining 14 sub-samples. However, for those samples with reduced amounts of suitable NRM (because of initial NRM discarded or negative MD and alteration checks beyond a certain microwave power) the associated quality factors are low and consequently the errors are substantial (see table 2).

There is no clear correlation between the 'rock magnetism' properties of the samples and their usefulness as archaeointensity samples. Day plots and M_{rs}/M_s always indicate the pseudo-single domain range (PSD). Curved paths in the Arai plots (traditionally associated with MD behaviour) were found for sample PTB2, but this sample does not have a particularly low M_{rs}/M_s ratio (0.21). C2 and PTA3 samples have even lower values (both were also discarded, because of unstable NRM directions and weak NRM).

Sample	Total	Sub-samples	
		passed OVP	positive pTRM & tails
T1	4	0	-
T2	3	1	1
PTA1	2	0	-
PTA2	5	4	4
PTA3	1	-	-
PTA4	3	2	0
PTB1	6	4	3
PTB2	4	0	-
C1	5	4	4
C2	4	4	0
C3	3	2	2
Total	40	21	14

Table 1. List of measured sub-samples

Tabla 1. Lista de submuestras medidas

Thermomagnetic curves indicate that in general, samples oxidise with temperature and lose their magnetic signal. However this fact should not be an important problem when using the Microwave system.

Mössbauer spectra show evidence of magnetically ordered phases only for 3 of the samples (PTA2, PTB2 and C1), with low hyperfine fields corresponding to iron oxides (<49 T), indicating low grain size and low proportion with respect to the total Fe-bearing minerals. All samples show a more or less important Fe^{2+} paramagnetic doublet except PTA4 and PTB1, which only have the constantly present Fe^{3+} doublet.

The overall results for every sample were computed fitting a Gaussian function to the sum of individual results

from every subsample.

Samples with large associated errors (PTB1 and C1) have also an abnormally high archaeointensity. For these samples, it is apparent that the magnetic signal could be regularly lost through the microwave experiment; this fact agrees with the failing of pTRM checks for the highest microwave powers applied. Extremely linear OVP plots indicate that there are no problems with secondary magnetisation or the creation of new magnetic minerals that could store laboratory magnetisations.

The 3 remaining results (T2, PTA2 and C3) present realistic values that are comparable with the values predicted by existing models (see fig. 2) [Korte & Constable, 2005] or archaeomagnetic studies from

sample	subsample	f	g	q	H (μ T)	Error
PTA2	A	0.76	0.86	9.8	44.3	4.5
	A	0.44	0.71	5.1	54.5	10.7
	B	0.78	0.87	28.7	59.4	2.1
	C	0.55	0.75	7.6	61.1	8.0
PTB1	D	0.62	0.75	7.1	51.2	7.2
	A	0.41	0.83	5.9	107.2	18.1
	B	0.22	0.73	1.6	121.5	76
C1	C	0.24	0.79	2.7	121.0	44.5
	A	0.34	0.61	2.3	104.3	45.8
	B	0.24	0.75	4.6	79.7	17.4
C3	C	0.81	0.79	14.1	81.6	5.8
	D	0.93	0.75	23.2	90.3	3.9
	A	0.77	0.87	36.0	64.3	1.8
	B	0.89	0.85	42.4	67.9	1.6

Table 2. Results from microwave analysis: f, g, q are quality factors defined by Coe et al. (1978)

Tabla 2. Resultados del análisis por microondas: f, g, q son los factores de calidad definidos por Coe et al (1978)

different areas at the same periods of time [Kovacheva, 1997; Genevey & Gallet, 2003].

Conclusions

The Microwave system is a new tool for archaeointensity studies. The relatively low rate of successful results shown in this example has to be put into context. Archaeointensity measurements would have been completely unattainable for these samples using conventional methods. On one hand the samples are smaller than the standard palaeomagnetic core; on the other hand thermomagnetic curves suggest that heating the samples results in severe alteration. Possibly alteration problems already occur using microwave radiation but definitely would have been worse using a conventional oven.

Results from sample T1 could be assigned an older age than to talaiotic remains (see fig. 2). However, this result is based on a single measurement and predictions from model Cals7K from Korte and Constable (2005) could also be inaccurate.

Future work will include the enlargement of measurements from samples of this site, trying to constraint the assigned ages of the remains, both using contextual arguments and additional dating techniques.

References

-
- Figure 2. Archaeointensities obtained, line is Cals7K.2 model predictions at the site ($39^{\circ}36' N$, $2^{\circ}58' E$).**
- Figura 2. Arqueointensidades obtenidas, la linea indica la previsión del modelo Cals7K.2 en el yacimiento ($39^{\circ}36' N$, $2^{\circ}58' E$).
- 108(B5), 2228, doi:10.1029/2001JB001612..
- Acknowledgments**
- Financial support from AARCH-Research Training Network (UE) is acknowledged.
- Korte, M. and Constable, C.G., (2005) Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K. *Geochem., Geophys., Geosys.*, 6(2), Q02H15, doi:10.1029/2004GC000801.
- Kovacheva, M. (1997) Archeomagnetic database from Bulgaria. *Phys. Earth planet. Inter.*, 102, 145-151.
- Núñez, J.I., Osete, M.L., Ruiz-Martínez, V.C., Fabien A., and Tarling, D.H. (2003) A first secular variation curve for the Iberian Peninsula. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 13381.
- Riisager, P and Riisager, J., (2001) Detecting multidomain grains in Thellier palaeointensity experiments. *Phys. Earth planet. Inter.*, 125, 111-117.
- Thellier, E and Thellier, O., (1959) Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Géophys.*, 15, 285-376.
- Walton, D., Share, J., Rolph, T.C. and Shaw, J., (1993) Microwave magnetisation. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 109-111.
- Haese, R. R. (2000) The reactivity of iron. En: *Marine geochemistry*, Schulz, H.D. and Zabel, M. (eds.). pp. 233-262. Springer, Berlin.
- Coe, R.S., Grommé, S. and Mankinen, E.A. (1978) Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *J. geophys. Res.*, 83(B4), 1740-1756.
- Genevey, A. and Gallet, Y. (2003) Eight thousand years of geomagnetic field intensity variations in the eastern Mediterranean. *J. geophys. Res.*,

Archaeomagnetic dating study of the vitrified wall at the Late Bronze age settlement of Misericordia (Serpa, Portugal)

Gianluca Catanzariti¹, Gregg McIntosh¹, Enrique Diaz Martinez²,
António M. Monge Soares³, M. L. Osete López¹

1 – UCM, Universidad Complutense de Madrid – gcatanza@fis.ucm.es

2 – IGME, Instituto Geológico y Minero de España

3 – ITN, Instituto Tecnológico e Nuclear Sacavém

Abstract

The Misericordia archaeological site is located close to the city of Serpa (Portugal) on the left bank of the River Guadiana. Based on pottery collected during several archaeological surveys, (namely pattern-burnished pottery shards and fragments of ceramic vessels decorated with stamps or red, Iberian style painted bands), it can be concluded that the site was occupied during two periods separated by a hiatus: Late Bronze Age and Second Iron Age. Debris and stone structures identified at the settlement show that some archaeometallurgical activities were carried out at the settlement.

A reference archaeomagnetic geomagnetic Secular Variation Curves (SVC) has recently been proposed for the Iberian Peninsula, which may now be used for archaeomagnetic dating. With this purpose, a directional archaeomagnetic study has been carried out on 17 cylindrical specimens, drilled from a vitrified wall probably representing the remains of a *furnace*. The obtained direction has been relocated to Madrid ($D=21.4^\circ$, $I=56.5^\circ$, $\alpha_{95}=2.5^\circ$ $K=305.0$) and compared with the Iberian SVC. It matches the curve in two chronological intervals: 1) 717-939 A.D., 2) 834-709 B.C. The former can be discarded on the basis of archaeological criteria, whilst the latter corroborates the chronological interpretation based on the pottery style and on the settlement typology.

Additional rock magnetic experiments (hysteresis loops, IRM acquisition curves, thermal demagnetisation of 3-axis IRM, anisotropy of susceptibility) have been carried out on samples from all of the lithologies involved in the archaeomagnetic study (gneiss, schists and highly

porous and vitrified rocks), to determine the magnetic mineralogy. The results indicate the coexistence of low and high coercivity phases (magnetite and hematite), with a wide grain size distribution of the magnetite phase. Despite the highly foliated nature of the rock types, no systematic anisotropy effects are observed as the stones used in construction of the wall were randomly oriented. Moreover, the extremely high temperatures reached act to erase the pre-existing foliation.

Variação secular em sedimentos dos últimos 40 ka da margem Atlântica da Galiza: ambiente sedimentar e registo direccional do campo geomagnético

Paleosecular variation in sediments from the last 40 kyr at the Galician Atlantic Margin: sedimentary environment and direccional record of the geomagnetic field

Rute Coimbra (*), Daniel Rey (*), Kais Mohamed (*), Federico Vilas (*)

(*) Dpto. de Geociencias Marinas, Universidad de Vigo, 36200 Vigo, España, rcoimbra@uvigo.es

RESUMO

Os valores direccionals obtidos neste trabalho reflectem algumas variações das fácies magneto-químicas previamente estabelecidas, permitindo o reconhecimento de depósitos sedimentares distintos. Os valores de inclinação encontram-se dentro do intervalo esperado e parecem indicar algumas transições de fácie, sugerindo que a relação entre parâmetros direccionals e processo sedimentar terá sido preservado ao longo do tempo.

ABSTRACT

Direccional values obtained in this work partially match the magnetochemical facies previously established, allowing the recognition of distinct sedimentary deposits. The inclination records are within the expected values and seem to point out some facies transitons, suggesting that the relation between direccional parameters and sedimentary process was kept over time.

Key words: Geomagnetic field, paleosecular variation, depositional environment, magnetic properties.

Introdução

Na tentativa de explicar as variações observadas nas componentes do campo geomagnético, vários modelos têm sido propostos. Actualmente, a mais aceite é o GAD (*Geocentric Axial Dipole*), em que o campo magnético é produzido por um dipolo localizado no centro da Terra, alinhado com o eixo de rotação. Apesar de não contemplar todas as variações observadas actualmente, cerca de 90% do comportamento do campo geomagnético pode ser

explicado com base numa alteração deste modelo (GAD inclinado).

À deriva dos pólos em torno do valor que seria esperado segundo o modelo GAD designa-se de variação paleosecular. A amplitude desta variação depende do ponto à superfície que se considera, mas são comuns valores entre 30 e 40° (Tauxe, 1998).

Trabalhos levados a cabo por Thouveny et al., 2004 em testemunhos recolhidos ao longo da Margem Ibérica revelam uma variabilidade no registo direccional do campo

geomagnético atribuída a variação secular, estabelecendo uma curva de referência para esta zona.

Neste trabalho é explorada a relação entre registo direccional do campo geomagnético e o ambiente sedimentar verificado.

Zona de estudo

A área de estudo localiza-se ao largo da costa Galega, no flanco sudoeste da Banco da Galiza. A análise morfológica de detalhe realizada por Llave et al., *in press*, revelou a existência de estruturas tectónicas (escarpa de

falla de direcção N-S); erosivas (ravinhas, cicatrizes de deslizamento, canais interlobulares e canal principal); e deposicionais (cunhas sedimentares, lóbulos sedimentares e depósitos de cobertura) (figura 1).

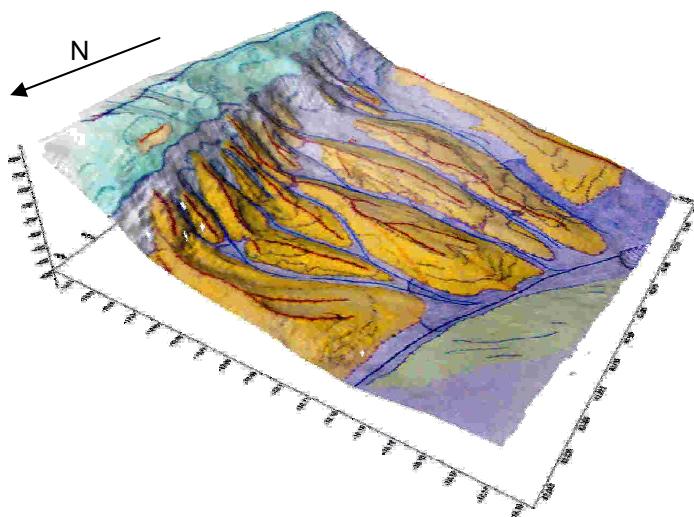


Figura 1- Esboço morfológico da área de estudo (Llave et al, *in press*).

Trabalhos prévios realizados nos testemunhos estudados (Alonso et al, *in press*) sugerem o estabelecimento de fácies sedimentares por métodos visuais e granulométricos, apontando para o predomínio de fácies turbidíticas de natureza variada (biogénica, terrígena...). Dado a que os eventos turbidíticos correspondem a momentos de deposição rápida de grandes quantidades de material, a capacidade de estes sedimentos virem a registar as variações seculares do campo geomagnético seria então reduzida.

Estudos geoquímicos e magnéticos relativos à mesma zona propõem uma zonação baseada em maior número de variáveis, sendo estas de carácter mais quantitativo. Em Rey et al, *in press* estabelece-se um conjunto de fácies magneto-químicas que reflectem não só os processos sedimentológicos que dominam cada horizonte, como também os diagenéticos.

Material e métodos

Neste trabalho foram analisados os testemunhos TG4 (escarpa de falha), TG8 (crista de lóbulo) e TG10 (canal interlobular). Os dados direccionalis dos U-channels foram obtidos no Laboratório de

apresentam-se os valores obtidos para os testemunhos analisados.

As variações de ambos os parâmetros direccionalis verificam-se num intervalo de cerca de 30° em torno da média para a declinação e cerca de 20° para a inclinação (figura 2). Nesta figura apresentam-se também os dados obtidos por Thouveny et al, 2004, com alguns pontos de correlação.

No testemunho TG8 certas zonas são algo menor variabilidade no que respeita aos parâmetros direccionalis. Esta observação não é tão evidente para TG10.

Discussão

A correlação entre as variações observadas para os dois testemunhos analisados neste trabalho e os testemunhos recolhidos por Thouveny et al, 2004, é mais consistente para o TG10. Este facto poderá dever-se à sua localização num canal interlobular, zona menos influenciada pela deposição turbidítica, em que ocorre uma sedimentação mais lenta, permitindo o alinhamento dos grãos ferrimagnéticos com a direcção do campo geomagnético.

Usando a descrição de fácies magneto-químicas proposta por Rey et al, *in press*, observa-se que, especialmente para o TG8, zonas de menor variabilidade correspondem às fácies Fe-Ca ricas em carbono orgânico (Org-FeCa), de origem turbidítica. A variabilidade direccional intrafácies que se observa quando esta fácie é mais espessa poderá resultar da progressão de uma frente diagenética que é razoável supôr dado à elevada quantidade de carbono orgânico existente. Os

Geofísica Marinha da Universidade de Bremen usando o magnetómetro criogénico 2G. Os dados relativos às amostras discretas foram analisados no Laboratório de Paleomagnetismo, Arqueomagnetismo e Magnetismo Ambiental da Universidade de Vigo usando os aparelhos Minispin da Mollspin e desmagnetizador AF AGICO LDA-3/AMU-1 (desmagnetização AF da NRM aplicando campos crescentes até 100mT).

Resultados

Os testemunhos foram recolhidos à latitude de 41.9° N. Pelo modelo do GAD, a inclinação esperada para esta localização será de 60.8° (declinação=0°). Na tabela 1

	U-channels	Amostras disc.
TG8	63.8° ($\alpha_{95} = 0.44$)	59.8° ($\alpha_{95} = 2.45$)
TG10	62.2° ($\alpha_{95} = 0.47$)	64.1° ($\alpha_{95} = 2.21$)
GAD	$\text{tg } I = 2 \text{tg } \text{latitude} \Leftrightarrow I = 60.8^\circ$	

Tabela 1- Média fisheriana dos dados de inclinação.

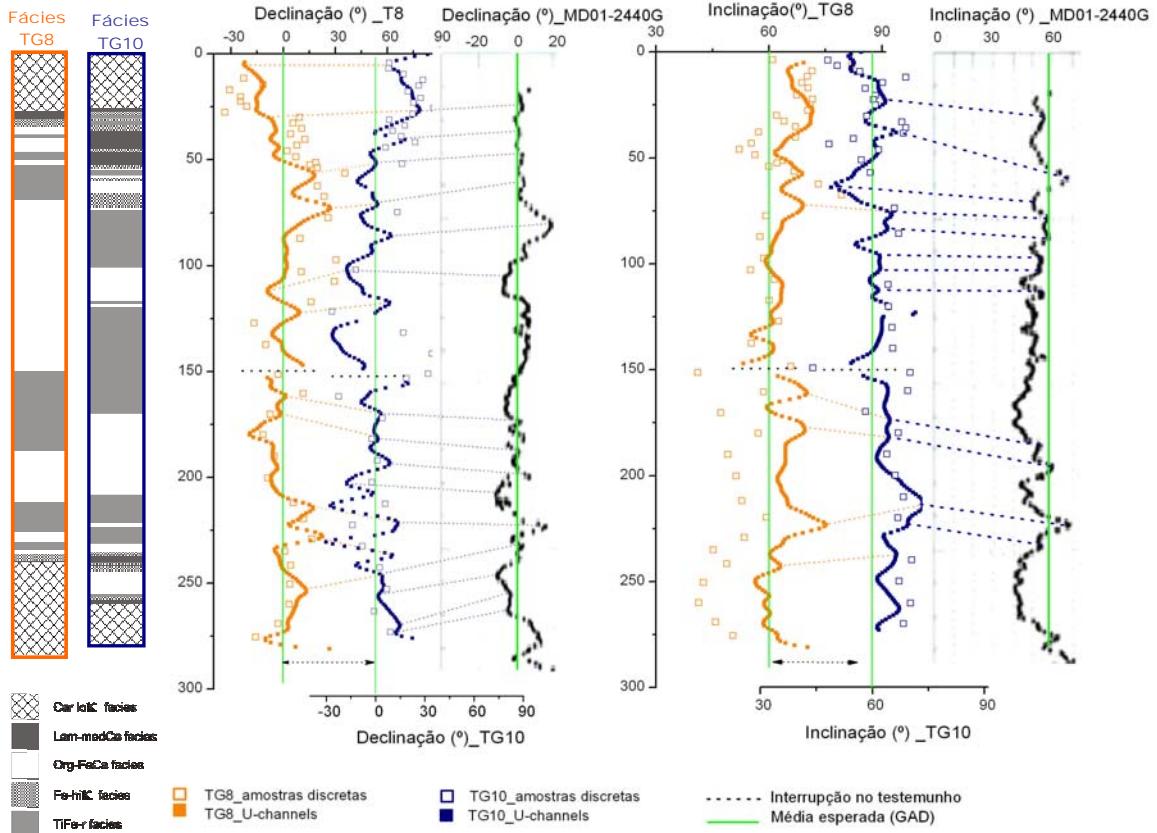


Figura 2 – Inclinação e declinação do TG8 e TG10 e testemunho MD01-2440G de Thouveny *et al.*, 2004, com identificação das fáscies magneto-químicas estabelecidas em Rey *et al.*, *in press*.

picos mais expressivos do TG8, tanto de declinação como inclinação, marcam sensivelmente a base e topo das fáscies ricas em Ti e Fe (TiFe-r) (também depósitos turbidíticos), evidenciando o início de diferentes eventos turbidíticos.

O testemunho TG10 apresenta maior número de fáscies do que o TG8, sendo estas também de menor espessura. O registo direccional do TG10 evidencia este facto ao apresentar muitas oscilações nos valores de declinação e inclinação. Ainda assim, nas fáscies Org-FeCa há menor variabilidade, confirmando sua origem turbidítica.

Conclusões

A análise das variações direcionais demonstrou ser útil na identificação de distintos depósitos sedimentares. Os sedimentos estudados terão preservado a informação geomagnética secular,

permitindo a sua correlação com outros testemunhos recolhidos na Margem Ibérica, o que parece apontar para bons resultados em futuros estudos.

Agradecimentos

Este trabalho é a contribuição número 379 do grupo GEOMA (XM2), dos projectos REN2003-02822 do MEC de Espanha e PDGCIT3RMA30101PR da Xunta da Galiza.

Referencias

- Alonso, B., Ercilla, G., Casas, F., Farrán, M., García, M., Rey, D., Rubio, B., (*in press*). Pleistocene and Holocene sedimentary facies in the SW Galicia Bank (NE Atlantic Spanish Margin). *Mar. Geol.*
- Butler, R. (1998) *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Electronic edition. 238 pp.
- Llave, E., et al (*In press*). Morphological features analysis of the SW Galician Bank half-graben : a slope apron example. *Mar. Geol.*
- Rey, D., Rubio, B., Mohamed, K., Vilas, F., Alonso, B., Ercilla, G., Rivas, T.,

(*in press*). Detrital and early diagenetic processes in Late Pleistocene and Holocene sediments from the Galicia Bank inferred from high-resolution environmental and geochemical records. *Mar. Geol.*

Tauxe, L., (1998) *Paleomagnetic principles and practice*. Kluwer Academic Press, 299 pp.

Thouveny, N., Carcaillat, J., Moreno, E., Leduc, G., Nérini, D., 2004. Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP: a stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese Margin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 219, 377-396.

Detecção de eventos de Heinrich através do estudo das propriedades magnéticas de sedimentos do Plistoceno Superior e Holocene da Margem Ibero Atlântica

Detection of Heinrich events by studying the magnetic properties of sediments from the Upper Pleistocene and Holocene at the Iberian Atlantic Margin

Rute Coimbra (*), Daniel Rey (**), Kais Mohamed (**), Federico Vilas (**), Thomas Frederichs (***)

(*) Dpto de Geociencias Marinas, Universidad de Vigo, 36200 Vigo, España, rcoimbra@uvigo.es

(**) Dpto de Geociencias Marinas, Universidad de Vigo, 36200 Vigo, España

(***) Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, D-28334 Bremen, Germany

RESUMO

Dados magneto-mineralógicos, em concreto, susceptibilidade magnética, ARM e medições de baixa temperatura (remanescência e susceptibilidade) foram usados para caracterizar a mineralogia dos eventos de Heinrich identificados em testemunhos recolhidos na margem Galega. A formação de “loops” nos gráficos de ARM vs. K indica uma tendência de aumento de tamanho de grão nestes níveis, o que, associado à identificação de grãos de magnetite MD através de medições de baixa temperatura, apoia a ideia de que este material terá sido transportado por “ice- rafting”. O uso de técnicas de baixa temperatura provou ser um método rápido e simples de identificação da mineralogia magnética, tendo permitido o reconhecimento dos eventos H_1 a H_3 na margem Galega.

ABSTRACT

Magnetomineralogical data, in particular magnetic susceptibility, ARM and low temperature (remanence and susceptibility) measurements, are used to characterize the mineralogical components of Heinrich layers identified on gravity cores extracted at the Galician Bank. The formation of loops on the ARM vs. K plot shows an increasing grain size trend at these levels, that, along with the identification of MD magnetite grains by low temperature techniques, supports that ice rafting was responsible for the transport of such material. The use of low temperature techniques proved to be a fast and simple way to identify the magnetomineralogy of Heinrich events and allowed the recognition of the events H_1 to H_3 at the Galician Margin.

Key words: Magnetic properties, Heinrich events, ice rafting, low temperature measurements, mineralogy, grain size.

Introdução

As flutuações climáticas registadas durante o último Período Glacial deixaram marcas no registo sedimentar do Atlântico Norte. Períodos de instabilidade dos principais

mantos de gelo promoveram o lançamento de armadas de icebergs que transportavam sedimentos desde fontes distais (“ice-raftered debris”-IRD). Estes depositaram-se no fundo oceânico, formando camadas sedimentares particulares,

designadas como camadas de Heinrich (Heinrich, 1988). As camadas de IRD podem ser detectadas pelo seu sinal magnético. A latitudes que se localizem dentro do cinturão de Rudimann (Rudimann, 1977) (40-55°N), as camadas de IRD

podem ser reconhecidas pelo aumento nos valores de susceptibilidade magnética (K) até 400×10^{-6} SI, desde valores de fundo de 100×10^{-6} SI (Robinson et al, 1995).

Estudos efectuados por outros autores (Thouveny et al, 2000; Moreno et al, 2002) permitiram a identificação de eventos de Heinrich ao longo desta margem. Este trabalho propõe a caracterização da mineralogia dos eventos de H_1 a H_3 através de uma metodologia magneto-mineralógica.

A margem Ibérica reúne condições adequadas ao estudo da dinâmica climática do Plistoceno e Holoceno, já que a taxa de sedimentação verificada ao longo desta margem é elevada (10 a 20 cm/ka) e a latitude a que se encontra coincide com a localização da Frente Polar durante o Último Máximo Glacial (Moreno et al, 2002).

Área de estudo

O Banco da Galiza localiza-se a cerca de 300 km ao largo da costa Galega (figura 1).



Figura 1- Localização da área de estudo.

A área de estudo situa-se no flanco sudoeste deste Banco, a profundidades de 3363 a 4171 metros de profundidade.

As correntes que fluem para Norte ao longo da margem Ibérica resultam do equilíbrio termohalino entre várias massas

de água. A zona de extração de testemunhos encontra-se sob a influência da Lower North Atlantic Deep Water (LNADW) e da Antarctica Bottom Water (AABW) (Abreu et al, 2002).

O estudo morfológico realizado por Llave et al, *in press*, revelou a existência de três ambientes sedimentares distintos: escarpa de falha de direcção N-S; lóbulos deposicionais e canais interlobulares.

O registo sedimentar desde há 30 ka é dominado por turbiditos, intercalados por deposição hemipelágica e de camadas de IRD. Durante os últimos 14 ka há dominância de deposição hemipelágica, como consequência do aumento do fluxo das correntes de fundo (Rey et al, *in press*).

Material e métodos

Os testemunhos seleccionados para este estudo representam cada um dos ambientes sedimentares estabelecidos: TG4 -escarpa de falha; TG8 -crista do lóbulo;

realizadas no Laboratório de Geofísica Marinha da Universidade de Bremen. A susceptibilidade de baixo campo (χ) foi medida no aparelho KLY-2 da AGICO. A ARM_{100} foi medida com um magnetômetro criogénico 2G com campos de 0 a 100 mT, com campo DC super imposto de 40 μ T. Para as medições realizadas no MPMS-XL7 foram preparadas subamostras de cerca de 20 mg em cápsulas de gel que se submeteram a ciclos de remanescência ($SIRM_{300K}$) a 5T e a medições de susceptibilidade a baixa temperatura com campo DC de 0,4mT a 110Hz.

Resultados

Os valores de χ obtidos para as amostras discretas foram contrastados com valores descritos por outros autores (Moreno et al, 2002; Kissel, 2005), tendo-se verificado que se encontram dentro dos mesmos intervalos de variação (valores de fundo de 100×10^{-9} m³/kg e 200 a 300×10^{-9} m³/kg como valores máximos).

A projecção dos parâmetros ARM (mA/m) *vs.* K (10^{-6} SI) (figura 2) revelou que os níveis correspondentes a concentração magnética mais elevada correspondem também a tamanho de grão mais grosso. Este comportamento verificou-se em todos os testemunhos e é descrito por Kissel, 2005 como característico das camadas de Heinrich a latitudes dentro do cinturão de Rudimann.

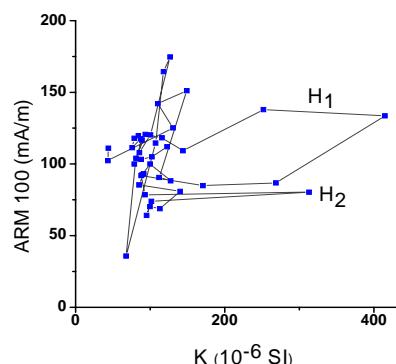
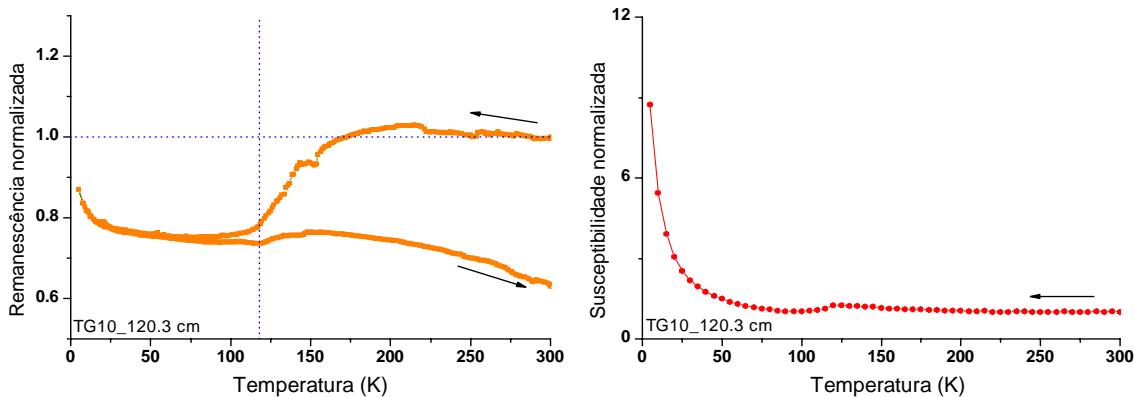


Figura 2- ARM_{100} vs. K (TG10).



**Figura 3- Resposta às técnicas de baixa temperatura por parte da amostra TG10_120.3cm
(valores normalizados pelo valor inicial de 300K).**

As medições de baixa temperatura realizadas em amostras com valores de χ elevados (TG8_48.6 e 51.4cm; TG10_120.3cm (figura 3) e TG4_27.0cm) apresentaram perda de remanescência parcial de 20-30% e total de 40-50% e a reversibilidade do seu comportamento verificou-se para valores abaixo de 90K. Os valores de susceptibilidade de baixa temperatura para estas amostras revelaram uma diminuição brusca a 120K. Das demais amostras analisadas, as que contêm elevados valores de CaCO₃ não reagiram às técnicas de baixa temperatura, já que a quantidade de grãos magnéticos é demasiado baixa para a sensibilidade do aparelho.

Conclusões

Os valores máximos obtidos para χ são os esperados para os eventos de Heinrich à latitude do cinturão de Rudimann.

A formação de “loops” na projecção de ARM vs. K confirma o aumento de tamanho de grão da fracção magnética, corroborando a hipótese de transporte por icebergs. Apesar da influência continental verificada na zona de estudo, responsável pelo transporte algum de material detritico (turbiditos), este método de identificação de eventos de Heinrich demonstrou-se eficaz.

As percentagens de perda de remanescência parcial e total nas

medidas de baixa temperatura indicam a presença de grãos de magnetite MD ($0.22\mu\text{m}$) (valores obtidos em material sintético por Özdemir et al, 2002). A reversibilidade do comportamento verificado abaixo de 90K é também característica de grãos de magnetite pura (Özdemir et al, 2002).

A variação brusca de susceptibilidade de baixa temperatura vem confirmar a estequeometria dos grãos de magnetite identificados, já que a transição cristalográfica da fase cúbica à fase monoclinica (transição de Verwey a 120K) ocorre em magnetite pura.

As técnicas de baixa temperatura revelaram ser eficazes na caracterização mineralógica dos eventos de Heinrich, de forma expedita e simples, consumindo apenas 20mg de amostra.

Agradecimentos

Este trabalho é a contribuição número 380 do grupo GEOMA (XM2), dos projectos REN2003-02822 do MEC de Espanha e PDGCIT3RMA30101PR da Xunta da Galiza.

Referencias

- Abreu, L., Shackleton, N., Schönfeld, J., Hall, M., Chapman, M., 2003. Millennial-scale oceanic climate variability off the Western Iberian margin during the last two glacial periods. *Mar. Geol.* 196, 1-20.

Heinrich, H., 1988. Origin and consequences of cyclic ice-raftering in the Northeastern Atlantic Ocean during the past 130000 years. *Quat. Res.* 29, 142-152.

Kissel, C., 2005. Magnetic signature of rapid climatic variations in glacial North Atlantic, a review. *C. R. Geosciences* 337, 908-918.

Llave, E., et al (*In press*). Morfological features analysis of the SW Galician Bank half-graben : a slope apron example. *Mar. Geol.*

Moreno, E., Thouveny, N., Delanghe, D., McCave, N., Shackleton, N., 2002. Climatic and oceanographic changes in the Northeast Atlantic reflected by magnetic properties of the sediments deposited on the Portuguese Margin during the last 340 ka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 202, 465-480.

Özdemir, Ö., Dunlop, D., Moskowitz, B., 2002. Changes in remanence, coercivity and domain state at low temperature in magnetite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 194, 343-358.

Rey, D., Rubio, B., Mohamed, K., Vilas, F., Alonso, B., Ercilla, G., Rivas, T., (*In press*) Detrital and early diagenetic processes in Late Pleistocene and Holocene sediments from the Galicia Bank inferred from high- resolution enviromagnetic and geochemical records. *Mar. Geol.*

Robinson, S.G., Maslin, M.A., McCave, I.N., 1995. Magnetic susceptibility variations in Upper Pleistocene deep-sea sediments of the NE Atlantic: Implications for ice rafting and paleocirculation at the last glacial maximum. *Paleoceanography*, vol.10, No. 2, 221-250.

Rudimann, W.F., 1977. Late Quaternary deposition of ice rafted sand in the subpolar North Atlantic (lat. 40° to 65°). *Geol. Soc. Am. Bull.* 88, 1-12.

Thouveny, N., Moreno, E., Delange, D., Candon, L., Lancelot, Y., Shackleton, N., 2000. Rock magnetic detection of distal ice-raftered debries: clue for the identification of Heinrich layers on the Portuguese margin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 180, 61-75.

Superparamagnetic magnetite as part of the animal magnetic sense.

A.F. Davila

*NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. 94087 E-mail: afernandez-davila@arc.nasa.gov

This work focuses on the possible role of biogenic magnetite particles as part of the animal magnetoreceptor mechanism. While the existence of a magnetic sense in different groups of animals has been clearly demonstrated, the nature and functioning of the mechanism responsible for magnetic field perception remains poorly understood. Currently, two models of the magnetoreceptor are discussed: magnetoreception based on chemical reactions and magnetoreception based on magnetite organelles. The later, assumes intracellular biogenic magnetite particles that respond to the geomagnetic field stimulus, thus inducing a nervous signal that is interpreted for directional and positional information. Traditionally, it has been accepted that a putative model of a magnetite based magnetoreceptor, ought to be based on magnetic single-domain (SD) particles, analogue to that found in magnetotactic bacteria. However, histological studies in birds challenge this view. These studies have identified magnetite concretions in nervous cells in the upper beak skin of homing pigeons (*Columba livia*). The magnetite particles average 5 nm in size, and fall within the superparamagnetic (SP) size range for magnetite. The SP particles are clustered in spherules of approx. 1 μ m in diameter, with 15-20 spherules occurring within each nervous terminal, in a chain like arrangement. While single SP particles are arguably not suitable for magnetoreception, clusters of SP particles show characteristic magnetic responses that fulfill the requirements of the animal magnetic sense, and can potentially be used for magnetic field perception. We have developed several models of magnetoreceptor based on the magnetic interactions that arise between SP clusters in the presence of a magnetic field. These interactions lead to attraction-repulsion and torque-like responses that can potentially be transformed into nervous signals. The models are able to explain observed responses of birds to artificial magnetic field treatments.

Biogenic magnetic crystals as fossil biomarkers on Mars

A.F. Davila*, E.I. Friedmann*, J. Wierzchos**, C. P. McKay*

*NASA Ames Research Center. Moffett Field, CA. 94087 E-mail: afernandez-davila@arc.nasa.gov

** Servei de Microscopía Electrónica, Universitat de Lleida, Lleida, Spain.

ABSTRACT

In the coming decades, research of fossil traces of life on Mars will be limited to near-surface zones, where in all likelihood organic molecules have been destroyed by the highly oxidizing atmosphere and soil. Therefore alternative, more resistant biomarkers need to be targeted. Magnetotactic bacteria (MB), ubiquitous on Earth in aquatic habitats, form in their bodies chains of magnetic single-domain (SD) crystals. Upon cell death and lysis, these crystals accumulate in the sediment forming distinct fossil deposits. Mars possessed in the past the two key ingredients for the appearance of magnetotaxis: a magnetic field and liquid water. The recent finding of fossil lakebeds in Gusev Crater, shows that Mars also possessed the niches necessary to host MB, making these ancient lakebeds, likely sites of fossil magnetic chains deposits.

The use of magnetic SD crystals as fossil biomarkers presents, nevertheless, important challenges, both from a technological and a conceptual stand point. For that reason, fossil lakebeds on Earth offer convenient analogue sites in which we can test our ideas and techniques for the search of fossil magnetic chains on Mars. A detailed understanding of the physical, chemical and physiological properties of these crystals is paramount in order to develop efficient and conclusive techniques for their detection. We will debate on the challenges involved in the search of fossil chains of magnetic crystals on Mars, and offer alternative solutions based on work conducted on sites on Earth, which are analogue to past Martian environments.

Introduction

The search for traces of fossil life on Mars is conditioned by two important facts: (1) soft bodied bacteria, the only organisms likely to have been present on early Mars, generally do not leave behind good fossils, and (2) organic molecules, the best chemical fossil biomarkers, are promptly destroyed, or at least severely damaged, in the highly oxidizing Martian atmosphere and soil, at least on near-surface. Therefore, if life ever existed on Mars, its record is likely to be found in minerals formed by microorganisms [1].

Bacteria mediate the formation of a large number of diverse minerals, either through biologically induced

mineralization (BIM) or biologically controlled mineralization (BCM) [2]. While the products of BIM normally do not differ from that of inorganic processes, BCM results in distinct minerals, characterized by a biological imprint.

Magnetic bacteria (MB) arguably offer the best example of bacterial BCM. MB comprise a distinct group of Gram-negative prokaryotes, characterized by the presence of magnetic single-domain (SD) crystals (*magnetosomes*) within their body, arranged in one or several chains (Figure 1).

These chains of crystals are responsible for the

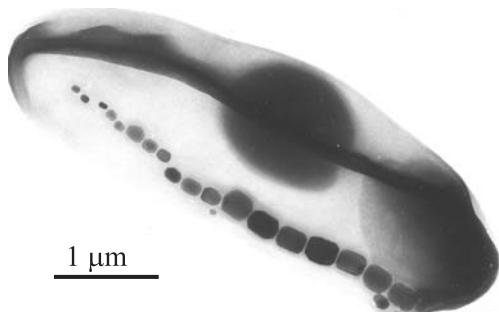


Fig 1. Magnetotactic vibrio

observed magnetotactic response of MB (i.e. displacement along magnetic field lines) [3].

Chains of biogenic SD crystals can be preserved in sediments and sedimentary rocks, providing highly resistant and characteristic fossil traces [4]. If present on Mars, fossil chains of magnetosomes could potentially have resisted four

billion years of oxidative atmosphere and would be identifiable as biomarkers.

Constraints on the presence of MB on Mars

Magnetotaxis on Earth appeared repeatedly and independently in different groups of bacteria [5], suggesting that it is a universal solution to the problem of bacterial orientation. Therefore, if life ever existed on Mars, the possible presence of MB in its past history is only constrained by the existence of a Martian magnetic field, and of liquid water on its surface.

Present day Mars lacks a planetary magnetic field, as shown by measurements conducted from space orbiters. Yet, Mars once possessed a magnetic field, as was confirmed when the Mars Global Surveyor spacecraft obtained global, vector magnetic field measurements of the Martian crust [6].

Additionally, the recent NASA Mars Rovers and the ESA Mars Express Orbiter have provided evidence of aqueous sedimentation or aqueous alteration [7], and of water ice on the Martian surface, a finding consistent with models of a warmer, wetter Martian past.

Finally, the NASA rover Opportunity recently identified fossil lakebeds in Gusev Crater, Mars, showing that the planet not only once possessed the key ingredients for magnetotaxis, but also the niches to host MB. Such sites would be ideal for the search of remnants of chains of magnetic particles.

The search for Martian MB begins on Earth.

Our approach in the search for magnetofossils on Mars starts by first studying Earth analogue sites, which we use as a test ground for our theories and techniques. Yet, even the search of fossil chains of magnetosomes in ancient sedimentary deposits on Earth, presents important conceptual and technological challenges.

Due to their small size, chains of magnetofossils are prone to undergo chemical and physical alterations, which blur their characteristic properties. This constraint will be exemplified with a study of the contribution of magnetosomes to the magnetic properties of modern lake sediments [8].

Furthermore, up to this day, the study of magnetofossils has been directed towards the search of magnetic SD crystals in sediments. Yet magnetic SD crystals also form through non-biological processes, a fact that disputes the idea that these particles can be used as biomarkers. Individual magnetic SD crystals also have little meaning from a biological stand point. In contrast,

information. It is the chains of magnetic SD crystals the ones responsible for the observed magnetotactic response of MB. Furthermore, a chain structure is not a stable arrangement for magnetic particles; therefore its presence in natural samples can only be explained through the intervention of life. As a result of the ideas exposed above, we argue that the use of biogenic magnetite crystals as biomarkers holds valid as long as their chain arrangement is preserved

We know where and what... but how?

Presently, the search for biogenic magnetic minerals is based on rock-magnetic techniques and/or electron microscopy imaging. Both approaches require a precise knowledge of the physical, chemical and physiological properties of these crystal chains. Yet, it will be shown that present day rock magnetic techniques, do not suffice to detect biogenic SD magnetite crystals in natural samples [9]. On the other hand, electron microscopy can indeed provide unambiguous proof of the presence of biogenic magnetite particles in natural samples. Yet the traditional use of

Transmission Electron Microscopy (TEM) also presents limitations as to the type of samples that can be analyzed and the information that can be obtained from the observed particles.

We propose the use of Backscattered-Scanning Electron Microscopy (BSE-SEM) as a more suitable technique for the detection and characterization of fossil chains of magnetic crystals

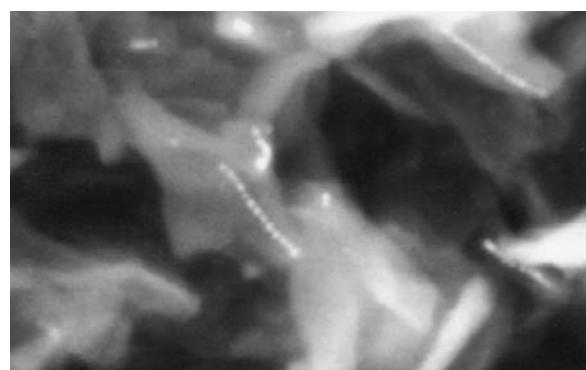


Fig 2. BSE-SEM image of a magnetosome chain

crystal chains of bacteria are cell organelles, complex structures of strictly defined morphology that can only be produced following a blueprint encoded in genetic

in natural samples (Figure 2). As a non invasive technique, BSE-SEM can provide important qualitative and quantitative information about the particles. Although this technique lacks the resolution of the TEM, technological advances are encouraging. We will present and discuss results on the search for fossil chains of magnetic minerals in terrestrial sites which are possible analogues to past Martian environments, using both TEM and BSE-SEM techniques.

- [1] J. F. Banfield, J. W. Moreau, C. S. Chan, S. A. Welch, and B. Little (2001). Mineralogical signatures and the search for life on Mars. *Astrobiology* 1: 447-465
- [2] H. A. Lowenstam (1980). Minerals formed by organisms. *Science* 201: 1126-1131.
- [3] R. P. Blakemore (1975). Magnetotactic Bacteria. *Science* 190: 377-379.
- [4] J. L. Kirschvink and H. A. Lowenstam (1979). Mineralization and magnetization of chiton teeth: Paleomagnetic, sedimentologic, and biologic implications of organic magnetite. *Earth & Planetary Science Letters* 44: 193-204.
- [5] E. F. DeLong, R. B. Frankel, D. A. Bazylinski (1993). Multiple evolutionary origins of magnetotaxis in bacteria. *Science* 259: 803-806.
- [5] M. Acuña, J. Connerney, N. Ness, R. Lin, D. Mitchell, C. Carlson, J. McFadden, K. Anderson, H. Reme, C. Mazelle, D. Vignes, P. Wasilewski and P. Cloutier (1999). Global distribution of crustal magnetization discovered by the mars global surveyor MAG/ER experiment. *Science*. 284: 790-793.
- [6] S. W. Squyres et al. (2004). In situ evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum, Mars. 306: 1709-1714.
- [7] Y. Pan, N. Petersen, A. F. Davila, L. Zhang, M. Winklhofer, Q. Liu, M. Hanzlik, and R. Zhu (2005). The detection of bacterial magnetite in recent sediments of Lake Chiemsee (Southern Germany). *Earth and Planetary Science Letters* 232: 109–123
- [8] Y. Pan, N. Petersen, M. Winklhofer, A. F. Davila, Q. Liu, T. Fredericks, M. Hanzlik, R. Zhu (2005). Rock magnetic properties of uncultured magnetotactic bacteria. *Earth and Planetary Science Letters* 237: 311–325.

Magnetismo ambiental y contaminación antropogénica en el río Anllóns (Galicia). Estudio preliminar.

Environmental magnetism and anthropogenic pollution in the Anllóns River (Galicia). A preliminary study.

R. Devesa (*), M.T. Barral, F. Díaz-Fierros

Departamento de Edafología e Química Agrícola. Facultad de Farmacia. 15782. Universidad de Santiago de Compostela. (*) Corresponding author: rosadrey@usc.es

ABSTRACT

Magnetic susceptibility was used as an indicator of pollution in a fluvial basin in the NW of Spain. The areas of the basin under intensive labours of agriculture and livestock activities, showed higher values of magnetic susceptibility, as a consequence of higher erosion rates. Significantly correlations were found with some metallic elements, as Cr, Ni, Co, Cu and Zn, as a result of mining and industrial activities in the area. No significantly differences were observed, in magnetic susceptibility measurements, in the samples sieved by 2 mm and 63 µm, except for sample SD, where As correlates only with <2 mm fraction. Because of this, magnetic properties should not be restricted only to <63 µm. To sum up, magnetic susceptibility measurements, which correlates positively with metallic elements, are considered a good indicator of events of contamination, past and present.

Key words: environmental magnetism, magnetic susceptibility, pollution.

RESUMEN

Se utilizó la susceptibilidad magnética como indicador de la contaminación en una cuenca fluvial del NO de España. Las zonas de la cuenca sometidas a mayor labor agrícola y ganadera, mostraron valores de la susceptibilidad magnética más altos, consecuencia de mayores tasas de erosión en esos puntos. Se encontraron correlaciones significativas con determinados elementos metálicos, como Cr, Ni, Co, Cu y Zn consecuencia de las actividades mineras e industriales de la zona. No se encontraron diferencias significativas, en los valores de susceptibilidad magnética, en las muestras tamizadas por 2 mm y por 63 µm, excepto en la muestra SD, en donde se observaron correlaciones significativas con el contenido en As, sólo en la fracción <2 mm. Debido a esto, no debe limitarse sistemáticamente el estudio de las propiedades magnéticas a la fracción <63 µm. En resumen, la medida de la susceptibilidad magnética, que se correlaciona positivamente con niveles de elementos metálicos, se considera un buen indicador de fenómenos de contaminación pasados y presentes.

Introducción

La utilización de registros sedimentarios como método para evaluar los procesos de contaminación acuáticos tiene una larga tradición, siendo

aplicados mayoritariamente para el estudio de las condiciones ecológicas de zonas costeras y ambientes continentales, en lagos y embalses. Asimismo, la utilización de los sedimentos fluviales con fines similares ha ido adquiriendo cada vez mayor importancia (Murray, 1996; Birch et al., 1996), siendo hoy una de las metodologías universalmente aceptadas para la evaluación

de la calidad ambiental de los sistemas fluviales, al mismo tiempo que supone casi el único método que permite establecer series temporales con estos datos.

En Galicia este tipo de estudios, se han orientado sobre todo hacia los sedimentos marinos, en los que se evalúa fundamentalmente la contaminación por metales pesados de las rías (Barreiro et al., 1994; Rubio et al., 2000). Sobre sedimentos fluviales, el precedente más significativo fue el estudio realizado por Belzunde et al. (1997) sobre la contaminación de los sedimentos del río Ulla por metales procedentes de una fábrica de curtidos.

Los estudios de magnetismo ambiental permiten profundizar en los procesos relacionados con el origen, transporte y depósito de los sedimentos. Se han aplicado a estudios de cambio climático (Bidegain et al., 2005) y al estudio de contaminación por metales pesados (Hanesch and Scholger, 2002; Chaparro et al., 2005). En el presente estudio se pretende realizar un estudio preliminar sobre el magnetismo ambiental de los sedimentos de la cuenca del río Anllóns, relacionándolo con las posibles fuentes de contaminación pasadas y presentes.

Área de estudio

La cuenca del río Anllóns pertenece al conjunto de cuencas de Galicia-Costa. Abarca una superficie de unos 516 km². Según Río Barja y Lestegás (1992), el río Anllóns presenta un índice de sinuosidad de 1.43, lo cual permite clasificarlo como un río sinuoso, y un módulo mayor específico de 22.98 l·sg⁻¹·km⁻², por lo que se puede catalogar como de

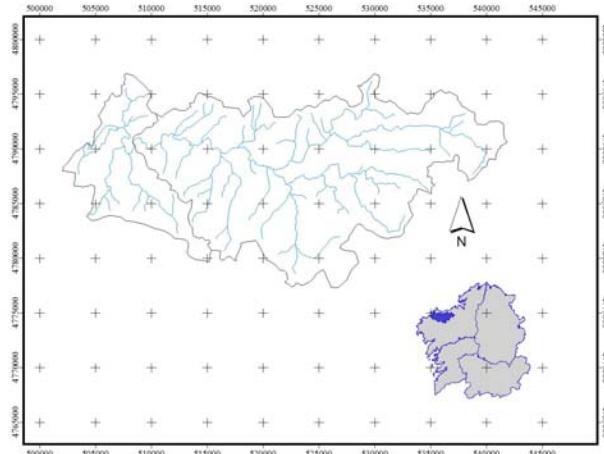


Fig. 1 Localización de la cuenca del río Anllóns

caudal fuerte. El clima es de tipo atlántico húmedo. La cuenca del río Anllóns recibe precipitaciones abundantes, con un máximo invernal característico de los climas oceánicos. El régimen de temperaturas presenta matices típicos de la variedad oceánica, con mínimos situados entre 8 y 9°C en invierno y máximos nunca

superiores a 20°C, por lo que las temperaturas no sufren grandes oscilaciones. Desde el punto de vista litológico, se pueden reconocer en la cuenca rocas de origen metamórfico e ígneo, además de los depósitos aluviales que se pueden encontrar en los últimos tramos del río.

Se recogieron 6 sondeos

Profundidad (cm)	SA ($\chi \cdot 10^{-6}$)	SB ($\chi \cdot 10^{-6}$)	SC ($\chi \cdot 10^{-6}$)	SD ($\chi \cdot 10^{-6}$)	SE ($\chi \cdot 10^{-6}$)
0	25	13	14	88	102
4	24	10	16	86	62
8	32	10	9	93	60
12	23	13	13	104	65
16	19	22	8	100	65
20	31	17	13	91	51
24	50	26	14	82	51
28	56	17	63	81	
32	46	7	18	89	
36	36	8	67	107	
40	46	8	37	112	
44	41	25	16	121	
48	37	12	6	128	
52		14	6	126	
56		14	9	123	
60		32	8	94	
64		31	14	92	
68		39	9	80	
72		39		83	
76		48		68	
80		52			
84		59			
88		63			
92		48			
96		15			
100		22			
104		14			
108		22			
112		21			
116		14			
120		10			
124		11			
128		26			
132		30			
136		36			
140		41			
144		32			

Tabla 1 Valores de susceptibilidad magnética encontrados a lo largo de la cuenca, expresados en $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$

en profundidad, el primero de ellos situado aguas abajo de la localidad de Carballo y el último en la desembocadura del río, en Ponteceso. Cada sondeo se dividió en submuestras de 4 cm cada una, se liofilizaron y se tamizaron por un tamaño de malla de 2 mm y de 63 μm . Se determinó la susceptibilidad magnética (Bartington MS2C). Se determinó el contenido en C, N y S mediante un analizador elemental (LECO– CNS2000) así como el contenido en Al, Fe, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, As, Ti, Co y Cd mediante ICP-MS.

Resultados

Los resultados de susceptibilidad magnética (χ) obtenidos para los diferentes sondeos en profundidad se muestran en la Tabla 1 (vid. supra). Los sondeos recogidos varían en cuanto a su profundidad (24 cm (SE) – 144 cm (SB)). Los valores medios de χ , correspondientes a la fracción <2 mm, varían a lo largo de la cuenca (Fig. 2), siendo los sondeos A, B y C

los que presentan los valores más bajos y los sondeos SD y SE los que presentan los valores más altos. Se encontraron elevados valores de susceptibilidad magnética que coinciden con elevadas concentraciones de algunos elementos metálicos. En el punto de muestreo SB, se observan correlaciones de los valores de susceptibilidad magnética con el contenido en Cr ($r^2=0.665$), Ni ($r^2=0.837$) y Co ($r^2=0.627$). En el punto de muestreo SD, existe una correlación positiva con los niveles de As presentes ($r^2=0.704$). En el punto de muestreo SG, se observan correlaciones positivas con los niveles de Cu ($r^2=0.612$) y Co ($r^2=0.944$). Se analizaron los datos correspondientes a la fracción <63 μm , no observándose diferencias significativas entre la fracción <2 mm y la fracción <63 μm , excepto para el punto de muestreo SD.

Discusión

De los sondeos estudiados, SD y SE, correspondientes a

zonas de intensa actividad agrícola, presentan unos valores medios más altos que los demás sondeos estudiados. Este aumento puede deberse a la erosión de los horizontes A de los suelos cercanos a la cuenca, debido a labores intensivas de cultivos o deforestaciones, que aceleran el grado de erosión de la capa superficial del suelo y favorecen la acumulación de minerales con elevada susceptibilidad magnética en los sedimentos de fondo del río (Mecray et al., 2001).

En cuanto al sondeo SB, las elevadas correlaciones encontradas con Co y Cd pueden explicarse como el resultado de efluentes de origen minero e industrial. Se han encontrado valores elevados de estos dos metales en los sedimentos de diferentes rías en Galicia (Prego, R., 2003), constituyéndose la medida de la susceptibilidad magnética como una herramienta útil en la determinación de niveles anómalos de contaminación por metales pesados.

El SD, localizado aguas abajo de una antigua zona minera, presenta elevadas correlaciones con los niveles de As en la fracción <2 mm. Sin embargo, no se observa una correlación significativa entre el As y la susceptibilidad magnética en la fracción <63 μm . Así, frente a la tendencia de muchos autores a analizar únicamente la fracción <63 μm , por considerar que en ella se acumulan preferentemente los contaminantes, se observa que el análisis de la fracción <2 mm puede ofrecer mayor información acerca de los fenómenos de contaminación antropogénica o enriquecimientos en un determinado metal. Este hecho ya había sido observado con anterioridad por Charlesworth and Lees

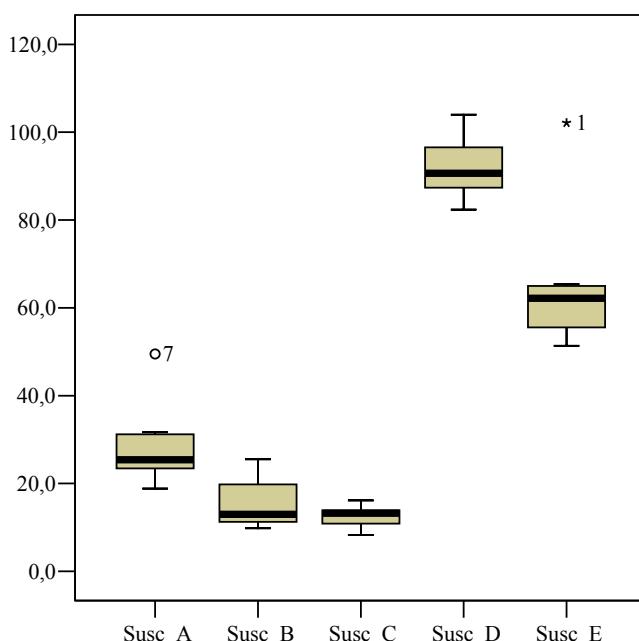


Fig. 2. Diagrama de caja y bigotes de los sondeos recogidos. Las líneas horizontales corresponden a las medianas. Los bigotes representan los valores mínimo y máximo. Los puntos 1 y 7 representan los outliers.

(2001).

El SE, localizado aguas abajo de una depuradora de aguas residuales y de una conservera, presenta correlaciones elevadas con Cu y Co, que se relacionan con la actividad industrial de la zona. En el estudio de la fracción <63 μm , se han encontrado también correlaciones con Cu y Co, así como con Zn ($r^2=0.833$) y Ni ($r^2=0.898$). En consecuencia, no debe limitarse el análisis de la susceptibilidad magnética a una fracción mineralógica, ya que los elementos metálicos pueden encontrarse formando microagregados que alteren su distribución mineralógica. Además, en la fracción <63 μm , se ha encontrado una correlación positiva entre la susceptibilidad magnética y los niveles de fósforo presentes ($r^2=0.799$).

Conclusiones

El estudio del nivel de contaminación por metales pesados, a través de los medios tradicionales, requiere un gran número de determinaciones, lo que supone un elevado coste de análisis, así como determinaciones largas y muy meticulosas. Por lo cual, el uso de las medidas de susceptibilidad magnética ha puesto de manifiesto que puede utilizarse como indicador de niveles anómalos

de elementos metálicos, que indican en qué zonas existe una mayor posibilidad de contaminación antropogénica. El estudio de la fracción <63 μm , muestra correlaciones positivas de la susceptibilidad magnética con Cu, Co, Zn y Ni, entre otros. Sin embargo, el uso de esta herramienta no debe limitarse sistemáticamente a esta fracción, ya que pueden encontrarse enriquecimientos significativos en otras fracciones, como en la muestra SD, en donde se observan correlaciones significativas con los niveles de As presentes.

Referencias

- Birch, G., Siaka, M., Owens, C., 1999. The source of anthropogenic heavy metals in fluvial sediments of a rural catchment: Cox River, Australia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 126:13-25.
- Murray, K., 1996. *Environmental Geology*, 27-54.
- Barreiro, R., Real, C., Carballeira, C., 1994. Heavy metals in sediment cores from a NW Spain estuary. *Bull. Environ. Contam. Tox.*, 53, 3: 368-373.
- Rubio, B., Nombela, M., Vilas, F., 2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ría de Vigo (NW Spain): An assessment of metal pollution. *Marine Poll. Bull.*, 40, 11: 968-980.
- Belzunde, M., Helios-Rybicka, E., Prego, R., 1997. Distribution of heavy metals in the River Ulla and its Estuary (North-West Spain). *Jour. Oceanol. Study*, 2-3: 139-152.
- Bidegain, J., Evans, M., van Velzen, A., 2005. A magnetoclimatological investigation of Pampean loess, Argentina. *Geophys. J. Int.*, 160, 55-62.
- Chaparro, M., Lirio, J., Nuñez, H., Gogorza, C., Sinito, A., 2005. Preliminary magnetic studies of lagoon and stream sediments from Chascomús Area (Argentina)-magnetic parameters as indicators of heavy metal pollution and some results of using an experimental method to separate magnetic phases. *Environ. Geol.*, 49:30-43.
- Prego, R., Cobelo-García, A., 2003. Twentieth century overview of heavy metals in the Galician Rias (NW Iberian Peninsula). *Environmental Pollution* 121, 425-452.
- Charlesworth, S., Lees, J., 2001. The application of some mineral magnetic measurements and heavy metal analysis for characterising fine sediments in an urban catchment, Coventry, UK. *Journal of Applied Geophysics*, 48, 113-125.
- Hanesch, M., Scholger, R., 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environ. Geol.*, 42: 857-870.

Low-angle faulting and footwall rotation at the mid-Atlantic ridge

Fallas de bajo ángulo y rotaciones tectónicas en la dorsal atlántica

M. Garcés (*) and J. Gee (**)

(*) Dept. Stratigraphy, Paleontology and Marine Geosciences, Group of Geodynamics and Basin Analysis, University of Barcelona, 08028-Barcelona, mgarcés@ub.edu

(**) Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92093-0215, jsgee@ucsd.edu

RESUMEN

La presencia de rocas del manto en el fondo oceánico es un hecho frecuente a lo largo de la dorsal atlántica. Macizos peridotíticos atravesados por multitud de intrusiones de gabros constituyen el bloque inferior de importantes fallas de bajo ángulo paralelas a la dorsal. Un largo debate existe sobre la importancia de la extensión tectónica a lo largo de éstas superficies, ya que la teoría de fracturación no predice saltos normales en fallas de bajo ángulo. Una validación de los diferentes modelos puede hacerse a partir de las rotaciones de bloque inferior que cada escenario predice, que es, a su vez, función de la geometría de las fallas en profundidad. En este trabajo se utiliza la magnetización de las rocas como marcador de la deformación, observándose evidencias de rotaciones de bloque inferior entre 50° y 90°. Los datos demuestran que la exhumación de rocas del manto se produce mediante la rotación del bloque inferior de fallas normales de gran ángulo.

ABSTRACT

The exposure of mantle-derived rocks on the sea floor is a well documented feature along the mid-Atlantic ridge. Ultramafic rocks intruded by gabbroic material constitute the so-called oceanic core-complexes which outcrop at the footwall of low-angle detachments. A long-standing debate exists about whether large-scale tectonic extension may be accommodated on these shallow dipping fault surfaces, since Andersonian faulting theory does not predict slip at low angles. Validation of the various models can be achieved by considering predictions in terms of footwall rotation, since this is a value strongly controlled by the geometry of faults at depth. Here we use the magnetization of rocks as marker for the deformation history, and show evidence for substantial footwall rotation. Widespread rotations ranging from 50° to 90° support a scenario where exhumation of mantle rocks is driven by footwall rollover along steepening normal faults rooted at depth.

Key words: *mid-atlantic ridge, peridotites, gabbros, tectonic extension,*

Introduction

Slow-spreading mid-ocean ridges show frequent exposures of peridotites at the sea floor, indicating that the “normal” magmatic crust is sometimes discontinuous

(Cannat, 1993; Cannat et al., 1995; Lin et al., 1990). While considerable amounts of magmatic products are trapped as gabbroic bodies at depths of 15 to 20 km (Kelemen et al., 2004; Lizarralde et al., 2004), melt extraction processes are

partially inhibited at slow-spreading ridges. In this context, tectonic extension plays a crucial role in accommodating sea floor spreading.

Tectonic extension controls

sea floor morphology at slow spreading ridges. These are characterized by deep axial rift valleys flanked by a series of ridge-parallel ridgeward-dipping faulted blocks. In some regions tectonic extension may localize along a single detachment fault on one side of the rift valley (Tucholke and Lin, 1998), with magmatic accretion focused at the hangingwall plate (Allerton et al., 2000; Karson et al., 1987). Detachment faults accommodate up to tens of kilometers of extension, leading to the exhumation of thick lower crust and mantle rock sections (Cannat et al., 1997).

Constraining the geometry of detachment faults at depth has become a long-standing issue in mid-ocean ridge studies. Seismic reflection experiments on Early Cretaceous lithosphere of the African Plate have demonstrated the existence of ridgeward-dipping crustal-scale detachments with a convex upward geometry flattening updip from 30 degrees to less than 15 degrees (Ranero and Reston, 1999). Little is known, however, about the subsurface attitude of active faults under spreading centers, since the strong seismic attenuation only allows limited imaging of the shallow crust (Canales et al., 2004). Neither Andersonian faulting theory nor seismic data supports slip on low angle faults, a fact that rise the question on whether block rotations have modified the dip of the faults after extension.

Paleomagnetic data from cores can help constraining the sub-surface geometry of faults by using the magnetization of the rocks as

marker of the deformation and determining extension-related block rotations. This approach assumes that the time averaged inclination of the magnetic field at a specific site can be determined from its geographic latitude as derived from the Geocentric Axial Dipole (GAD). Tectonic rotations can be inferred from the angular difference between observed and predicted inclination of the magnetization. Inclination-only paleomagnetic data is sufficient to calculate tectonic rotations provided that the orientation of the rotation axis and the sense of rotation can be independently constrained (Verosub and Moores, 1981). In young systems such as mid-ocean ridges, the orientation of rotation axes can be determined from the strike of bounding faults as reflected in sea floor bathymetry.

Magnetisation data from Leg 209

Coring strategy of Leg 209 was oriented to sample known ultramafic outcrops in a series of short holes (<200m) along a ridge portion north and south from the Fifteen Twenty Fracture Zone. Despite the fact that this area was *a priori* considered a magma-starved region, the recovered material showed a relatively large proportion of gabbroic material (Kelemen et al., 2004).

More than 300 paleomagnetic samples were collected from 7 drill sites during ODP Leg 209, providing a valuable data set in order to determine tectonic tilt. Determination of the paleomagnetic components of each sample was achieved by means of standard stepwise thermal demagnetisation up to

complete removal of their Natural Remanent Magnetization (NRM). Gabbroic rocks yielded complex magnetizations, consisting of a drilling induced remanence plus up to three (typically one) components. The highest temperature component residing in hematite was identified in about 40% of gabbroic samples, and represented on average about 2% of the total NRM. A high temperature magnetite component, with a narrow range of unblocking temperatures close to 580°C, was identified in all samples. This component represented on average about 15% of the total NRM, and is attributed to fine grained single domain magnetite, likely a primary igneous product carrying a remanence acquired upon cooling. Thermal rather than chemical remanent acquisition best explains the fact that some gabbroic samples carry up to three components with nearly no overlap of their unblocking temperatures. The presence of multiple components with opposing polarities may be attributed to slow cooling of the gabbros encompassing different geomagnetic field reversals.

Compared to gabbroic rocks, peridotites show a simple demagnetization behavior. A drill overprint which represents on average 60% of the total NRM is removed after progressive heating up to 400°C. Above this temperature a single component is present showing a progressive demagnetization up to 580°C. A broad range of unblocking temperatures is coherent with a remanence carried by relatively coarse grained magnetite, a secondary mineral phase that precipitates at low temperature during

serpentization, carrying a late chemical remanent magnetisation.

In this study we have extracted the high temperature magnetite component, which is well determined in the majority of gabbroic and peridotite samples in a temperature range between 450°C and 580°C. It should be noted that timing, rather than the exact origin of the remanence, is of relevance for this story, since we use the remanence vector only as a marker of the deformation. Thus, because magnetization of gabbros and peridotites may represent different ages, paleomagnetic data was grouped and averaged according to lithology. At site 1275, the abundant gabbroic material was grouped according to grain size. This division aimed to separate the remanence of late dike-like shallow intrusions from that of the gabbros intruded at greater depth.

Overall, paleomagnetic data from Leg 209 shows that the mean inclinations from gabbros deviate substantially from the expected GAD. North of the FTFZ and west of the ridge axis, site 1275 recovered substantial gabbroic material at the top of a flat corrugated surface interpreted as a detachment fault (Escartín and Cannat, 1999; Escartín et al., 2003). The magnetization of the gabbros yielded negative shallow mean inclinations as low as -9.4° with 95% confidence bounds of -7.6°/-11.2° at Hole 1275B. Contrastingly, fine-grained diabases intruding the gabbroic sequence carried a magnetization with positive and steep mean inclination of 39° (28.9°/50.4°). Magnetization of the diabases steeper than the gabbros confirms that late dike

intrusions took place after tilting of the gabbroic host rock. Also, the inferred reversed polarity of the gabbros (negative inclinations) and normal polarity of the diabases (positive inclinations) indicates that a geomagnetic field reversal occurred between cooling of the gabbro and diabase intrusions. Based on sea floor magnetic anomalies (Fujiwara et al., 2003), reversed magnetization of the gabbros was most probably acquired during anomaly 2r, while normal polarity magnetization of the diabases should correlate with 2n (Jaramillo subchron).

With the exception of late dike intrusions, overall results from Leg 209 indicate that mean inclinations from gabbros are always shallower than expected, with mean values up to 25 degrees away from the GAD inclination. On the other hand, mean inclination from peridotites showed variable results. Gabbro impregnated peridotites from Site 1270 yielded extremely shallow inclinations, but peridotites from Site 1268, 1271 and 1272 yielded values closer to the expected GAD. Considering the different origin and age of magnetization, it is conceivable that average inclinations from peridotites yield values closer to the GAD than gabbros. This is evidenced at Site 1268, where a highly altered ultramafic rock sequence is intruded by coarse grained gabbros. Both gabbros and peridotites yield positive mean inclinations, as expected for a northern hemisphere normal geomagnetic polarity. But, the mean inclination of gabbros from Hole 1268A was 12°, while host peridotites and talc altered rocks yielded values of

about 30°, much closer to the expected GAD at the site. These results indicate that the magnetization of the gabbros and the host ultramafic rocks was acquired at different times. An early thermal remanence of the gabbros was likely acquired at depths greater than 4 km, considering the thermal models for the FTFZ region (Escartín and Cannat, 1999). Subsequent footwall uplift and rotation caused departure of the magnetization of gabbros away from the reference GAD field vector. The uplifted rocks underwent low temperature alteration, causing a post-tilt remagnetization of the host peridotites.

Tectonic rotations and fault geometry.

Tectonic extension along non-planar faults involves a certain degree of block tilting. Rotation localizes at the footwall block if the fault steepens downdip, as proposed in some models of oceanic core complexes (Tucholke and Lin, 1998). On the other hand, hangingwall rotations are predicted if the extension is accommodates along flattening downwards listric faults, as broadly described in extended continental crust (Proffett, 1977). In all cases block rotation is predicted in a sense opposite to the dip of the faults, and the degree of rotation depends on the attitude of the detachment in depth. In addition, isostatic compensation and doming of the unroofed footwall may lead to further deformation of the detachment surface.

Widespread occurrence of shallow paleomagnetic inclinations implies that tectonic rotations have taken

place after magnetization of the rocks. If assumed that tectonic rotation was about a horizontal axis parallel to the strike of the bounding faults, tectonic rotations can be readily estimated. Overall results indicate that tectonic rotations ranging from 50° to about 90° have affected most of the studied region.

The above conclusions are made under the assumptions that, first, the error due to magnetic anisotropy is negligible and, second, secular variation is averaged at the site level. The first assumption is supported by measurements of the anisotropy of the thermorremanence that indicate that corrected mean directions do not show significant bias from observed directions. The second assumption is sustained on the presence of dual polarity multicomponent NRM residing in gabbros, which suggest slow cooling through successive polarity reversals.

Our data shows that horizontal axis rotations in the study area are a common feature associated to exhumation of footwall blocks. Off-axis data from Site 1275 indicates that tectonic rotation pre-dates late diabase intrusions, thus suggesting that rotation occurred while rocks were still above the active zone. Rotation of footwall rocks is detected as close to the active zone as the rift valley walls (site 1274). Therefore, block rotations may be regarded as a process linked to footwall uplift of the rift valley bounding blocks. Large footwall rotations support a convex upward geometry of faults, steepening towards the active zone, thus exhuming a

subvertical cross-section of the crust and mantle.

Acknowledgments

This research used samples and data provided by the Ocean Drilling Program (ODP). ODP is sponsored by the U.S. National Science Foundation (NSF) and participating countries under management of Joint Oceanographic Institutions (JOI) Inc. Participation of the authors in the Ocean Drilling Program was partly funded by the Spanish grant BTE2002-11194-E (MG) and the U.S. Science Support Program (JG).

References

- Allerton, S., Escartín, J., and Searle, R.C., 2000, Extremely asymmetric magmatic accretion of oceanic crust at the ends of slow-spreading ridge segments: *Geology*, v. 28, p. 179-182.
- Canales, J.P., Tucholke, B.E., and Collins, J.A., 2004, Seismic reflection imaging of an oceanic detachment fault: Atlantis megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30°10'N): *Earth and Planetary Science Letters*, v. 222, p. 543-560.
- Cannat, M., 1993, Emplacement of Mantle Rocks in the Seafloor at Mid-Ocean Ridges: *Journal of Geophysical Research*, v. 98, p. 4163-4172.
- Cannat, M., Lagabrielle, Y., Bougault, H., Casey, J., de Coutures, N., Dmitriev, L., and Fouquet, Y., 1997, Ultramafic and gabbroic exposures at the Mid-Atlantic Ridge: geological mapping in the 15°N region: *Tectonophysics*, v. 279, p. 193-213.
- Cannat, M., Mével, C., Maia, M., Deplus, C., Durand, C., Gente, P., Agrinier, P., Belarouchi, A., Dunbuisson, G., Humler, E., and Reynolds, J., 1995, Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22°-24°N): *Geology*, v. 23, p. 49-52.
- Escarín, J., and Cannat, M., 1999, Ultramafic exposures and the gravity signature of the lithosphere near the Fifteen-Twenty Fracture Zone (Mid-Atlantic Ridge, 14°-16.5°N): *Earth and Planetary Science Letters*, v. 171, p. 411-424.
- Escarín, J., Mével, C., MacLeod, C.J., and McCaig, A.M., 2003, Constraints on deformation conditions and the origin of oceanic detachments: The Mid-Atlantic Ridge core complex at 15°45'N: *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 4, p. 1067 (doi: 10.1029/2002GC000472).
- Fujiwara, T., Lin, J., Matsumoto, T., Kelemen, P.B.a.T., E., and Casey, J., 2003, Crustal Evolution of the Mid-Atlantic Ridger near the Fifteen-Twenty Fracture Zone in the last 5 Ma: An Electronic Journal of the Earth Sciences, v. 4, p. 1-25.
- Karson, J.A., Thompson, G., Humphris, S.E., Edmond, J.M., Bryan, W.B., Brown, J.R., Winters, A.T., Pockalny, R.A., Casey, J.F., Campbell, A.C., Klinkhammer, G., Palmer, M.R., Kinzler, R.J., and Sulanowska, M.M., 1987, Along-axis variations in seafloor spreading in the MARK area: *Nature*, v. 328, p. 681-685.
- Kelemen, P.B., Kikawa, E., Miller, D.J., and Party, S.S., 2004, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Leg 209: College Station, Ocean Drilling Program.
- Lin, J., Purdy, G.M., Schouten, H., Sempere, J.-C., and Zervas, C., 1990, Evidence from gravity data for focused magmatic accretion along the Mid-Atlantic Ridge: *Nature*, v. 344, p. 627-632.
- Lizarralde, D., Gaherty, J., Collins, J.A., Hirth, G., and Kim, S.D., 2004, Spreading-rate dependence of melt extraction at mid-ocean ridges from mantle seismic refraction data: *Nature*, v. 432, p. 744-747.
- Proffett, J.M., 1977, Cenozoic geology of the Yerington District, Nevada, and implications for the nature and origin of Basin and Range faulting: *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 88, p. 247-266.
- Ranero, C., and Reston, T.J., 1999, Detachment faulting at ocean core complexes: *Geology*, v. 27, p. 983-986.
- Tucholke, B.E., and Lin, J., 1998, Megamullions and mullion structures defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge: *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 9857-9866.
- Verosub, K.L., and Moores, E.M., 1981, Tectonic Rotations in Extensional Regimes and Their Paleomagnetic Consequences for Oceanic Basalts: *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 6335-6349.

Datos preliminares de la remagnetización Estephaniense del Ordovícico Superior del Pirineo Centro-meridional; implicaciones estructurales.

Gil-Peña, I.(1); Oliva, B. (2); Pueyo, E. L. (1); Barnolas, A.(1).

(1) Unidad de Geología y Geofísica. Instituto Geológico y Minero de España (i.gil@igme.es).

(2) Pastel Group. Dpt. of Geological Sciences, University of Michigan, USA.

ABSTRACT

The preliminary results of a paleomagnetic study of two Upper Ordovician sections (ARS y ASV) from the Orri dome (Pyrenean Axial Zone) are presented. Only in the ASV section has been possible to define a preliminary characteristic component ($D=218^\circ$ and $I=55^\circ$, in situ value), obtained after a negative folding test. This post-folding component indicates a south hemisphere position, what it is not compatible with any post-alpine remagnetization. After restoration of the Stephanian discordance the obtained direction was $209^\circ-05$. A possible Stephanian age for this remagnetization and some tectonics implications are inferred after these preliminary results.

Key words: Ordovician, Stephanian-Permian, remagnetization, paleomagnetism, Pyrenean Axial Zone

Introducción

La Zona Axial pirenaica es un fragmento de la zona externa del orógeno varisco reactivado por la tectónica alpina. Su geología es compleja dado que registra dos ciclos orogénicos (Varisco y Alpino) con la consiguiente superposición de eventos extensivos y compresivos. La práctica ausencia de metamorfismo y magmatismo en el ciclo alpino junto con una estructura alpina caracterizada por el desarrollo de sistemas de cabalgamientos que frecuentemente reactivan estructuras variscas pero que preservan internamente los rasgos principales de la estructura varisca, hace que sea factible la reconstrucción de la geometría previa del basamento. En esta reconstrucción se puede recabar ayuda de la información paleomagnética, aunque ésta todavía es muy escasa en el Paleozoico del Pirineo.

En este trabajo se presentan datos preliminares de dos secciones piloto seleccionadas

para evaluar el posible potencial de la información paleomagnética para cuantificar procesos tectónicos (rotaciones y basculamientos) y paleogeográficos (paleoinclinaciones) en las reconstrucciones de zócalo.

Marco Geológico

La estructura general varisca responde a grandes domos que están nucleados en materiales atribuidos de forma general al Cambro-Ordovícico, aunque incluyen con toda probabilidad sedimentos del Proterozoico superior, sobre los que se dispone en discordancia cartográfica el

Ordovícico superior. Separando los domos aparecen estrechos sinclinos ocupados por la serie del Silúrico-Carbonífero inferior. En las unidades más meridionales así como en la zona occidental de la Zona Axial aflora la serie sintectónica (Carbonífero en facies Culm). Durante el Carbonífero superior-Autuniense tiene lugar en el ámbito pirenaico un emplazamiento masivo de cuerpos graníticos a favor del juego dextro de grandes desgarres tardivariscos, que postdatan los sistemas variscos de pliegues y cabalgamientos. Al mismo tiempo se desarrollan pequeñas y dis-

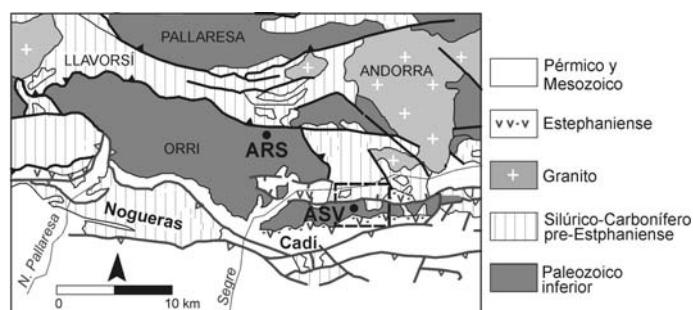


Fig.1. Esquema geológico con la ubicación de las estaciones.
Fig. 1. Geological map showing the studied localities

continuas cuencas ocupadas por vulcanitas y rocas sedimentarias del Carbonífero superior a Autuniense discordantes sobre el conjunto varisco. Sobre ellas la discordancia pérmica da paso al ciclo netamente alpino. Las secciones estudiadas se sitúan en materiales del Ordovícico superior del borde sur de la Zona Axial, en la lámina alpina del Orri, próximas a las localidades de Ansovell y Ars (fig.1). Este Ordovícico superior presenta una sucesión general siliciclastica granodecreciente, con una unidad carbonatada intercalada (Harteveld, 1970; Gil Peña *et al.*, 2004) (fig. 2).

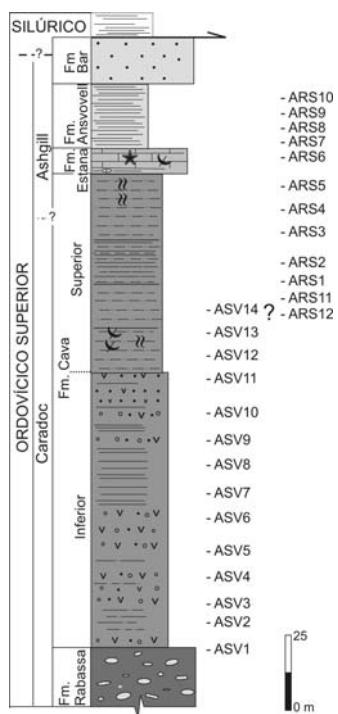


Fig. 2. Estratigrafía del Ordovícico superior con indicación de la posición de las muestras.

Fig. 2. Stratigraphical section of the Upper Ordovician showing the distribution of the samples.

La sección de Ars se sitúa en el borde norte del domo del Orri, en el bloque inferior del cabalgamiento de Llavorsí. La sección de Ansovell se encuentra en el borde suroriental de este domo, inmediatamente por debajo de la discordancia del Estephaniense –Pérmino de la

cuenca del Cadí (Gisbert, 1984). La estructura en la zona de Ansovell responde a un sistema de pliegues varicos vergentes al sur de orden decamétrico a kilométrico, asociados a un clivaje espaciado incipiente (Gil Peña y Barnolas, 2004). Esta estructura ha sido basculada hacia el sur en relación con el emplazamiento alpino del cabalgamiento de Rialp. Las secciones estudiadas fueron seleccionadas por presentar una deformación varisca moderada, y por su bajo grado de metamorfismo.

Paleomagnetismo

Se han obtenido 148 muestras estándar orientadas con una perforadora portátil de gasolina, distribuidas en 26

presentan en este trabajo resultados piloto, si bien la localidad de Ansovell ha acaparado mayor número de análisis; 68 frente a 40 de Ars.

En el laboratorio se llevaron a cabo principalmente desmagnetizaciones térmicas (TH) y ocasionalmente por campos alternos (AF) por medio de un horno Shonsted TSD-1, de un desmagnetizador Shonsted Ltd. y de un magnetómetro criogénico 2G de 3 SQUIDS (laboratorio del Jaume Almera, Barcelona). Las desmagnetizaciones TH resultaron ser más efectivas y consistentes y representan alrededor del 75% del total, sin bien en algunos casos ambas técnicas se combinaron para tratar de aislar las diferentes componentes magnéticas con mayor precisión.

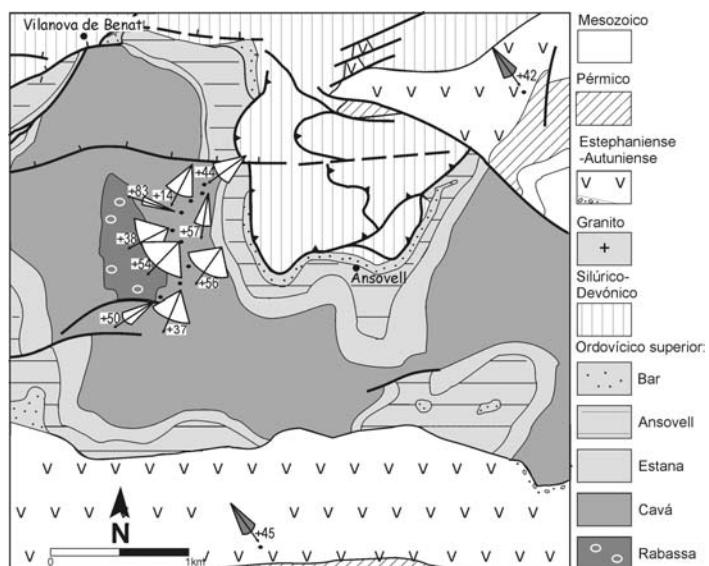


Fig. 3. Direcciones magnéticas principales *in situ* en Ansovell. Los conos en gris proceden de los datos de Van Dongen (1967).

Fig. 3. Main magnetic directions in the Ansovell locality. Cones in grey come from Van Dongen (1967) data.

estaciones situadas en dos localidades diferentes. En ambas localidades se obtuvieron similar número de estaciones (14 y 12 respectivamente) así como de muestras por estación (entre 6 y 11). Las posiciones estructurales realizadas garantizan la viabilidad de las pruebas del pliegue (buamientos claramente contrastados). De este conjunto sólo se

La posición de las muestras en el horno se alterno sistemáticamente en los sucesivos pasos para poder descartar direcciones adquiridas en el laboratorio. Las direcciones se ajustaron según la rutina de análisis de componentes principales del software *Paldir* del laboratorio de paleomagnetismo de Utrecht.

Sólo en 59 de 114 muestras desmagnetizadas se pudieron calcular direcciones coherentes, debido fundamentalmente a un grave problema de neoformación mineral a partir de 300°C que se detectó en muchas de ellas. Las direcciones características desbloquearon a más de 400°C y llegaron hasta los 580°C, las direcciones definidas por debajo de estos intervalos (v.g. ASV01) suelen reflejar direcciones espurias que se encuentran entre el campo magnético reciente y las direcciones de perforación.

So	Tub	Hub	n/n	D&I (bac)	α_{95} K	D&I (abc)
ASV 032,80 SE	310	-	3/4	359,70	17	77
ASV 316,62 N	610	-	3/3	237,50	13	140
ASV3 302,71 N	500	-	2/4	203,37	37	95
ASV4 294,20 N	500	-	2/3	215,56	47	62
ASV5 098,34 N	280	-	0/3	-	-	-
ASV6 268,41 N	560	-	4/4	224,54	46	7
ASV7 090,60 SE	560	-	3/4	243,38	43	14
ASV8 236,40 S	480	-	0/4	-	-	-
ASV9 090,92 Sij	310	-	0/4	-	-	-
ASV10 288,30 N	430	-	4/4	288,83	8	202
ASV11 218,24 N	590	-	3/3	207,14	27	17
ASV12 188,18 S	560	-	4/4	189,57	16	48
ASV13 100,66 S	580	-	6/11	234,44	21	13
ASV14 308,50 N	530	-	5/11	083,70	13	45
ARS1 130,80 S	410	40	2/2	154,69	11	-
ARS2 140,26 S	450	50	2/2	226,76	-	11
ARS3 140,15 S	410	90	2/2	343,36	-	10
ARS4 308,36 N	390	50	1/2	046,60	9	-
ARS5 255,44 N	-	25	1/2	201,36	20	-
ARS6 287,28 N	-	90	1/1	037,39	5	-
ARS7 280,24 N	-	20	1/1	265,69	13	-
ARS8 282,20 N	-	15	1/1	354,11	12	-
ARS9 266,38 N	-	90	1/1	016,44	11	-
ARS10 288,40 N	-	90	1/1	075,56	7	-
ARS11 100,0 S	530	90	0/16	-	-	-
ARS12 096,44 S	460	70	8/17	344,37	22	9
						297,71

Fig. 4. Componente característica in situ (bac) y tras la corrección tectónica (abc).

Fig.4. Characteristic component in situ (bac) and after tectonic correction (abc).

A nivel de estación las muestras de la localidad de Ars no dieron resultados creíbles, en parte debido al aparente solapamiento de componentes que se deduce de las desmagnetizaciones AF y en parte debido al escaso número de muestras analizadas por estación (1 ó 2). Por el contrario la localidad de Ansovell (tanto a nivel de estación como de localidad) dio resultados más consistentes (Tabla 1), si bien el estudio piloto realizado deberá ser completado en el futuro para mejorar los parámetros estadísticos. Un análisis preliminar de la prueba del pliegue sugiere significativamente el carácter postfolding de la magnetiza-

ción, hecho que queda puesto de manifiesto por el aspecto absolutamente errático de las direcciones abatidas y por la incoherencia de estos resultados teniendo en cuenta su edad y paleoinclinación esperable durante el Ordovícico. La dirección media *in situ*, está razonablemente definida; 218, 55 (α_{95} : 17° y k: 9).

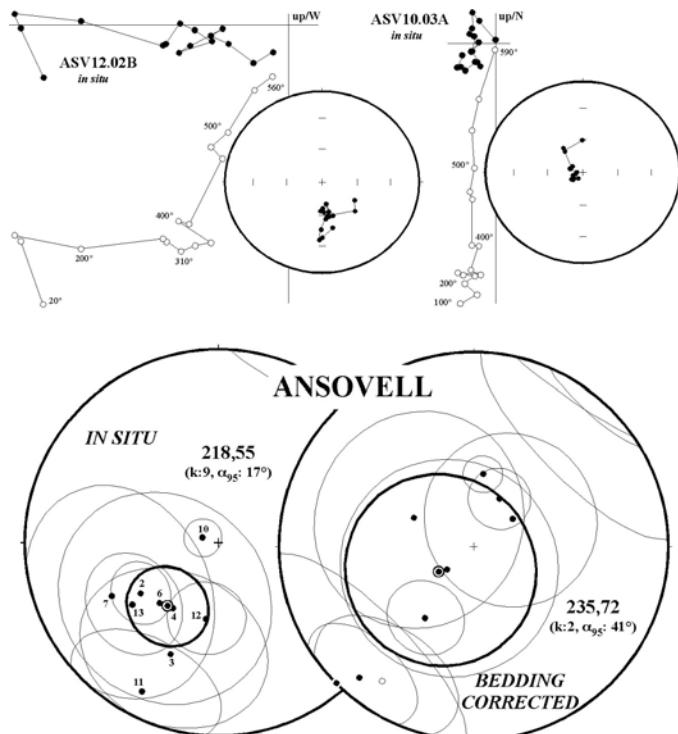


Fig. 5. Test del pliegue
Fig.5. Fold test.

Discusión y conclusiones

La dirección observada presenta una inclinación anómalamente alta que se correspondería con una latitud media de hemisferio Sur, hecho inaudito si se tiene en cuenta el *reseteo* de la información ordovícica en tiempos post-variscos en los que la posición de la placa Ibérica atraviesa el Ecuador hacia el hemisferio Norte (Osete *et al.*, 1997). Por tanto, resulta evidente que la dirección remagnetizada ha sufrido procesos de deformación posteriores y se hace necesario realizar un

análisis detallado de las causas y edad de la remagnetización así como de los procesos de deformación acaecidos con posterioridad a la deformación principal varisca (desarrollo de cuencas estephanienses y pérmicas, orogenia Alpina, etc...).

La orogenia Pirenaica ha producido un basculamiento

generalizado hacia el Sur del borde meridional de la Zona Axial debido al emplazamiento alpino de láminas de zócalo. Los materiales estephanienses y pérmicos que se encuentran discordantes sobre las series paleozoicas en este sector muestran como se produce este basculamiento hacia el Sur condicionado por la geometría del manto de Orri que, en esta posición, se dispone como rampa de bloque superior sobre la lámina de Rialp. Los datos paleomagnéticos existentes en los materiales pérmicos (Van Dongen, 1967) permiten deducir un buzamiento de 106, 62 S para la base de la discordancia en una posición más meridional. Al abatir a la

horizontal esta discordancia junto con el vector promedio de la localidad de Ansovell encontramos una dirección paleomagnética más acorde con las referencias esperables; 209, -05 (α_{95} : 17° y k: 9). Esta dirección exhibe una gran similitud con la dirección, supuestamente primaria, del Pérmico inferior calculada por Van Dongen (1967); 167, -07 (α_{95} : 7° y k: 36). No obstante el proceso responsable de la remagnetización podría aportar algún indicio cronológico que permita acotar más este intervalo.

El desarrollo de cuencas con importante vulcanismo asociado en el Estephaniense-Autuniense es el proceso más importante que podría haber sido capaz de remagnetizar las series paleozoicas con posterioridad al desarrollo de los pliegues y cabalgamientos variscos. Un gradiente geotérmico anómalamente alto como el probablemente asociado al vulcanismo estephaniense de la cuenca del Cadí, podría ser un marco geodinámico capaz de desbloquear térmicamente magnetizaciones adquiridas con anterioridad. Sin embargo la paleoinclinación esperable en el sector estudiado (Lat; 42.5°N y Long: +1.5°E) en el Estephaniense se corresponde con una posición de hemisferio Sur no lejana al Ecuador; 159, 01 (α_{95} : 8°) según los datos de Van der Voo (1967 y 1969) para el Sur de la Meseta (Estephano-Autuniense) o de 156, 14 (α_{95} : 9°) según Turner *et al.* (1989) para la Cordillera Ibérica durante el Autuniense. Un análisis de campo más detallado de la geometría de las discordancias estephaniense y pérmica, junto con una mayor precisión de la información paleomagnética, permitirá

refinar este valor preliminar que podría haberse registrado en algún momento entre el fin de la deformación varisca (magnetización *postfolding*) y el basculamiento alpino (magnetización *pretilting*) pero probablemente durante el desarrollo de las cuencas estephanienses.

Otra observación significativa, caso de aceptar una remagnetización estephaniense, es la gran diferencia de declinación magnética con respecto a las referencias esperables lo que implicaría una rotación horaria entorno a los 50°. Las rotaciones de eje vertical asociadas al desarrollo de fallas normales son bien conocidas (Avigad *et al.*, 1998 en el Mar Egeo; Mattei *et al.*, 1999 en Calabria). En el caso de las cuencas estephanienses del Pirineo este proceso podría haber actuado a una escala menor, ya que en este periodo se desarrollan cuencas de pequeñas dimensiones. Por ejemplo, una cuenca limitada por fallas E-W podría generar rotaciones de la magnitud mencionada en aquellas posiciones no alejadas de la terminación noroccidental de la cuenca. Nótese que una situación enantiomorfa, terminación sur-oriental de la cuenca, produciría igual efecto.

Agradecimientos: Los autores agradecen al laboratorio de Paleomagnetismo del Jaume Almerá, y en particular a Miguel Garcés y Bet Beamu la ayuda prestada en la medida de las muestras y los comentarios sobre los resultados de las mismas. Trabajo financiado por el proyecto Pallaresa (2004-2008 IGME) y una beca postdoctoral del MEC (BO) y un contrato de investigación del programa "Ramón y Cajal" (ELP). Fondos adicionales para el desarrollo de este proyecto provienen de los proyectos: Geokin3D-Pir (CTPR04/2005 de la INTERREG IIIb-CTP, UE), Pmag3Drest (CGL-2006-2289-BTE

del MEC) y del ChronoPyr (2006-2009-IGME).

Referencias

- Avigad, D.; Baer, G.; Heimann, A. (1998). Block rotations and continental extension in the central Aegean Sea; palaeomagnetic and structural evidence from Tinos and Mykonos (Cyclades, Greece). *Earth and Planetary Science Letters*, 157, 1-2, 23-40, 15.
- Gil Peña, I.; Barnolas (2004). El domo del Orrí: Un pliegue manto reactivado por la tectónica alpina. *Geo-temas*, 6(3), 267-270.
- Gil Peña, I.; Barnolas, A., Villas, E. y Sanz-López, E. (2004). El Ordovícico superior de la Zona Axial. En: *Geología de España* (J.A. Vera, ed.), SGE-IGME, Madrid, 247-249.
- Gisbert, J. (1984). Las molas tardihercínicas del Pirineo. En : *Geología de España. Libro Jubilar de J.M. Ríos* (J.A: Comba, coord.), IGME, Madrid, 168-186.
- Hartveit, J.J.A. (1970). Geology of the Upper Segre and Valira valleys, Central Pyrenees, Andorra/Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 45, 167-236.
- Mattei, M.; Speranza, F.; Argentieri, A.; Rossetti, F.; Sagnotti, L.; Funiciello, R. (1999). Extensional tectonics in the Amantea Basin (Calabria, Italy); a comparison between structural and magnetic anisotropy data. *Tectonophysics*, 307, 1-2, 33-49.
- Osete, M. L.; Rey, D.; Villalán, J. J.; Juárez, M. T. (1997). The Late Carboniferous to Late Triassic segment of the apparent polar wander path of Iberia. *Geologie en Mijnbouw*, 76, 105-119.
- Turner, P., A. Turner, A. Ramos y A. Sopeña (1989). Palaeomagnetism of Permo-Triassic Rocks in the Iberian Cordillera, Spain: Acquisition of Secondary and Characteristic Remanence. *J. Geol. Soc., London* 146, 61-76.
- Van der Voo, R. (1967). The rotation of Spain: paleomagnetic evidence from the Spanish Meseta. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 3, 393-416.
- Van der Voo, R. (1969). Palaeomagnetic evidence for the rotation of the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 7, 1, 5-56.
- Van Dongen, P.G. (1967). The rotation of Spain: Palaeomagnetic evidence from the Eastern Pyrenees. *Palaeogeogr., Paleoclimatology, Palaeoecology*, 3, 417-432.

Resultados paleomagnéticos do Maciço Alcalino de Monchique (SW de Portugal): uma interpretação

Paleomagnetic results of the Monchique Alkaline Massif (SW of Portugal): an interpretation

C.S.R. Gomes (*), L.G. Pereira (*), D. Rey (**)

(*) Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Largo Marquês de Pombal, 3000-272 Coimbra, Portugal. romualdo@dct.uc.pt

(**) Departamento de Geociências, Universidade de Vigo, Espanha
D

ABSTRACT

The Monchique alkaline Massif, also known as Monchique alkaline Complex, situated in the SW of Iberian Massif, occupies an area of about 63 km². It shows an elongated form with 16 and 6 km in the longer and shorter axis, respectively. This intrusion is mainly constituted by nephelinic sienite (95%), which metamorphoses the neighbour rocks, in the SW of Portugal (the Baixo Alentejo Carboniferous flysh group) and in the SW of the Hercynian South Portuguese Zone. Related with other magmatic intrusion events of the Upper Cretaceous in this Iberian region, its radiometric age is about 72 m.y. (K/Ar, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, ³⁹Ar/⁴⁰Ar methods).

Some fractures with N55°E and N35°W, cross the massif and two of them separate the igneous intrusion in three sectors (sector 1 or West, sector 2 or Central and sector 3 or East).

The paleomagnetic data appointed to the massif, were obtained after thermal and alternating magnetic fields demagnetization, allow to estimate different directions (e.g. 181,0°-42,0°, $\alpha_{95} = 4,5^\circ$, with N = 27; 174,0° -40,6°, $\alpha_{95} = 3,5^\circ$ with N=38; 190,6°-39,5°, $\alpha_{95} = 5,4^\circ$ with N = 26; 207,9°-35,9°; $\alpha_{95} = 3,5^\circ$, K = 54,7, with N = 31; 206,3°-37,3°; $\alpha_{95} = 2,9^\circ$, K = 63, with N = 39), according to the samples localization.

If we consider that there are not significative differences in the rock ages of the three sectors above mentioned, these directions will be explained by geological (structural) models, where the strain happened only after the first phases of cooling.

Key words: Monchique Alkaline Complex, paleomagnetic results, strain, South Portuguese Zone, ambulance, paleomagnetism

RESUMO

O Maciço Alcalino de Monchique, também designado por Complexo Alcalino de Monchique, localiza-se no SW Ibérico e ocupa uma área aproximada de 63 km². Apresenta uma forma alongada, com eixos maior (este-oeste) e menor de 16 e 6 km, respectivamente. Constituído essencialmente por sienito nefelínico (95%), induziu fenómenos de metamorfismo de contacto nas rochas encaixantes do Carbónico do sudoeste português, pertencentes ao Grupo do Flysh do Baixo Alentejo da Zona Sul Portuguesa. Associado a eventos magmáticos do Cretácico superior, à escala do sudoeste da Ibéria, os estudos radiométricos atribuem-lhe uma idade próxima dos 72 Ma (métodos K/Ar, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, ³⁹Ar/⁴⁰Ar).

O maciço é recortado por fracturas, com direcções médias N55°E e N35°W, duas das quais, as de maior expressão, permitem uma divisão do corpo ígneo em sectores: sector 1, ou oeste; sector 2, ou central; sector 3, ou este.

Os resultados paleomagnéticos, para o Maciço, obtidos após desmagnetização térmica e por campos magnéticos alternos das amostras, permitem calcular direcções distintas (e.g. 181,0°-42,0°, $\alpha_{95} = 4,5^\circ$, para N = 27; 174,0° -40,6°, $\alpha_{95} = 3,5^\circ$, para N = 38; 190,6°-39,5°, $\alpha_{95} = 5,4^\circ$; para N = 26; 207,9°-35,9°; $\alpha_{95} = 3,5^\circ$; K= 54,7, para N=31; 206,3°-

$37,3^\circ$, $\alpha_{95}=2,9^\circ$, $K=63$, para $N=39$), função da localização dos locais de amostragem. Admitindo não haver diferenças significativas na idade dos sectores acima definidos, estas direcções poderão ser explicadas por modelos, considerando que a deformação é posterior às fases iniciais de arrefecimento.

Monitorização da matéria particulada: um estudo na cidade de Coimbra (Portugal)

Monitoring particulate matter: a study in city of Coimbra (Portugal)

C.S.R. Gomes (*), A.F. Rocha (*), D. Rey (**), LF. Neves (*)

(*) Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Largo Marquês de Pombal, 3000-272 Coimbra. romualdo@dct.uc.pt

(**) Departamento de Geociências, Universidade de Vigo, Espanha

ABSTRACT

*Particulate matter is an actual concern in most developed cities, and frequently monitoring systems have been developed for the purpose. In Coimbra (Central Portugal) two monitoring station continuously measure several air quality parameters, including the load of particulate matter. In 2002 we have initiated a study to test the possibility of evaluating pollution through the measurement of magnetic parameters in dust collected from leaves (*Platanus* sp. and *Tilia* ssp.). The results obtained showed that a good correlation between the intensity of magnetic parameters and the areas with increased traffic and road/building works could be established. On a second stage, initiated in March 2004 and finished in March 2005, a monthly program of measurement was carried out using *Nerium oleander* leaves, which allowed to obtain the seasonal variations of the magnetic parameters; May and August 2005 were the months with the lowest values, while March and April 2004 and January 2005 showed the highest results. These parameters, which include magnetic susceptibility, ARM, IRM1T, IRM-100mT and IRM-300mT, S -100 and S-300 ratios and Hard% values, indicate the presence of ferromagnetic particulates with sub PM10 size. A good correlation was found between IRM1T values and the load of PM10 particles measured in the two monitoring stations of Coimbra; thus, we can conclude that this technique is a good indicator of the PM10 load, with the advantage of allowing to monitor a large number of places in an expedite way and at a very low cost. However, the use of natural collectors like leaves presents some limitations, one of which is that the time gap of dust accumulation is usually unknown. In order to try to constrain this variable, in this work 104 synthetic collectors made with sponge material were placed in *Nerium oleander* trees, one set (A) for 1 month and another (B) during 4 months. The results show that synthetic collectors are more efficient than leaves in capturing dust particles; B set present IRM1T values 3 times higher than A set ($274.91 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$, for N = 49, and $86.24 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$, for N = 40, respectively); the average value of the S_{-300mT} parameter is 0.94 for the A set and 1.00 for the B set.*

Key words: Particulate matter, magnetic parameters, dust collectors, air quality, *Nerium oleander*.

RESUMO

A monitorização da matéria particulada, em especial nas cidades e zonas industrializadas, constitui uma preocupação actual. Na cidade de Coimbra existem duas estações, incluídas na rede nacional, que medem a qualidade do ar e disponibilizam os valores dos parâmetros medidos, entre os quais os da matéria particulada. Em Coimbra, em 2002, foi iniciado um estudo que pretendia avaliar os níveis de poluição por partículas através de alguns parâmetros magnéticos medidos em amostras de poeiras. Para isso, foram utilizados como colectores folhas de plátano e de tília. Verificou-se, então, que os valores obtidos permitiram efectuar uma cartografia dos níveis de

*poluição onde se destacavam os locais de maior intensidade de tráfego automóvel e de obras da construção civil. Numa segunda fase do trabalho, com início em Março de 2004, procedeu-se a uma amostragem mensal de folhas de loendro (*Nerium oleander*), uma planta arbustiva de folha persistente. Esta fase, que terminou em Março de 2005, permitiu obter uma variação anual dos níveis de partículas. Maio e Agosto de 2004 foram os meses com menor concentração, enquanto Março e Abril de 2004 e Janeiro de 2005 formam os meses com maior concentração de partículas. Paralelamente, utilizando curvas de desmagnetização dos valores de IRM_{1T} , foi possível concluir que as partículas ferrimagnéticas apresentavam diâmetro inferior a 9 μm . Quando se compararam os valores médios de IRM_{1T} , medidos neste estudo, e os da concentração de partículas PM_{10} , obtidos a partir dos registos das estações que medem a qualidade do ar, em Coimbra, verificou-se que existe uma correlação positiva e estatisticamente significativa. Assim, pode concluir-se que os parâmetros magnéticos das poeiras acumuladas nas folhas de *Nerium oleander* podem constituir um indicador credível dos níveis de PM_{10} . Os valores obtidos por este meio apresentam, em relação àqueles medidos nas estações da qualidade do ar, a vantagem de poder avaliar um número muito maior de locais. A utilização de colectores naturais, como as folhas das plantas, apresenta, porém, algumas limitações. Por exemplo, não é possível conhecer com rigor o intervalo de tempo durante o qual cada folha acumulou poeira. Para tentar controlar esta variável, foram utilizados pequenos colectores de um material sintético poroso (espuma). Em cada loendro foram colocados 2 colectores, em 1 de Agosto de 2005, num total de 104. Metade dos colectores, designados pela letra A, esteve exposta durante um mês, enquanto os restantes, designados por B, permaneceram expostos durante 4 meses. A análise dos resultados obtidos, a partir dos parâmetros magnéticos medidos, permitiu concluir que: (1) os colectores de espuma são mais eficazes do que as folhas; os colectores B apresentam valores de IRM_{1T} superiores, aproximadamente 3 vezes, aos obtidos para os colectores A ($274, 91 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$, para $N = 49$, e $86,24 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$, para $N = 40$, respectivamente); a média dos valores do parâmetro S_{-300mT} para os filtros A é de 0,94 e semelhante aos valores obtidos para as folhas, enquanto para os colectores B é 1,00.*

The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula

M. Gómez-Paccard^(1, 2, 3), A. Chauvin⁽¹⁾, Ph. Lanos⁽³⁾, G. McIntosh⁽¹⁾, M.L. Osete⁽¹⁾, G. Catanzariti⁽¹⁾, V.C. Ruiz-Martínez⁽¹⁾, J.I. Núñez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Géosciences-Rennes, CNRS, UMR 6118, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042, Rennes, Cedex, France (miriam.gomez@univ-rennes1.fr, phone: 0033 2 23 23 67 59/ fax: 0033 2 23 23 60 40)

⁽²⁾Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain.

⁽³⁾Civilisations Atlantiques et Archéosciences, CNRS, UMR 6566, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042, Rennes, Cedex, France.

ABSTRACT

A total of 58 new archaeomagnetic directions has been determined from archaeological structures in Spain. Together with 5 previous results they allow the compilation of the first archaeomagnetic catalogue for Spain, which includes 63 directions with ages ranging between the 2nd century BC and the 20th century AD. Characteristic remanence directions have been obtained from stepwise thermal and alternating field demagnetisation. The hierarchical structure has been respected in the calculation of the mean site directions. Rock magnetic experiments reveal that the main magnetic carrier is magnetite or titano-magnetite with different titanium contents. The age estimate of the studied structures is generally well justified by archaeological constraints. For 6 structures the proposed date is also supported by physical methods. This data set is used, along with data from southern France and northern Morocco, to propose a first SV curve for the Iberian Peninsula. This curve was computed by hierarchical Bayesian method using a total of 134 archaeomagnetic directions with ages ranging from -775 to 1959 AD. The secular variation curve obtained extends the archaeomagnetic dating technique to Spain and Portugal.

Keywords: Archaeomagnetism, Geomagnetic Secular Variation, Bayesian statistics, Iberian Peninsula

1. Introduction

Despite the high number of archaeological excavations carried out in Spain only limited data are available for this region. In a recent work, *Gómez-Paccard et al.* [2006] provide a compilation of 5 previous results and present 58 new archaeomagnetic directions. In the present study this data set is used, along with data from southern France and northern Morocco, to propose a first secular variation (SV) curve for the Iberian Peninsula. The French and Moroccan data can be used in constructing the SV curve due to

their geographical proximity to the Iberian Peninsula.

2. Available data from Spain, France and Morocco

Spanish data

Gómez-Paccard et al. [2006] compiled the available data for Spain and presented 58 new archaeomagnetic directions, carefully describing the sampling, experimental procedures and dating constraints of the new directions. Classical thermal, alternating field demagnetisation

or Thellier method were applied in order to determine the characteristic directions for each structure. Together with 5 previous data from Spain, a total of 63 archaeomagnetic directions are available from Spain (see Figure 1).

French and Moroccan data

Archaeomagnetic research started in France with the work of E. Thellier [*Thellier, 1938*], who later published the first SV curve for France for the last two millennia [*Thellier, 1981*]. This dataset has been revised, completed and extended by *Bucur* [1994],

Moutmir [1995], *Chauvin et al.* [2000] and *Gallet et al.* [2002]. A total of 9 archaeomagnetic directions from Morocco (*Kovacheva* [1984], *Najid* [1986])

have been published. In this study, only the data from sites with a geographical proximity to the Iberian Peninsula (within a 900 km

radius of Madrid) have been considered (see Figure 1).

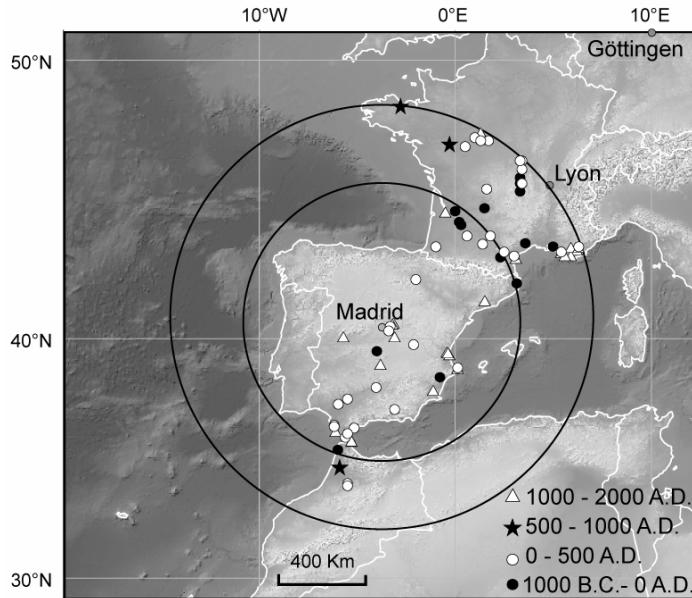


Figure 1: Map showing locations of archaeomagnetic sites (plotted in different symbols for the different age ranges) compiled for the construction of the secular variation curve for the Iberian Peninsula. Madrid (40.4 °N, 3.7 °W) has been chosen as the reference site. Two circles of radii 600 km and 900 km are shown.

3. The First SV curve for Iberia

Bayesian modelling [Lanos, 2004] puts some prior knowledge on the global nature of the curve to be estimated, i.e. it is assumed that the studied physical phenomena vary in a smooth way, and it allows the window width to be automatically adapted to the density of points along the time axis, making the points movable within their respective dating error ranges. This approach allows the fitting of a spherical spline function based on roughness penalty to the data in three dimensions (declination, inclination and time), calculating the weight on the construction of the SV curve of all of the possible three-dimensional data. The results are expressed as a mean curve and an envelope (error) at a 95 % confidence level. The “real” curve

will lie somewhere inside the error band. In addition, this method takes into account stratigraphic constraints provided by archaeological investigations, some of which are known for the Spanish data (*Gómez-Paccard et al.* [2006]). Bayesian modelling has been used to calculate the curve most representative of the SV for the Iberian Peninsula. The curve obtained is shown in Figure 2.

The age of the reference archaeomagnetic 134 data used ranges from -775 to 1959 AD. Throughout most of the record several directions per century are available, although there is a need to extend the data, especially between the 6th and 10th centuries AD and prior to 0 AD, where the majority of the data come from neighbouring countries.

The obtained curve look similar to the geomagnetic model of *Jackson et al.* [2000] (based on historical records) during most of the last 4 centuries, especially in declination. However, some significant differences are observed in the inclination values between 1590 and 1800 AD. The Iberian curve shows lower inclination than the model (see Figure 2).

4. Conclusion

The SV curve obtained extends the archaeomagnetic dating technique to Spain and Portugal. This provides a valuable tool for archaeologists working in the region, which has a rich and increasingly studied archaeological past. Finally, the Iberian curve contributes to the increase in the knowledge of the earth’s magnetic

field, and the data can be used for future modelling of geomagnetic field behaviour.

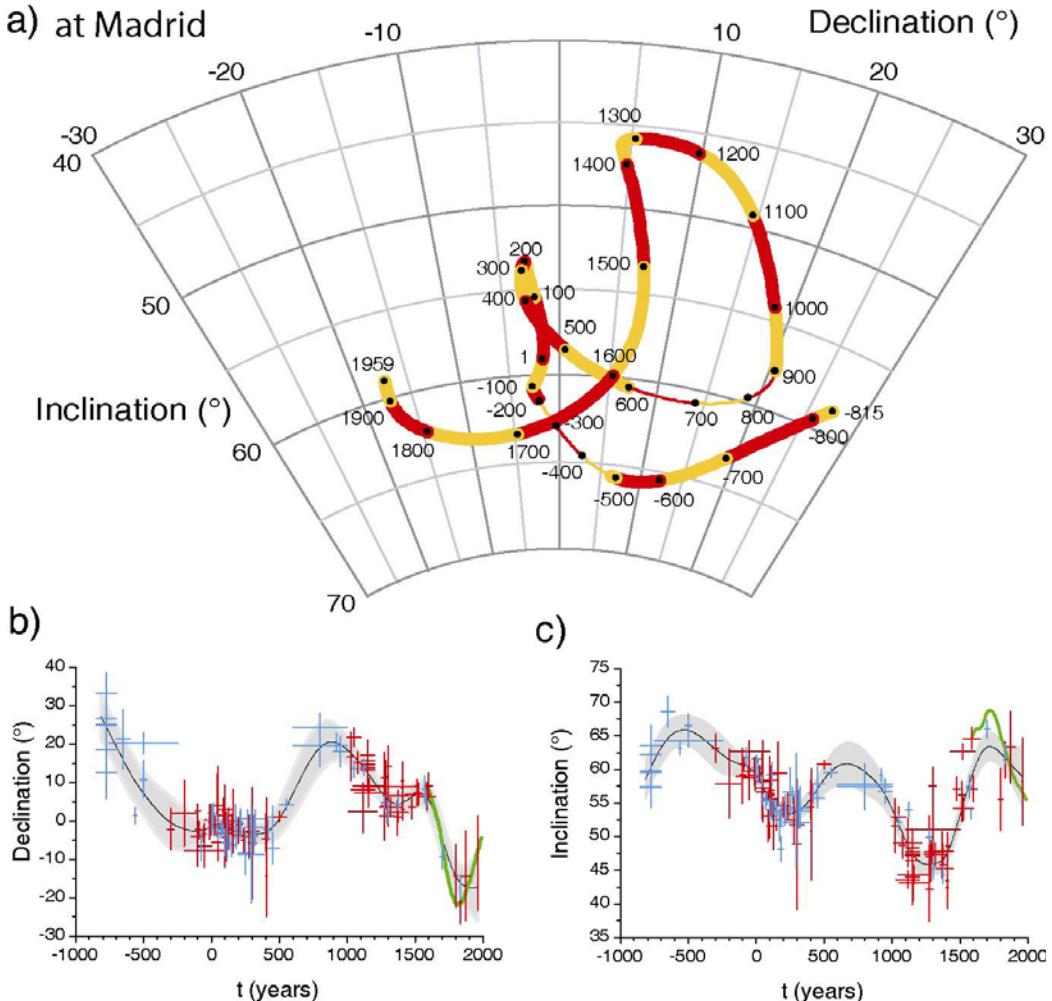


Figure 2: The first SV curve for Iberia obtained by Bayesian modelling. a) stereo-plot of declination and inclination, orange and red indicate century timescales (thin line indicates where the curve is based in a little number of data), b) declination versus time and c) inclination versus time. In figures b) and c) data coming from localities less than 600 km from Madrid are plotted in red, data located between 600 and 900 km from Madrid are plotted in blue, and Jackson model based on historical data is plotted in green.

References

- Bucur, I. (1994), The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 87, 95-109.
- Chauvin, A., Y. Garcia, Ph. Lanos, and F. Laubenheimer (2000), Paleointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 120, 111-136.
- Gallet, Y., A. Genevey, and M. Le Goff (2002), Three millennia of directional variations of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archaeological artefacts, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 131, 81-89.
- Gómez-Paccard, M., G. Catanzariti, V.C. Ruiz-Martínez G. McIntosh, J.I. Nuñez, M.L. Osete, A. Chauvin, Ph. Lanos, D.H. Tarling, D. Bernal-Casasola, J. Thiriot, and “archaeological working group” (2006), A catalogue of Spanish archaeomagnetic data, *Geophys. J. Int.*, in press.
- Jackson, A., A. Jonkers, and M. Walker, (2000), Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records, *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 358, 957-990.

- Kovacheva, M. (1984), Some archaeomagnetic conclusions from three archaeological localities in north-west Africa, *C. R. Acad. Sci. Bulgaria*, 37, 171-174.
- Lanos, Ph. (2004), 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, pp. 43-82, Springer-Verlag, London.
- Moutmir, M. (1995), Analyses magnétiques de terres cuites protohistoriques en France. Apports en archéomagnétisme (Premier millénaire avant J.C.) et en archéologie, PhD thesis, Muséum National d'histoire Naturelle, Paris.
- Najid, D. (1986), Palaeomagnetic studies in Morocco, PhD thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, UK.
- Thellier, E. (1938), Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques, *Ann. Inst. Phys. Globe Univ. Paris*, 16, 157-302.
- Thellier, E. (1981), Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 24, 89-132.

Índice Temático

Paleomagnetismo

C.S.R. Gomes, L.G. Pereira y D. Rey:

Resultados paleomagnéticos do Maciço Alcalino de Monchique (SW de Portugal): uma interpretação. 51

V.C. Ruiz-Martínez, A. Palencia-Ortas y J.J. Villalaín:

Resultados paleomagnéticos y de ASM en sedimentos del Triásico Superior de la Meseta Occidental Marroquí y del Cretácico Superior del cráton Africano: discusión en el contexto de la evolución geodinámica mesozoica del NW de África. 85

V.C. Ruiz-Martínez, V. Villasante, G. McIntosh, I. Palencia, K. El Kadiri y A. Chalouan:

Rotaciones locales vs. Variación Secular geomagnética: resultados paleomagnéticos preliminares del magmatismo (Mioceno Medio – Superior) del Arco Bético-Rifeño en el NE de Marruecos. 87

R. Soto , J.J. Villalaín y A.M. Casas-Sainz:

Geometría extensional del sector occidental de la cuenca Vasco-cantábrica a partir de datos paleomagnéticos. 93

J.J. Villalaín, R. Soto, A.M. Casas, M.P. Mata, G. Fernández y M.F. Bógalo:

Propiedades magnéticas de sedimentos remagnetizados en cuencas mesozoicas del norte de Iberia. 95

Magnetoestratigrafía

E. Beamud, M. Garcés, M. Montes, F. Nozal, J.P. Calvo, F. López-Olmedo y J. Luengo:

Magnetoestratigrafía del Mioceno de las cuencas del Tajo y del Duero. 9

M. L. Osete, P.-R. Gialanella, J. J. Villalaín, A. Goyd, J. J. Gómez y F. Heller:

Proposed Magnetostratigraphy for the Early-Middle Toarcian. 67

A. Rodríguez-Pintó, E. L. Pueyo, A. Barnolas, A. Pocoví, J. M. Samsó y I. Gil-Peña:

Magnetoestratigrafía Cisiense-Luteciense preliminar de la cuenca surpirenaica occidental. 81

Tectónica

L. M. Agirrezabala y J. Dinarés-Turell:

Paleomagnetic, paleocurrent and structural data as indicators of vertical-axis block rotations in the northern margin of the Basque-Cantabrian Basin. 1

M. Garcés y J. Gee:	
<i>Low-angle faulting and footwall rotation at the mid-Atlantic ridge</i>	43
I. Gil-Peña, B. Oliva, E. L. Pueyo y A. Barnolas:	
<i>Datos preliminares de la remagnetización Estephaniense del Ordovícico Superior del Pirineo Centro-meridional; implicaciones estructurales.</i>	47
E. L. Pueyo, M. A. López, B. Oliva, A. J. Sussman, J. C. Larrasoña, J. Dinarés, B. Beamud, R. Soto, M. Garcés, I. Gil-Peña, A. Rodríguez, Y. Almar, O. Fernández, J. J. Villalaín, M. Calvo, M. F. Bógalo, E. Costa, T. Mochales, O. Vidal, O. Pueyo-Anchuela, M. T. Román, A. Gil-Imaz, J. Navas and the GeoKin3DPyr group from the INTERREG IIIb- Pyrenean Network:	
<i>A preliminary compilation of the Pyrenean Paleomagnetic Database.</i>	73

Fábricas

B. Antolín Tomás, A. M. Casas, T. Román Berdiel, I. Gil Peña, B. Oliva y R. Soto:	
<i>Comparación entre la fábrica magnética y la fábrica obtenida a partir del análisis de imagen en el Plutón de Marimanha (Pirineo).</i>	5
H. Sant’Ovaia:	
<i>Fabrics magnéticos em granitos variscos da Zona Centro-Ibérica.</i>	89

Arqueomagnetismo

M. Calvo, D. Sologashvili, A. Goguitchaichvili, M. F. Bógalo, A. Carranco, J. J. Villalaín y G. Maisuradze:	
<i>Estudio paleomagnético del yacimiento paleoantropológico de Dmanisi (Georgia).</i>	13
A. Carranco, J. J. Villalaín y R. Soto:	
<i>Nuevas estrategias de muestreo arqueomagnético en sedimentos blandos de cuevas.</i>	15
A. Carranco, J. J. Villalaín, J. Vallverdú, D. E. Angelucci y J. M ^a Vergès:	
<i>Resultados arqueomagnéticos en sedimentos holocenos quemados de los yacimientos arqueológicos de la Sierra de Atapuerca.</i>	17
Ll. Casas, R. Risch, D. Gómez y J. Shaw:	
<i>Son Fornés archaeointensities, an example of the microwave use, a new tool for palaeointensity research.</i>	19
G. Catanzariti, G. McIntosh, E. D. Martínez, A. M. Monge Soares y M. L. Osete López:	
<i>Archaeomagnetic dating study of the vitrified wall at the Late Bronze Age settlement of Misericordia (Serpa, Portugal).</i>	23
M. Gómez-Paccard, A. Chauvin, Ph. Lanos, G. McIntosh, M.L. Osete, G. Catanzariti, V.C. Ruiz-Martínez y J.I. Núñez:	
<i>The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula.</i>	55

Magnetismo Ambiental

R. Coimbra, D. Rey, K. Mohamed y Federico Vilas:

Variação secular em sedimentos dos últimos 40 ka da margem Atlântica da Galiza: ambiente sedimentar e registo direccional do campo geomagnético. 25

R. Coimbra, D. Rey, K. Mohamed, F. Vilas y T. Frederichs:

Detecção de eventos de Heinrich através do estudo das propriedades magnéticas de sedimentos do Plistoceno Superior e Holoceno da Margem Ibero Atlântica. 29

A. F. Davila:

Superparamagnetic magnetite as part of the animal magnetic sense. 33

A. F. Dávila:

Biogenic magnetic crystals as fossil biomarkers on Mars (Charla Invitada). 35

R. Devesa, M.T. Barral y F. Díaz-Fierros:

Magnetismo ambiental y contaminación antropogénica en el río Anllóns (Galicia). Estudio preliminar. 39

C.S.R. Gomes, A.F. Rocha, D. Rey y LF. Neves:

Monitorização da matéria particulada: um estudo na cidade de Coimbra (Portugal). 53

T. Mochales, E.L. Pueyo y A.M. Casas:

Prospección magnética de estructuras kársticas en zonas periurbanas; un método eficaz para la elaboración de mapas de riesgos. 59

K. Mohamed, D. Rey, B. Rubio y F. Vilas:

Evolución magnetoambiental del sector sur de la plataforma continental gallega desde el LGM. 63

D. Rey, B. Rubio, K. Mohamed, R. Coimbra, F. Vilas, B. Alonso y G. Ercilla:

El registro magnetoambial de los cambios paleoclimáticos de los últimos 30.000 años en el Marge Atlántico de Galicia. 77

J.J. Villalaín y M.P. Mata:

Propiedades magnéticas de concreciones carbonatadas ligadas a escapes de gases en el talud continental del Golfo de Cádiz. 97

Índice Temático

Paleomagnetismo

C.S.R. Gomes, L.G. Pereira y D. Rey:

Resultados paleomagnéticos do Maciço Alcalino de Monchique (SW de Portugal): uma interpretação. 51

V.C. Ruiz-Martínez, A. Palencia-Ortas y J.J. Villalaín:

Resultados paleomagnéticos y de ASM en sedimentos del Triásico Superior de la Meseta Occidental Marroquí y del Cretácico Superior del cráton Africano: discusión en el contexto de la evolución geodinámica mesozoica del NW de África. 85

V.C. Ruiz-Martínez, V. Villasante, G. McIntosh, I. Palencia, K. El Kadiri y A. Chalouan:

Rotaciones locales vs. Variación Secular geomagnética: resultados paleomagnéticos preliminares del magmatismo (Mioceno Medio – Superior) del Arco Bético-Rifeño en el NE de Marruecos. 87

R. Soto , J.J. Villalaín y A.M. Casas-Sainz:

Geometría extensional del sector occidental de la cuenca Vasco-cantábrica a partir de datos paleomagnéticos. 93

J.J. Villalaín, R. Soto, A.M. Casas, M.P. Mata, G. Fernández y M.F. Bógalo:

Propiedades magnéticas de sedimentos remagnetizados en cuencas mesozoicas del norte de Iberia. 95

Magnetoestratigrafía

E. Beamud, M. Garcés, M. Montes, F. Nozal, J.P. Calvo, F. López-Olmedo y J. Luengo:

Magnetoestratigrafía del Mioceno de las cuencas del Tajo y del Duero. 9

M. L. Osete, P.-R. Gialanella, J. J. Villalaín, A. Goyd, J. J. Gómez y F. Heller:

Proposed Magnetostratigraphy for the Early-Middle Toarcian. 67

A. Rodríguez-Pintó, E. L. Pueyo, A. Barnolas, A. Pocoví, J. M. Samsó y I. Gil-Peña:

Magnetoestratigrafía Cisiense-Luteciense preliminar de la cuenca surpirenaica occidental. 81

Tectónica

L. M. Agirrezabala y J. Dinarés-Turell:

Paleomagnetic, paleocurrent and structural data as indicators of vertical-axis block rotations in the northern margin of the Basque-Cantabrian Basin. 1

M. Garcés y J. Gee:	
<i>Low-angle faulting and footwall rotation at the mid-Atlantic ridge</i>	43
I. Gil-Peña, B. Oliva, E. L. Pueyo y A. Barnolas:	
<i>Datos preliminares de la remagnetización Estephaniense del Ordovícico Superior del Pirineo Centro-meridional; implicaciones estructurales.</i>	47
E. L. Pueyo, M. A. López, B. Oliva, A. J. Sussman, J. C. Larrasoña, J. Dinarés, B. Beamud, R. Soto, M. Garcés, I. Gil-Peña, A. Rodríguez, Y. Almar, O. Fernández, J. J. Villalaín, M. Calvo, M. F. Bógalo, E. Costa, T. Mochales, O. Vidal, O. Pueyo-Anchuela, M. T. Román, A. Gil-Imaz, J. Navas and the GeoKin3DPyr group from the INTERREG IIIb- Pyrenean Network:	
<i>A preliminary compilation of the Pyrenean Paleomagnetic Database.</i>	73

Fábricas

B. Antolín Tomás, A. M. Casas, T. Román Berdiel, I. Gil Peña, B. Oliva y R. Soto:	
<i>Comparación entre la fábrica magnética y la fábrica obtenida a partir del análisis de imagen en el Plutón de Marimanha (Pirineo).</i>	5
H. Sant’Ovaia:	
<i>Fabrics magnéticos em granitos variscos da Zona Centro-Ibérica.</i>	89

Arqueomagnetismo

M. Calvo, D. Sologashvili, A. Goguitchaichvili, M. F. Bógalo, A. Carranco, J. J. Villalaín y G. Maisuradze:	
<i>Estudio paleomagnético del yacimiento paleoantropológico de Dmanisi (Georgia).</i>	13
A. Carranco, J. J. Villalaín y R. Soto:	
<i>Nuevas estrategias de muestreo arqueomagnético en sedimentos blandos de cuevas.</i>	15
A. Carranco, J. J. Villalaín, J. Vallverdú, D. E. Angelucci y J. M ^a Vergès:	
<i>Resultados arqueomagnéticos en sedimentos holocenos quemados de los yacimientos arqueológicos de la Sierra de Atapuerca.</i>	17
Ll. Casas, R. Risch, D. Gómez y J. Shaw:	
<i>Son Fornés archaeointensities, an example of the microwave use, a new tool for palaeointensity research.</i>	19
G. Catanzariti, G. McIntosh, E. D. Martínez, A. M. Monge Soares y M. L. Osete López:	
<i>Archaeomagnetic dating study of the vitrified wall at the Late Bronze Age settlement of Misericordia (Serpa, Portugal).</i>	23
M. Gómez-Paccard, A. Chauvin, Ph. Lanos, G. McIntosh, M.L. Osete, G. Catanzariti, V.C. Ruiz-Martínez y J.I. Núñez:	
<i>The first archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula.</i>	55

Magnetismo Ambiental

R. Coimbra, D. Rey, K. Mohamed y Federico Vilas:

Variação secular em sedimentos dos últimos 40 ka da margem Atlântica da Galiza: ambiente sedimentar e registo direccional do campo geomagnético. 25

R. Coimbra, D. Rey, K. Mohamed, F. Vilas y T. Frederichs:

Detecção de eventos de Heinrich através do estudo das propriedades magnéticas de sedimentos do Plistoceno Superior e Holoceno da Margem Ibero Atlântica. 29

A. F. Davila:

Superparamagnetic magnetite as part of the animal magnetic sense. 33

A. F. Dávila:

Biogenic magnetic crystals as fossil biomarkers on Mars (Charla Invitada). 35

R. Devesa, M.T. Barral y F. Díaz-Fierros:

Magnetismo ambiental y contaminación antropogénica en el río Anllóns (Galicia). Estudio preliminar. 39

C.S.R. Gomes, A.F. Rocha, D. Rey y LF. Neves:

Monitorização da matéria particulada: um estudo na cidade de Coimbra (Portugal). 53

T. Mochales, E.L. Pueyo y A.M. Casas:

Prospección magnética de estructuras kársticas en zonas periurbanas; un método eficaz para la elaboración de mapas de riesgos. 59

K. Mohamed, D. Rey, B. Rubio y F. Vilas:

Evolución magnetoambiental del sector sur de la plataforma continental gallega desde el LGM. 63

D. Rey, B. Rubio, K. Mohamed, R. Coimbra, F. Vilas, B. Alonso y G. Ercilla:

El registro magnetoambial de los cambios paleoclimáticos de los últimos 30.000 años en el Marge Atlántico de Galicia. 77

J.J. Villalaín y M.P. Mata:

Propiedades magnéticas de concreciones carbonatadas ligadas a escapes de gases en el talud continental del Golfo de Cádiz. 97

Prospección magnética de estructuras kársticas en zonas periurbanas; un método eficaz para la elaboración de mapas de riesgos.

Magnetic prospection of karstic structures in periurban zones; an effective tool for carrying out hazard maps.

T. Mochales(*), E.L. Pueyo(**), A.M. Casas(*)

(*) Grupo de investigación Geotransfer. Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain. E-mail: tania@unizar.es.

(**) Unidad de Geología y Geofísica. Instituto Geológico y Minero de España, Fernando el Católico 59, 4C, 50006 Zaragoza, Spain.

ABSTRACT

Magnetic prospecting is usually discarded in the detection of subsoil cavities in urban and urban outskirts areas due to the potential interference of external electromagnetic fields. However a highly contrasted susceptibility between the media involved may allow its successful application to map these dangerous structures. Collapse and subsidence dolines frequently appear in Quaternary terraces resting on Tertiary gypsum in the surroundings of Saragossa. Magnetic susceptibility was monitored in both, geotechnical cores and surface exposures, displaying remarkable magnetic contrasts (around five orders of magnitude). One recently collapsed doline (latterly refilled with urban debris) was selected to check the validity of the assumption. A square grid 10 times bigger than the doline diameter was densely measured with two different proton gradiometers. The survey evinces a large dipole defined by more than 650 nT. Two other dolines, not showing surface evidences, were also detected during the survey. These results validate the starting hypothesis and open a new research approach to the problem.

Key words: Geophysical survey, doline, sinkhole, geomagnetic survey, susceptibility and remanence.

RESUMEN

Debido al ruido potencial de campos electromagnéticos externos, la prospección magnética es casi siempre descartada a la hora de detectar cavidades subterráneas en zonas urbanas y periurbanas. No obstante un contraste suficientemente alto entre los materiales implicados podría permitir su aplicación a la hora de cartografiar estas peligrosas estructuras. Las dolinas de subsidencia y colapso se desarrollan habitualmente en el entorno zaragozano sobre terrazas Cuaternarias que descansan sobre yesos Terciarios. Abundantes medidas de susceptibilidad magnética (en superficie y sondeos) reflejan contrates de susceptibilidad de hasta cinco ordenes de magnitud. Para validar la aplicabilidad del método se seleccionó una dolina de colapso (posteriormente rellena de escombros) sobre la que se obtuvieron numerosas medidas con dos gradiómetros diferentes en un área 10 veces mayor que el diámetro de la dolina. La prospección permitió observar un gran dipolo (650 nT) centrado en el objetivo así como la evidencia de otras dos estructuras kársticas que no mostraban indicios superficiales. Estos resultados validan la hipótesis de partida y abren nuevas posibilidades de investigación sobre el problema.

Introducción

El sustrato terciario del entorno de Zaragoza está principalmente constituido por yesos y margas, fácilmente solubles y movilizables en presencia de agua y una diferencia de gradiente hidráulico que favorezca

su circulación, etc. El entorno urbano se corresponde con zonas tradicionalmente de regadío, hecho que aumenta de forma exponencial los procesos de disolución del yeso Terciario y arrastre de la cobertura aluvial favoreciendo el desarrollo del karst. El desmesurado creci-

miento de las zonas urbanas e industriales desde los años 60, ha ocupado antiguas áreas rurales, situadas sobre las terrazas más jóvenes, donde la aparición de dolinas es más frecuente. Debido al alto riesgo para personas y bienes que este proceso supone, es necesario el

desarrollo de métodos de detección e identificación que aseguren la edificación sobre zonas estables o permitan conocer la morfología del terreno para tomar las precauciones geotécnicas pertinentes antes de construir.

Diferentes métodos de prospección geofísica, o combinaciones de ellos (sísmica, gravimetría, GPR, tomografía eléctrica) han sido utilizados con éxito en otras zonas del planeta

para detectar y cartografiar dolinas (Bishop et al., 1997; Neal et al., 2002; Reynolds, 1997; Zhou et al., 2002 y referencias citadas). La prospección magnética ha sido escasamente utilizada debido al potencial ruido magnético existente en las áreas de muestreo, sin embargo, trabajos recientes han demostrado la gran aplicabilidad y conveniencia de su uso para la exploración de grandes superficies de forma muy rápida y eficaz en zonas

periurbanas (Rybakov et al., 2005; Mathé et al., 2006; Mochales et al., 2006a y 2006b).

En este trabajo se presentan algunos resultados obtenidos tras la aplicación de la prospección magnética en zonas del entorno urbano de Zaragoza como un método eficaz para la detección y cartografía preliminar de cavidades en el subsuelo.

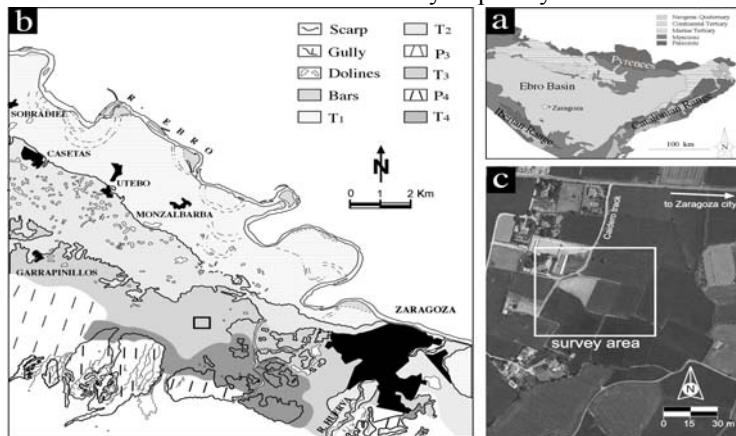


Fig. 1. a) Ilustración geológica de la Cuenca del Ebro. La estrella indica la localización de la zona de estudio. **b)** Mapa geomorfológico del norte de Zaragoza (del estudio de las fotos aéreas de 1957). El cuadro indica la zona de estudio. **c)** Imagen de satélite mostrando la zona de estudio: El Caidero.

Fig. 1. a) Geological sketch of the Ebro Basin. The star indicates the location of the studied area. **b)** Geomorphological map northwest Zaragoza (from the study of aerial photographs of 1957). The square shows the studied area. **c)** Satellite image displaying the study area: El Caidero.

Entorno a este momento la Cuenca del Ebro se abrió hacia el Mar Mediterráneo, causando una gran incisión erosiva que continua en la actualidad. Durante el Cuaternario se desarrollaron varios niveles encajados de terrazas y glaciares (Soriano, 1990), compuestos por gravas, arenas y limos (permeables) que cubrieron parcialmente los depósitos terciarios (Fig. 1b). La karstificación es uno de los procesos más importantes de la zona y es más notable en aquellos lugares donde los depósitos cuaternarios recubren a los terciarios. La expresión superficial de este proceso son las llamadas dolinas o simas y son el resultado del hundimiento parcial de las bóvedas o los

conductos generados por disolución y arrastre en el sustrato terciario. Pueden generarse por hundimiento repentino (colapsos, Fig. 2) o progresivo (subsistencia).

Metodología

Prospección magnética

Se basa en la medida y modelización de las anomalías del campo magnético terrestre, causadas por las variaciones de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Posee numerosas aplicaciones debido al bajo coste y rapidez de exploración. La magnitud de las anomalías magnéticas y el alcance en profundidad de la prospección será mayor cuanto

Marco geológico

La Cuenca del Ebro representa la última fase evolutiva de la cuenca de antepaís de los Pirineos, Cordillera Ibérica y Cordillera Costero-Catalana (Fig. 1a) y sus límites y estructura actuales se establecieron entre el Oligoceno Superior y Mioceno Inferior. Los materiales aflorantes fueron sedimentados en ambientes marinos al comienzo del Terciario y continentales a finales del Eoceno, durante una etapa endorreica que se prolongó hasta el Mioceno superior y que originó la gran masa evaporítica situada en el centro de la cuenca.

mayor sea el contraste de susceptibilidad magnética de los materiales involucrados, el volumen y proximidad a la superficie del cuerpo causante de la anomalía, y menores las posibles interferencias causadas por materiales cercanos (en condiciones óptimas se pueden detectar cavidades situadas a 30 m de profundidad).

Se utilizaron dos modelos de magnetómetros de protones para llevar a cabo las prospecciones, los cuales miden la intensidad del campo magnético y el gradiente. El modelo PMG-1 (GF Instruments Ltd.) realiza medidas cada 4 segundos, alcanzando una resolución de 0.1 nT y precisión de 1 nT, mientras que el modelo GMS-19

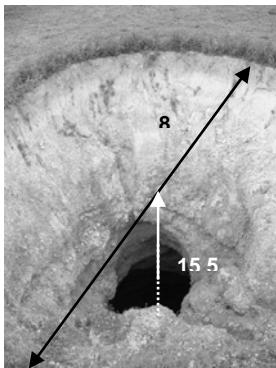


Fig. 2. Colapso de El Caidero.
Fig. 2. Collapse of El Caidero.

(GEM Systems Inc.) es capaz de realizar dos medidas por segundo, con una resolución de 0.01 nT y una precisión de 0.2 nT. Además el GMS-19 lleva incorporado un sistema de posicionamiento global (GPS) que asigna a cada medida su posición absoluta. Las medidas fueron realizadas durante los períodos de calma solar y fueron controladas en contraste con el registro diario del Observatorio Magnètic de l'Ebre (CSIC).

Mineralogía Magnética

La susceptibilidad de los materiales involucrados fue exhaustivamente controlada en la superficie del terreno, en el sustrato del entorno de Zaragoza (a partir de sondeos) y en el relleno de las cavidades. Las medidas fueron realizadas por medio de los susceptómetros KLY-3 (Agico Ltd.) y SM-20 (GF Instruments). Los valores

medios de susceptibilidad volumétrica obtenidos a parir de numerosas mediciones son de $2000-3000 \times 10^{-6}$ S.I. para el suelo vegetal; el aluvial cuaternario varía entre 100×10^{-6} S.I. (gravas) y 350×10^{-6} S.I. (silts); las margas miocenas muestran valores de 100×10^{-6} S.I. (alcanzando 30×10^{-6} S.I. si existe un elevado porcentaje de yeso); el sustrato yesífero terciario varía entre -10 y -50×10^{-6} S.I. (Fig. 3); el relleno antrópico alcanza valores hasta 40000×10^{-6} S.I. Estos valores son claves para cuantificar la magnetización inducida y modelizar las anomalías observadas en campo.

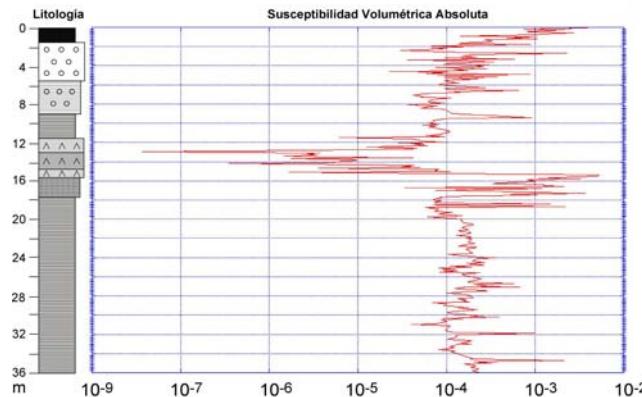


Fig. 3. Valores de susceptibilidad en el sustrato cercano al colapso.

Fig. 3. Susceptibility values in the substratum near to collapse.

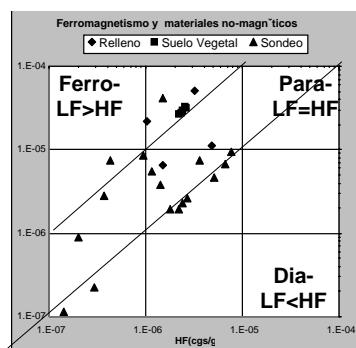


Fig. 4. Contribución para/ferromagnética de los materiales.
Fig. 4. Para/ferromagnetic contribution of the materials.

De esta forma se puede averiguar rápidamente la aportación ferro o diamagnética de los materiales involucrados en condiciones naturales así como cuantificar el posible

efecto de la magnetización remanente. Los yesos presentaron valores inferiores a 1 a causa de la aportación diamagnética, las margas presentaron valores próximos a 1 (paramagnetismo). Las muestras que presentaron valores entre 1 y 10 fueron las gravas y algunas cerámicas pertenecientes al relleno de la dolina (ferromagnetismo), entre 10 y 100 gravas, cerámicas y suelo vegetal, y entre 100 y 1000 los restos metálicos, asfalto y hormigón del interior de la dolina (Fig.4).

En colaboración con el laboratorio de paleomagnetismo de Burgos (magnetómetro 2G), se realizó una selección de muestras representativas de los tipos litológicos que mostraron

En colaboración con el grupo ICMA (CSIC-UZ) se realizaron diversos análisis en los magnetómetros SQUID MPMS-5S y MPMS-XL. Se realizaron medidas de susceptibilidad a alto (entre 10000 y 20000 Oe) y bajo campo (4 Oe). Éstas últimas son equivalentes a las medidas obtenidas en el KLY3 y en el SM20 (campo similar al geomagnético), las de alto campo representan la medida de la susceptibilidad paramagnética.

ferromagnetismo apreciable, con el fin de averiguar la magnitud de la magnetización remanente natural.

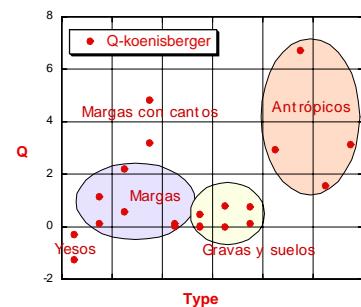


Fig. 5. Índice de Krönisberger que relaciona las magnetizaciones remanentes e inducidas en diferentes tipos litológicos.

Fig. 5. Krönisberger index relates remanent and induced magnetizations of different lithology kinds.

Yesos, margas y gravas dieron valores habituales en rocas sedimentarias, en cambio las margas arenosas, suelo vegetal y elementos antrópicos (ladrillo, asfalto y cerámica) presentaron elevados valores de remanencia. Se despreció la aportación a una remanencia efectiva por autocompensación por desorden del relleno y el suelo vegetal. En la Fig. 5 se representa la variación del coeficiente de Krönisberger ($Q = M_{\text{remanente}} / M_{\text{inducida}}$), donde la aportación ferromagnética se puede considerar despreciable si $Q < 0.5$ ($J_R < 10^{-3} \text{ A/m}$). Tan sólo el relleno antrópico, las gravas aluviales y las margas con cantos superaron dicho valor, resultando las dos primeras despreciables. Las margas arenosas ($J \approx 10^{-2} \text{ A/m}$) podrían tener una contribución significativa en la modelización por lo que se necesita un estudio más detallado de la orientación de su remanencia.

Todos estos valores son parámetros utilizados para modelizar las anomalías magnéticas, entre los que se incluyen: a) Susceptibilidad (S.I.); b) Remanencia; c) Campo magnético actual; d) Geometría y profundidad de los cuerpos.

Discusión

Tras realizar casi 12000 medidas sobre una red meticulosamente construida (120 x 120 m) en la zona principal de estudio, por medio de ambos magnetómetros, se detecta la gran anomalía causada por el relleno de la anomalía principal, ferro y altamente paramagnético (anomalía 1). Se trata de una gran anomalía de forma bipolar, de más de 650 nT de amplitud, registrada en la intensidad del campo magnético y una anomalía positiva de 150 nT en el gradiente del campo. Un año y medio después, ambas fueron verificadas por medio del magnetómetro GMS-19, e incluso incrementaron su amplitud,

alcanzando 900 nT y 190 nT respectivamente (incremento debido al continuo relleno de la cavidad). Además se detectaron otras dos anomalías (anomalías 2 y 3), sin evidencias superficiales, las cuales fueron confirmadas por los agricultores de la zona. Las tres anomalías presentan una orientación ENE similar al gradiente hacia el nivel de base regional en su camino hacia el Ebro (Fig. 6).

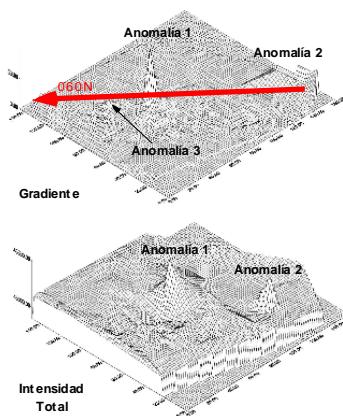


Fig. 6. Reconstrucción 3D de las anomalías magnéticas detectadas en la dolina del Caidero

Fig. 6. 3D reconstruction of magnetic anomalies in the Caidero doline

La interpretación de las anomalías se realizó por medio del programa Gravmag (British Geological Survey, Pedley et al. 1993) que permite modelizar en 2.5D en cortes N-S. Se simplificó la geometría del colapso para poder ajustar la anomalía real y la modelizada; una capa superior de un metro de espesor de suelo de uso agrícola, un *background* con los valores de la terraza Cuaternaria y la geometría con forma de cilindro con un cono invertido en su ápice superior (Fig. 3) para el cuerpo responsable de la anomalía (relleno de material con susceptibilidad dos órdenes superior a la de la terraza).

Agradecimientos: J.J. Curto (Observatorio del Ebre-CSIC), Juanjo Villalain (U. Burgos y el personal del servicio de medidas físicas (ICMA) de la U. Zaragoza (Ana Belén Arauzo, Enrique Guerrero y Conrado Rillo) colaboraron amablemente en diversos aspectos durante la consecución de este proyecto. Los proyectos *Geotransfer* (Gob. de Aragón) y el *PROFIT: FIT-310200-2004-181* financiaron los gastos de investigación.

Bibliografía

- Bishop I., Styles P., Emsley S. J., Ferguson N. S., 1997. The detection of cavities using the microgravity technique: case histories from mining and karstic environments. *Geol Soc Eng Geol Spec Publ* 12:153–166
- Mathé V., Lévéque F., Mathé P.E., Chevallier C., Pons Y., 2006. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. *Journal of Applied Geophysics* 58 (2006) 202–217
- Mochales, T., Pueyo, E.L., Casas, A.M. and Soriano, M.A. 2006a (in press). Magnetic prospection as an efficient tool for doline detection. A case study in the central Ebro Basin (Northern Spain). Geological Society of London. Special Publications: Natural and Anthropogenic Hazards in Karst: Recognition, Analysis and Mitigation.
- Mochales, T.; Casas, A.M.; Pueyo, E.L.; Pueyo, O.; Román, M. T.; Pocoví, A.; Soriano, M.A.; Ansón, D., 2006b (in review). Combining geophysical surveys to detect underground cavities (magnetometry, GPR, gravimetry.). Application to the Zaragoza area (NE Spain). *Environmental Geology*
- Neal, A., Pontee, N. I., Pye, K., Richards, J., (2002) Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using ground-penetrating radar. *Sedimentology* 49, 789-804
- Reynolds, J. M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics: Chichester, John Wiley & Sons.
- Rybakov, M. Rotstein, Y.; Shirman, B.; Al-Zoubi, A., 2005. Cave detection near the Dead Sea—a micromagnetic feasibility study. *The Leading Edge (Society of Exploration Geophysicists)*, 24 (6), 585-590; DOI: 10.1190/1.1946210
- Soriano M. A. 1990. Geomorfología del sector centro-meridional de la Depresión del Ebro. Diputación Provincial de Zaragoza.
- Zhou, W., Beck, B. F. & Adams, A. L. 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*, 42, 922-928

Evolución magnetoambiental del sector sur de la plataforma continental gallega desde el LGM

Enviromagnetic evolution of the southern sector of the Galician continental shelf since the LGM.

K. Mohamed (*), D. Rey (*), B. Rubio (*) y F. Vilas(*)

(*) Departamento de Xeociencias Mariñas e O. T. Universidade de Vigo, Lagoas-Marcosende, 36310. Vigo. kmohamed@uvigo.es.

ABSTRACT

High-resolution analyses of four sedimentary cores from the southern sector of the Galician continental shelf have provided the first record of a climatic signature detected by environmental magnetic techniques in Iberian marine sediments. Integrated magnetic, geochemical and sedimentological approach has shown that magnetic concentration maxima correlate to the recentmost warm periods of the Holocene, the Medieval Warm Period (MWP) and the Roman Warm Period (RWP). These maxima are the result of increased continental input to the continental shelf during these humid and rainy periods. Progressive evolution of early diagenesis with depth eventually dissolves most magnetic oxides, limiting any further paleoclimatic interpretation of the magnetic signal beyond the RWP.

Key words: Environmental magnetism, Iberian continental shelf, paleoclimate, early diagenesis.

RESUMEN

El análisis de alta resolución de cuatro testigos sedimentarios del sector sur de la plataforma continental gallega ha proporcionado el primer registro paleoclimático de sedimentos marinos Ibéricos obtenido mediante la aplicación de técnicas de magnetismo ambiental. La combinación de datos magnéticos, geoquímicos y sedimentológicos ha mostrado que los máximos de concentración magnética están correlacionados con los dos períodos cálidos más recientes del Holoceno, el Período Cálido Medieval (MWP) y el Período Cálido Romano (RWP). Estos máximos son el resultado de un aporte continental a la plataforma incrementado durante estos períodos más húmedos y lluviosos. Por otra parte, la evolución progresiva de la diagénesis temprana con la profundidad provoca la disolución prácticamente completa de los óxidos magnéticos, limitando la interpretación paleoclimática de esta señal magnética con anterioridad al RWP.

Introducción

El estudio desde un punto de vista paleoambiental de las propiedades magnéticas de los sedimentos ha experimentado un importante desarrollo durante las últimas décadas (Evans y Heller, 2003). Sin

embargo, pocos de los trabajos publicados han centrado su atención en los sedimentos de las plataformas continentales, debido al mayor grado de complejidad de su composición magnetomineral en comparación con otros ambientes, como los de cuencas marinas profundas. Además, estos ambientes presentan con frecuencia alteraciones diagenéticas significativas, lo cual altera las características magnéticas de sus sedimentos y limita en gran medida su interpretación en términos paleoclimáticos.

Este trabajo representa la primera aplicación con éxito de técnicas de magnetismo ambiental en la identificación y correlación de señales climáticas en sedimentos de la plataforma continental Ibérica. En particular, esta correlación se ha manifestado como un incremento en la concentración de minerales magnéticos como resultado de un aporte continental incrementado durante los períodos cálidos del Holoceno reciente.

Metodología

Se recogieron 4 testigos de vibración de entre 1.5 y 4 m de longitud, dispuestos a lo largo de un transecto N-S bordeando el Depósito Fangoso de Galicia, en el sector meridional de la plataforma continental gallega (Fig. 1). Los testigos se submuestrearon por medio de *U-channels* (2x2 cm de sección, 150 cm de longitud máxima) a lo largo de su eje. Posteriormente se llevó a cabo la determinación de alta resolución (1 cm) de las características magnéticas y composicionales de estos *U-channels*. En particular, se obtuvo el registro de los parámetros magnéticos dependientes de la concentración, como la susceptibilidad magnética (κ) y la saturación de la imanación remanente isotérmica (SIRM), la coercitividad de la remanencia (Bcr), dependiente de la mineralogía magnética y el índice magnetogranoolumétrico ARM/IRM. Estos resultados permitieron seleccionar muestras discretas en intervalos de interés especial, que se emplearon en la determinación de la distribución granulométrica de los testigos así como en los análisis composicionales de detalle. El marco cronológico

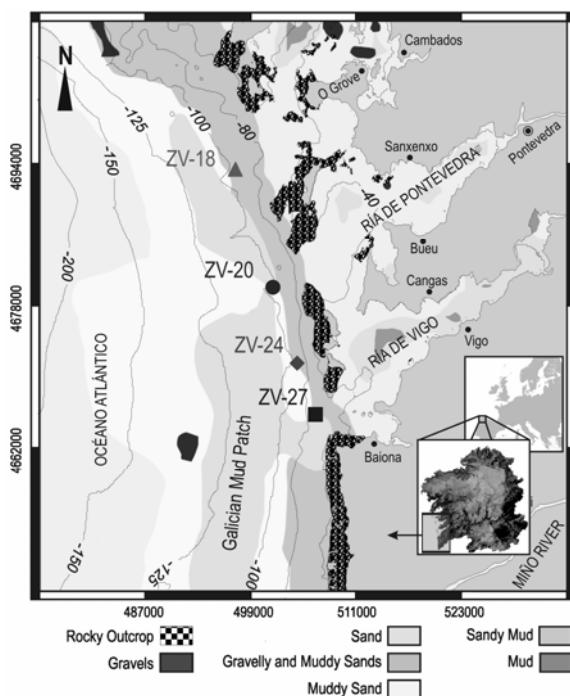


Fig. 1: Mapa de distribución textural de sedimentos superficiales del sector meridional de la plataforma continental gallega. Los testigos analizados se dispusieron en un transecto N-S bordeando el Depósito Fangoso de Galicia.

Fig. 1: Textural distribution map of superficial sediments from the southern Galician continental shelf. The cores were located on a N-S transect fringing the Galician Mud Patch.

de estos testigos se estableció a partir de la datación por ^{14}C AMS de 8 niveles correspondientes a los testigos ZV-20 y ZV-27.

Resultados

Los análisis texturales mostraron la existencia de cuatro unidades sedimentarias depositadas desde el Pleistoceno Superior. Estas unidades se denominaron A, B, C y D desde el techo hacia la base (Fig. 2). La unidad A mostró una composición mayoritaria de arena limosa depositada durante el Holoceno. Esta unidad se ha interpretado como un medio marino de baja energía. Las gravas bioclásticas son el componente mayoritario de la unidad B, que ha sido interpretada como un depósito transgresivo. La unidad C muestra características coherentes con un depósito de playa, como pone de manifiesto su composición de arenas siliciclásicas y glauconíticas, de tamaño medio a fino, y bien seleccionadas. Finalmente, la unidad D está formada por gravas siliciclásicas bien redondeadas, cuyo origen se atribuye a un ambiente fluvial. En las unidades A y C, la elevada concentración de Ti y el bajo contenido bioclástico sugieren una mayor influencia detritica en estas unidades que en la B y D (Fig. 2). En la unidad A, el perfil de Ti mostró hasta tres máximos. Este comportamiento también se observó en los perfiles de κ y SIRM mostraron. Estos parámetros mostraron tres máximos de amplitud decreciente con la profundidad, denominados A1, A1b y A2 desde el techo hasta la base. La característica más destacable del perfil de Bcr consistió en el marcado

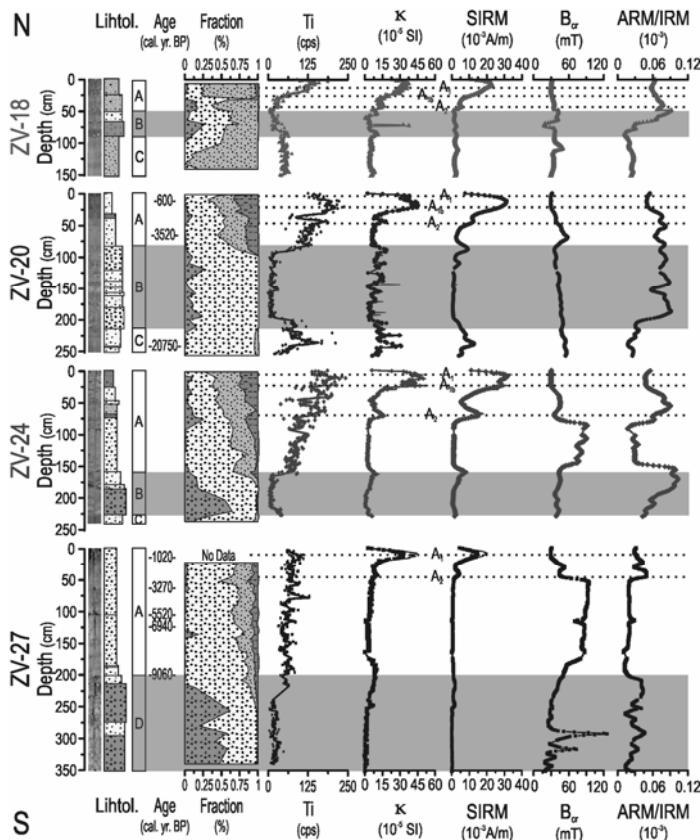


Fig. 2: Representación esquemática de la variación textural con la profundidad de los testigos estudiados. Los niveles datados se muestran junto con la edad obtenida a su profundidad correspondiente. Las fracciones granulométricas son, de izquierda a derecha, grava, arena, limo y arcilla. Al lado se muestran los perfiles con la profundidad de las fracciones texturales, el contenido en Ti, κ , SIRM, B_{cr} y ARM/IRM para una mejor comparación.

Fig. 2: Schematic representation of the textural characteristics of the four studied cores. Dated levels are shown at their corresponding depth along with the obtained age. Size fractions are, from left to right, gravel, sand, silt and clay. Downcore profiles of the textural fractions, Ti content, κ , SIRM, B_{cr} and ARM/IRM are plotted beside for better comparison.

incremento observado bajo el pico A2. Este comportamiento fue especialmente evidente en los testigos más meridionales. Este incremento es el resultado de una mayor contribución en estos niveles de minerales de alta coercitividad, como la hematites o la goetita. El parámetro granulométrico ARM/IRM mostró una variación en fase con la B_{cr} , de tal modo que en los horizontes de mayor dureza magnética (alta B_{cr}) la ARM/IRM mostró los valores más bajos, poniendo de manifiesto un aumento del tamaño de grano magnético. El acoplamiento entre estos dos parámetros ha sido

descrito con anterioridad como el resultado de la disolución reductora de los óxidos y oxihidróxidos magnéticos durante la diagénesis temprana (Karlin y Levi, 1983). De este modo, los granos de baja coercitividad de menor tamaño se disuelven primero, como resultado de su mayor relación superficie/volumen. El resultado de este proceso es el aumento de la contribución relativa de la hematites y/o la goetita, de mayor tamaño y coercitividad más alta.

Discusión

La unidad holocena A

mostró la mayor variabilidad magnética y geoquímica de todos los testigos analizados. La buena correlación entre el perfil de Ti y los parámetros magnéticos dependientes de la concentración sugiere que los procesos detriticos son los principales responsables de las variaciones magnéticas observadas durante el Holoceno. La localización de los máximos de κ y SIRM a profundidades similares en todos los testigos (Fig. 2) pone de manifiesto la amplia distribución espacial de los procesos responsables de estos incrementos de concentración magnética. Por otra parte, los máximos de concentración magnética mostraron una variación en fase con los dos períodos cálidos más recientes del Holoceno, el Período Medieval (MWP) y Romano (RWP). Así, el incremento en el aporte continental a la plataforma, procedente principalmente de los ríos Duero y Miño, sería el resultado del mayor grado de humedad y de precipitaciones durante estos períodos (Dias et al., 2000, Martínez-Cortizas, 1999). Este incremento en el aporte continental durante el MWP y el RWP daría lugar, por tanto, a los máximos de concentración magnética A1a y A1b.

Con anterioridad al RWP, la evolución progresiva de los procesos diagenéticos con la profundidad provoca la disolución prácticamente completa de los óxidos magnéticos. Esto altera de manera muy importante la señal magnética, limitando cualquier interpretación paleoclimática de las propiedades magnéticas de estos sedimentos en períodos previos al RWP.

Conclusiones

Este trabajo es el primer estudio magnetoambiental de los sedimentos de la plataforma continental Ibérica. Las técnicas magnéticas han demostrado con éxito su aplicación en la detección y correlación de una señal climática en estos sedimentos.

Con anterioridad al RWP no ha sido posible llevar a cabo una interpretación paleoclimática fiable de las propiedades magnéticas. Esto es consecuencia de la importante alteración de la señal magnética como resultado de la disolución diagenética temprana de los óxidos magnéticos de estos sedimentos.

Agradecimientos.

Este trabajo es la contribución número 392 del grupo de investigación GEOMA de la Universidad de Vigo. Kais Mohamed agradece el apoyo financiero del programa “Paleostudies” de la UE.

Referencias

- Dias, J. M. A., Boski, T., Rodrigues, A. and Magalhaes, F. (2000) Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present – A synthesis. *Marine Geology*, 170(1-2), 177-186
- Evans, M. E. and Heller, F. (2003) *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*, Academic Press, San Diego, 299 p.
- Karlin, R. and Levi, S. (1983) Diagenesis of magnetic minerals in Recent haemipelagic sediments (Gulf of California). *Nature*, 303(5915), 327-330.
- Martínez-Cortizas, A. (1999) *Atlas Climático de Galicia*, Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 207 p.
- Rey, D., Mohamed, K., Bernabeu, A., Rubio, B., Vilas, F. (2005) Early diagenesis of magnetic minerals in marine transitional environments: Geochemical signatures of hydrodynamic forcing. *Marine Geology*, 215 (3-4), 215-236.
- Thompson, R. and Oldfield, F. (1986) *Environmental magnetism*, Allen & Unwin, London. 227 pp.
- Haese, R. R. (2000) The reactivity of iron. En: *Marine geochemistry*, Schulz, H.D. and Zabel, M. (eds.). pp. 233-262. Springer, Berlin.

Proposed Magnetostratigraphy for the Early-Middle Toarcian

María-Luisa Osete^a, Paola-Romana Gialanella^b, Juan J. Villalaín^c, Antonio Goy^d, Juan J. Gómez^e, Friedrich Heller^f

^a Dept. Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain. mlosete@fis.ucm.es

^b Dept. Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Lgo. San Marcellino 10, 80138 Naples, Italy.

^c Dept. Física, Universidad de Burgos, 09006 Burgos, Spain.

^d Dept. Paleontología e Instituto de Geología Económica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain.

^e Dept. Estratigrafía e Instituto de Geología Económica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain.

^f Institut für Geophysik, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Switzerland

ABSTRACT

The magnetostratigraphy of the Lower-Middle Toarcian has been established in two well-dated stratigraphically expanded sections: the Sierra Palomera and the Ariño sections, located in the Iberian Range, in central-eastern Spain. A stable component with maximum unblocking temperatures up to 575°C was isolated by thermal cleaning. This component passes fold and reversal tests and is considered the characteristic remanent magnetization of primary origin. After correlation of these results with other contemporaneous Toarcian magnetostratigraphic sections, a refined Magnetic Polarity Time Scale is proposed for the Lower-Middle Toarcian. In addition a first Toarcian palaeomagnetic pole for Iberia has been obtained: Plat=77.4° Plon=241.3°E (dm=5.4° dp=6.0°).

Key words: Magnetostratigraphy, Early Jurassic, biostratigraphy, Iberian Plate.

RESUMEN

Se ha realizado un estudio magetoestratigráfico en dos secciones expandidas de edad Toarcense Inferior-Medio: Sierra Palomera y Ariño (Cordillera Ibérica). La componente característica se determinó a partir de la desimanación térmica, presentando temperaturas de desbloqueo máximas del orden de 575°C. El resultado de las pruebas del pliegue y de la inversión fue positivo para esta componente que se considera de origen primario. Las columnas obtenidas han sido correlacionadas con otras secciones magnetoestratigráficas. Como resultado del trabajo se propone una Escala de Polaridades Magnéticas para el Toarcense Inferior-Medio. Además, se aporta el primer polo paleomagnético para Iberia para el periodo considerado: Plat=77.4° Plon=241.3°E (dm=5.4° dp=6.0°).

Introduction

The Magnetic Polarity Time Scale of the Toarcian interval is based on a small number of magnetostratigraphic studies, many of them carried out in condensed sections: the

Southalpine Breggia section (Horner and Heller, 1983), the old stratotype of the Toarcian at Thouars (Paris Basin, Galbrun et al., 1988 a) and in the Iznalloz section (southern Spain, Galbrun et al., 1990). Recent results from the Neuquén basin

(Argentina, Iglesia-Llanos and Riccardi, 2000) give contradictory results. Hence it is suggested that a revision of the MPTS (Ogg, 1995) should be considered.

Sampling and biostratigraphy

This paper presents a magnetostratigraphic study performed in two marine limestone sections (Turmiel Formation) located in the Iberian Range (Spain): the Sierra Palomera section (lat. = 40.6°N, long. = -1.25°E) and the Ariño section (lat. = 41.0°N, long. = -0.9°E). At Sierra Palomera, 81 oriented cores have been collected along 28 m of section. In the Ariño section, 74 oriented cores have been collected in a 45 m thick section.

Biostratigraphic analysis of the Sierra Palomera and the Ariño sections has been based on a bed by bed study and sampling of both sections and on the detailed determination of the collected ammonites. A complete and precise local biozonation has been previously published by Comas-Rengifo et al. (1996) and García Joral and Goy (2004).

Results

Two magnetisation components could be isolated by thermal cleaning: a secondary syntectonic component of always normal polarity unblocking at intermediate temperatures up to 450°C / 475°C (A component) and a high temperature unblocking component up to 575°C (B component). The B component passes fold and reversal tests and is considered the characteristic remanent magnetization of primary origin.

Six magnetozones have been observed. The oldest normal polarity magnetozone N1 expands from the Early Toarcian Tenuicostatum Zone to the Elegantulum Subzone of the Serpentinum Zone. The reversed polarity magnetozone R2 develops within the Serpentinum Zone above and its

upper boundary is close to the Elegantulum and Falciferum subzones boundary. Within R2 a sub-magnetozone nR2 has been recorded in the Sierra Palomera section. The top of the N2 magnetozone is recorded in the Bifrons Subzone of the Bifrons Zone, and it is followed by a R3 magnetozone which expands up to the Middle Toarcian Variabilis Zone. The normal polarity N3 magnetozone includes the boundary between the Variabilis and Illustris subzones of the Variabilis Zone, and the R4 magnetozone is developed in the Illustris Subzone.

The proposed magnetostratigraphic sequence for the Lower-Middle Toarcian is shown in figure 1.

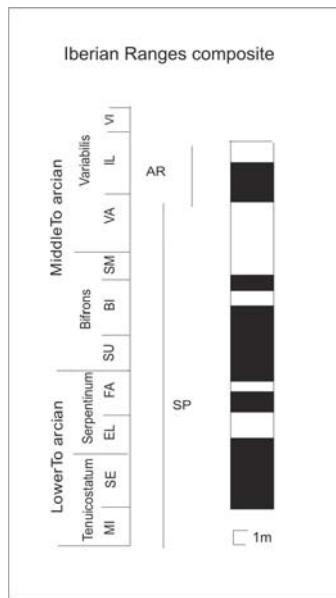


Fig.1. Magnetostratigraphic composite column for Sierra Palomera and Ariño sections.

References

- Comas-Rengifo, M.J., Gómez, J.J., Goy, A., Arias, C.F., Bernad, J., García Joral, F., Herrero, C., Martínez, G., Perilli, N., 1996. The Toarcian in the Rambla del Salto (Sierra Palomera) section. 1st Toarcian and 4th Aalenian working groups meeting. International Subcommission of Jurassic stratigraphy. Field trip Iberian Range Guide Book, pp. 27–48.
- Galbrun, B., Gabilly, J., and Raspins, L., 1988a. Magnetostratigraphy of the Toarcian stratotype sections at Thouars and Airvault (Des-Serves, France). Earth Planet. Sci. Lett. 87, 453–462.
- Galbrun, B., Baudin, F., Fourcade, E., Rivas, P., 1990. Magnetostratigraphy of the Toarcian Ammonitico Rosso limestone at Iznalloz, Spain. Geophys. Res. Lett. 17, 2441–2444.
- García Joral, F., Goy, A., 2004. Caracterización de *Choffatirhynchia* nov. gen. (Brachiopoda, Rhynchonellida) en el Toarcense (Jurásico) de la Cordillera Ibérica (España). Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.) 99, 237–250.
- Horner, F., Heller, F., 1983. Lower Jurassic magnetostratigraphy at the Breggia Gorge (Ticino, Switzerland) and Alpe Turati (Como, Italy). Geophys. J. R. astr. Soc. 73, 705–718.
- Iglesia-Llanos, M.P., Riccardi, A.C., 2000. The Neuquén composite section: magnetostratigraphy and biostratigraphy of the marine lower Jurassic from the Neuquén basin (Argentina). Earth Planet. Sci. Lett. 181, 443–457.
- Ogg, J.G., 1995a. Mesozoic Magnetic Polarity Time Scale. International Subcommission of Jurassic Stratigraphy, ISSJ Newslett. 23, 73–96.
- Ogg, J.G., 1995b. Magnetic Polarity Time Scale of the Phanerozoic. In: Global Physics. A Handbook of physical Constants, AGU Reference Shelf 1, 240–270.

Modelo Inicial Regional SCHA-DI.00 Arqueomagnético para Europa para los últimos 2000 años.

Initial SCHA-DI.00 regional Archaeomagnetic model for Europe for the last 2000 years.

F.J. Pavón-Carrasco (1), M. Osete (2), J. Miquel Torta (3), L.R. Gaya-Piqué (4), Ph. Lanos (5)

(1) Autor Principal, Servicio de Geomagnetismo – Instituto Geográfico Nacional, C/ General Ibáñez de Ibero, 3. 28003 – Madrid.

Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I: Geofísica y Meteorología. Facultad de Física – UCM, 28040 – Madrid. fjpavon@fis.ucm.es

(2) Coautor, Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I: Geofísica y Meteorología. Facultad de Física – UCM, 28040 – Madrid.

(3) Coautor, Observatori de l'Ebre, CSIC – Universitat Ramon LLull, Horta Alta 38, 43520. Roquetes, Spain.

(4) Coautor, UMBC/GEST at Planetary Geodynamics Lab., NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA.

(5) Coautor, Civilisations Atlantiques et Archéosciences, CNRS, UMR 6566, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 35042, Cedex, France.

ABSTRACT

The available Bayesian European Palaeosecular Variation Curves based on archaeomagnetic data have been used to derive a regional model for the geomagnetic field in Europe for the last 2000 years by using the Spherical Cap Harmonic Analysis (SCHA) technique. Peripheral data have been obtained from the CALS3K.2 global model. The resulting SCHA-DI.00 model provides the directional behaviour of the Earth magnetic field, but not information about intensity. The first spherical cap harmonic coefficient, g_0^0 , has been used to normalise the rest of coefficients. The SCHA-DI.00 model fits the input data better than global models.

Key words: Archaeomagnetism, Geomagnetic Secular Variation, Regional and global models, Europe.

RESUMEN

Las Curvas de Variación Paleosecular (CVPS) disponibles en Europa han sido utilizadas para general un primer modelo regional de campo geomagnético en Europa válido para los últimos dos mil años usando la técnica de análisis armónico en un casquete esférico (Spherical Cap Harmonic Analysis, SCHA). Los datos de contorno fueron obtenidos a través del modelo global CALS3K.2. El coeficiente armónico g_0^0 ha sido usado para normalizar el resto de los coeficientes del modelo y así poder obtener una descripción direccional del campo geomagnético en declinación e inclinación, sin información de la intensidad. El modelo regional resultante SCHA-DI.00 ajusta mejor a los datos de entrada (CVPS de Europa) que el resto de modelos globales desarrollados en las últimas décadas.

Introducción.

Para tener un mejor conocimiento del Campo Magnético de la Tierra (CMT) es necesario analizar en detalle

su variación secular (VS), variación de largo período característica del CMT de origen interno (núcleo externo de la Tierra). Esta variación ha sido registrada en los últimos dos

siglos en observatorios magnéticos y anteriormente en rutas marítimas, donde se anotaban los valores de declinación y en ocasiones de inclinación (ej. Jackson et al.,

2000). Para poder tener un conocimiento en el pasado del CMT se hace necesario los estudios paleomagnéticos. Además, una mejor descripción del CMT será de utilidad en la datación arqueomagnética.

Modelos globales de campo geomagnético han sido desarrollados en la última década (ej. Ohno & Hamano, 1993; Hongre et al., 1998; Korte and Constable, 2003, 2005). Pero el número de datos paleomagnéticos es todavía demasiado pequeño para describir con buena precisión la VS del CMT y poder ser usado en la técnica de datación arqueomagnética. Ante esta limitación se pueden construir las CVPS características de cada región o país, lo cual conlleva una traslación de los datos usados desde el lugar de muestreo hasta el punto donde se va a referir la curva. Ello lleva asociados errores, por ejemplo, para el caso de Iberia, errores menores de 3° y 2° para la declinación e inclinación respectivamente (Núñez, 2004).

Un paso intermedio entre los modelos globales y las CVPS es la determinación de un modelo regional, que permite una descripción del campo a escala continental.

Actualmente, Europa es el continente con mayor densidad de datos arqueomagnéticos, con los que se han generado las CVPS en diferentes países y regiones. Estas curvas han sido usadas para desarrollar un modelo regional arqueomagnético. Por tanto, el objeto de este estudio, es proporcionar un primer modelo regional para Europa válido para los dos mil últimos años mediante aplicación de la técnica SCHA.

Técnicas SCHA y SCHA-DI.

La técnica SCHA introducida por Haines (1985) ha sido aplicada en las últimas décadas en numerosos estudios del

campo geomagnético (Torta et al., 2006). La solución general que satisface las condiciones impuestas por la ecuación de Laplace implica que el potencial dado en un casquete esférico viene expresado por:

$$V(r, \theta, \lambda) = a \sum_{q=0}^{Q_{\text{int}}} \sum_{k=0}^{K_{\text{int}}} \sum_{m=0}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n_k(m)+1} P_{n_k(m)}^m(\cos \theta) \cdot {}^q g_{n_k(m)}^m(t) \cos m\lambda + {}^q h_{n_k(m)}^m(t) \sin m\lambda$$

Siendo r la distancia radial, $P_{n_k(m)}^m(\cos \theta)$ las funciones asociadas de Legendre en colatitud y $\cos m\lambda$ y $\sin m\lambda$ las funciones de Fourier en longitud. K_{int} es el grado máximo de la expansión espacial y Q_{int} es el grado máximo del desarrollo temporal. ${}^q g_{n_k(m)}^m(t)$, ${}^q h_{n_k(m)}^m(t)$ son los coeficientes de Gauss (coeficientes SCH).

Las condiciones de contorno en el límite del casquete implica que el índice n no sea entero y pasa a ser real. Como los valores de n dependen de m , se añade un nuevo índice entero, k , que ordena las diferentes raíces de las funciones de Legendre.

La técnica clásica SCHA permite modelar el campo geomagnético en sus tres coordenadas cartesianas. Sin embargo, en el caso de datos arqueomagnéticos, los elementos que definen el campo son en general la declinación e inclinación. Sin valores de intensidad no podemos obtener una visión completa del campo, lo cual impide que podamos aplicar la técnica SCHA.

Nosotros presentamos un modelo parcial del campo, con información direccional del mismo (declinación e inclinación). Para ello, se ha adaptado el algoritmo de la técnica SCHA (Haines, 1988) mediante el método de Bauer (Barracough, 1974), donde se relaciona las tres componentes del campo geomagnético a

través de la declinación e inclinación.

Si se expresan las componentes X, Y y Z del CMT en función de sus expansiones armónicas en un casquete esférico y se divide por el primer coeficiente SCH, g_0 , obtenemos un sistema de ecuaciones que dependen solo de la declinación y la inclinación:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J G_j (\alpha_j \cdot \sin D - \beta_j \cdot \cos D) &= 0 \\ \sum_{j=1}^J G_j (\alpha_j \cdot \sin I - \gamma_j \cdot \cos D \cos I) &= \Omega_0 \cos D \\ \sum_{j=1}^J G_j (\beta_j \cdot \sin I - \gamma_j \cdot \sin D \cos I) &= \Omega_0 \sin D \end{aligned}$$

Donde $\Omega_0 = \gamma_0 \cos I$, $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ incluyen la parte radial, las funciones en colatitud de Legendre y los términos de Fourier de la longitud; G_j representa los coeficientes SCH normalizados respecto al primero, $G_j = g_j / g_0$.

Este nuevo sistema puede ser introducido en la rutina de Haines (1988), siendo los datos de entrada los de declinación e inclinación. Hay que tener en cuenta que las coordenadas y las componentes hay que referirlas al centro del casquete, para ello es necesario pasarlas de geodésicas a geocéntricas y a continuación referirlas al centro del casquete mediante giros horizontales.

Datos de entrada.

Para el modelo inicial arqueomagnético vamos a usar como datos de entrada los proporcionados por las CVPS existentes hasta el momento en Europa en diferentes regiones o países. Éstas curvas dan un valor continuo de la declinación e inclinación en el tiempo, que facilitará la estabilidad de los procesos de inversión de la técnica SCHA-DI. Todas las curvas usadas han sido construidas bajo la aplicación de

la estadística bayesiana (Lanos, 2004).

En la figura 1 se muestran las localizaciones de las cinco curvas usadas. Éstas corresponden a las regiones de Francia, con centro en París (Gallet et al., 2002); Alemania centrada en Göttingen (Schnepf et al., 2005); Hungría centrada en Budapest (Márton and Ferencz, 2006); Iberia centrada en Madrid (Gómez-Paccard et al., 2006) y Reino Unido centrada en Meriden (Zananiri et al., 2006). Para compensar la ausencia de datos en el área del casquete y facilitar la extrapolación del modelo en esas áreas, vamos a usar una serie de curvas de contorno simuladas a través del modelo global CALS3K.2 (Korte and Constable, 2005).

Parámetros del modelo y resultados.

Teniendo en cuenta el error rms (root mean square) y la mínima longitud de onda que pretendemos modelar a través de la técnica SCHA-DI, se ha tomado el tamaño del casquete en $T = 30^\circ$ y un máximo grado de desarrollo de $K_{\text{int}} = 3$. Por otro lado, teniendo en cuenta las CVPS se ha tomado un intervalo de 50 años para muestreárlas. Tras el muestreo de las mismas,

se ha usado la técnica de ventanas móviles para obtener un modelo espacio-temporal del campo geomagnético.

El tamaño de cada ventana ha

inclinación en cualquier punto interno del casquete y en cualquier época, junto con sus errores obtenidos mediante técnicas de propagación de

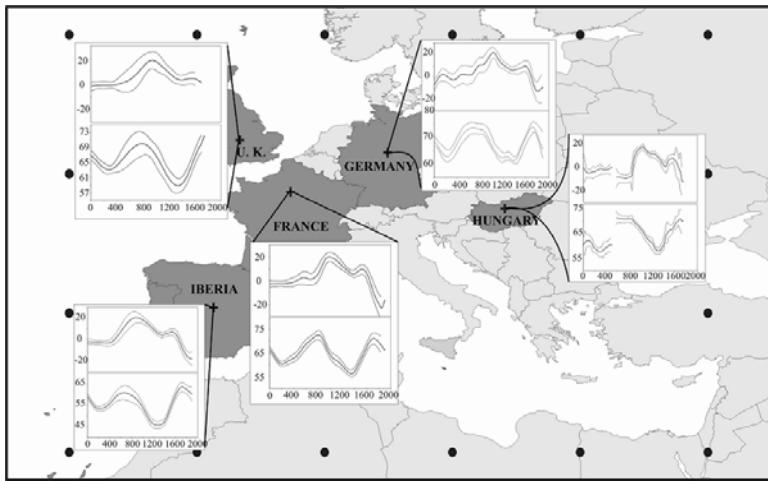


Fig. 1: Mapa de localización de los datos de entrada. Cruces negras: localización de las CVPS de Europa. Círculos negros: datos de contorno del modelo CALS3K.2.

Fig. 1: Map showing locations of input data. Black crossings: location of the European PSVC. Black circles: contour data from CALS3K.2 model.

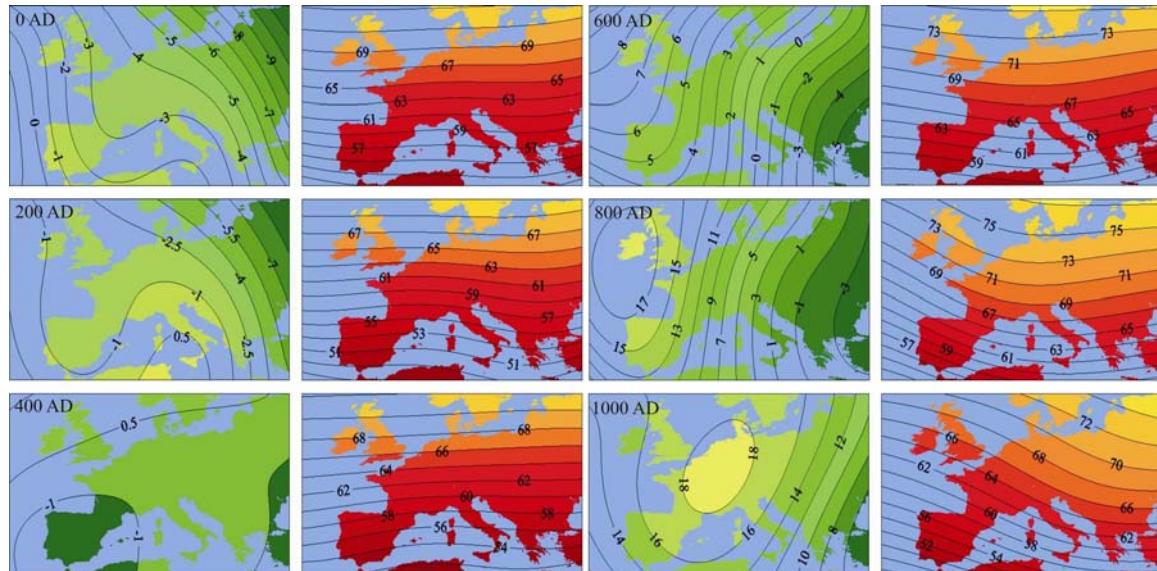
sido de 100 años, mientras que el paso es de 50 años. En cada ventana se ha aplicado la técnica SCHA teniendo en cuenta un comportamiento polinomial temporal de los coeficientes SCH. En total se han generado 39 sets de coeficientes SCH que representan el comportamiento del campo en todo el intervalo temporal del modelo: 0 – 1900 dC.

Una vez generados los coeficientes, podemos obtener el valor de declinación e

errores a partir de los datos por los coeficientes SCH.

El modelo SCHA-DI.00 generado estará disponible en la dirección Web:

<http://www.ucm.es/info/Geofis/>, donde introduciendo unas coordenadas (latitud y longitud) europeas se podrá generar la CVPS correspondiente en todo el período de validez del modelo. En la figura 2 se muestra los valores de declinación e inclinación cada 200 años desde el año 0 hasta el



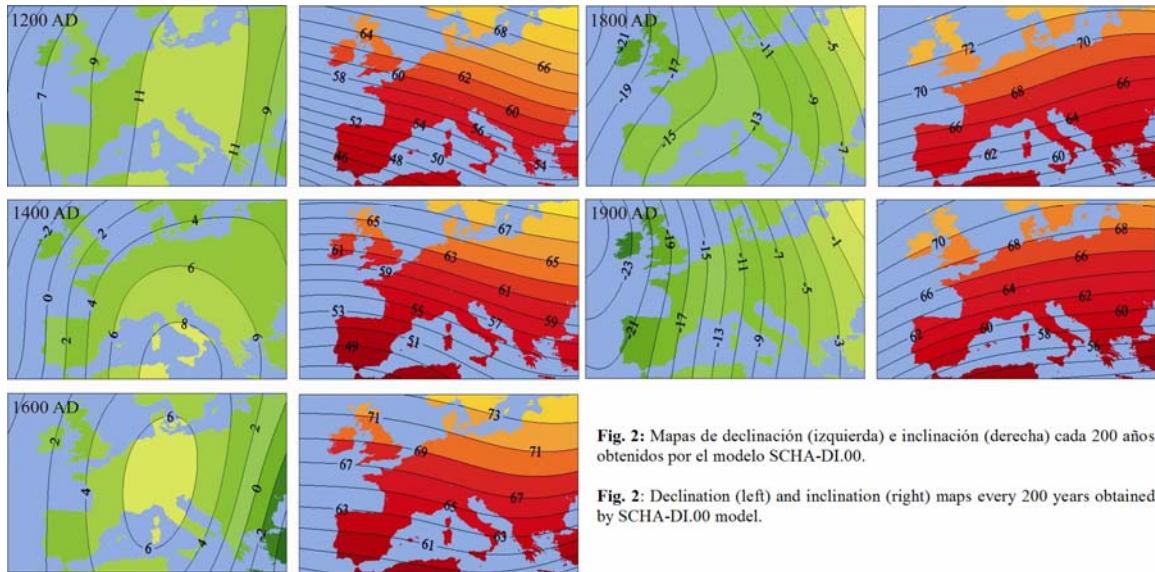


Fig. 2: Mapas de declinación (izquierda) e inclinación (derecha) cada 200 años obtenidos por el modelo SCHA-DI.00.

Fig. 2: Declination (left) and inclination (right) maps every 200 years obtained by SCHA-DI.00 model.

1900 dC. Vemos como Europa se caracteriza por un período de declinación próxima a cero en la época romana (200 – 400 dC.). Un mayor análisis y discusión del modelo resultante SCHA-DI.00 puede consultarse en Pavón-Carrasco et al. (2006).

Conclusiones.

Un primer modelo regional Arqueomagnético para últimos dos mil años en Europa ha sido generado. La técnica usada ha sido la SCHA-DI, una modificación de la técnica regional SCHA para usar sólo datos direccionales. El modelo resultante, SCHA-DI.00, ha sido comparado con los modelos globales de Hongre et al. (1998) y Korte y Constable (2005). El error rms global obtenido ha sido de 2.0° para el modelo SCHA-DI.00 y de 3.1° y 3.2° para los modelos CALS3K.2 y de Hongre et al. (1998) respectivamente.

Referencias.

- Barraclough, D.R., 1974, *Spherical Harmonic analyses of the geomagnetic field for eight epochs between 1600 and 1910*. Geophys. J. Int., 36, 497-513.
 Gallet, Y., A. Genevey, and M. Le Goff, 2002. *Three millennia of directional variations of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archaeological artefacts*. Phys. Earth Planet. Inter., 131, 81-89.
 Gómez-Paccard, M., Ph. Lanos, A. Chauvin, G. McIntosh, M.L. Osete, G. Catanzariti, V.C. Ruiz-Martínez and J.I. Núñez, 2006. *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 (submitted).
 Haines G.V., 1985. *Spherical Cap Harmonic Analysis*. J. Geophys. Res. 90 (B3), 2583-2591.
 Haines, G.V., 1988. *Computer programs for spherical cap harmonic analysis of potential and general fields*. Computers & Geosciences, 14 No.4, 413-447.
 Hongre, L., Hulot, G., Khokhlov, A., 1998. *An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years*. Phys. Earth Planet. Interiors 106, 311–335.
 Jackson, A., Jonkers, A.R.T., Walker, M.R., 2000. *Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358, 957-990.
 Korte, M., and C.G. Constable, 2003. *Continuous global geomagnetic field models for the past 3000 years*. Phys. Earth Planet. Inter., 140, 73–89.
 Korte, M., and C.G. Constable, 2005. *Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K*. Geochem. Geophys. Geosyst., 6, Q02H16, doi:10.1029/2004GC000801.
 Lanos, Ph., 2004, *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, pp. 43-82, Springer-Verlag, London.
 Marton, P. and E. Ferencz, 2006. *Hierarchical versus stratification statistical analysis of archaeomagnetic directions: the secular variation curve for Hungary*. Geophys. J. Int., 164, 484-489.
 Núñez, J.I., 2004. *Estudio arqueomagnético de la Península Ibérica: Primera curva de variación secular de los últimos tres milenios*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
 Ohno, M. and Y. Hamano, 1993. *Spherical harmonic analysis of palaeomagnetic secular variation curves*. Central Core Earth, 3, 205-212.
 Pavón-Carrasco, F.J., M.L. Osete, J.M. Torta, L.R. Gaya-Piqué and Ph. Lanos 2006, *Initial SCHA-DI.00 regional archaeomagnetic model for Europe for the last 2000 years*. Phys. And Chem. Of the Earth (enviado).
 Schnepp, E. and Ph. Lanos, 2005. *Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years*. Geophys. J. Int., 163, 479-490.
 Torta, J.M., L.R. Gaya-Piqué, A. De Santis, 2006. *Spherical Cap Harmonic Analysis of the Geomagnetic Field with Application for Aeronaautical Mapping*, in Rasson, J.L. and Delipetrov, T., eds., *Geomagnetics for aeronaautical safety: a case study in and around the Balkans*. NATO Science series publication (in press).
 Zananiri, I., Batt, C.M., Lanos, Ph., Tarling, D.H. and Linford, P., 2006. *Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating*. Phys. Earth Planet. Inter. (submitted).

A preliminary compilation of the Pyrenean Paleomagnetic Database

Pueyo, E. L.(1,2); López, M. A.(2); Oliva, B.(2,3); Sussman, A. J.(4); Larrasoña, J. C.(2,5); Dinarés, J.(6); Beamud, B.(5); Soto, R.(2,7); Garcés, M.(5); Gil-Peña, I.(1); Rodríguez, A.(2); Almar, Y.(5); Fernández, O.(8); Villalaín, J. J.(7); Calvo, M.(7); Bógallo, M. F.(7); Costa, E.(5); Mochales, T.(1, 2); Vidal, O.(5); Pueyo-Anchuela, O.(2); Román, M. T (2); Gil-Imaz, A.(2); Navas, J.(1) and the *GeoKin3DPyr group from the INTERREG IIIb Pyrenean Network*, (1,2,5,10,11,12).

(1) Instituto Geológico y Minero de España (unaim@igme.es). IGME. (2) Geodinámica Interna. Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Spain. UZ. (3) Pastel group. Dpt. of Geological Sciences, University of Michigan, USA. UM. (4) Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA. LANL. (5) Laboratori de Paleomagnetisme. Universitat de Barcelona-CSIC, Spain. UB. (6) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Roma, Italy. (7) Lab. de paleomagnetismo. Dpto. de Física. Universidad de Burgos, Spain. UBU. (8) Structural Geology. Midland Valley Exploration Ltd. Glasgow, Scotland. MV. (10) Departamento de Geodinámica, Euskalherriko Unibertsitatea, Spain. EHU. (11) Lab. des Mécanismes de Transfert en Géologie, Univ. Paul-Sabatier, Toulouse, France. UPS. (12) Imagerie géophysique. Université de Pau et des pays de l'Adour, France. UP

Key words: Paleomagnetism, Pyrenees, database.

The database

The Pyrenees are the collision chain formed during Upper Cretaceous and Miocene times due to the convergence between the Iberian and Eurasian plates. The Pyrenees have undergone very complex and diachronic evolution partially caused by the inversion of the confined Lower Cretaceous basins, the lateral changes in the facies distribution including the detachment levels (with important mechanical implications) and the proper evolution of its foreland basins (state of the art can be found in recent overviews; Capote et al., 2002; Barnolas and Pujalte, 2004 and references therein). Within this frame paleomagnetic researches were conducted in the Pyrenees, with different purposes, from the beginning of the application of these techniques. Starting with the pioneer works of Van der Lingen (1960) and Schwarz (1962) from the 'Fort Hoofddijk' paleomagnetic laboratory (Universiteit Utrecht) in the western Aragonian valleys (Canfranc and Hecho respecti vely) and continuing during the next five decades, the Pyrenean chain concentrates abundant paleomagnetic studies. At the moment the research interest is still growing as regards of the

increasing number of ongoing projects and the subsequent publication of many peer reviewed papers (Fig. 1). The high density of information is due to many reasons including the availability of synorogenic materials (allowing an accurate dating of deformation), the excellent outcrop conditions (including stratigraphic sequences with global interest), the existence of well exposed zones of lateral transference of deformation, etc. This enviable frame has produced one of the denser and more homogeneous nets of paleomagnetic sites when compared with any other orogenic area.

Twenty five paleomagnetic research groups and laboratories from different institutions, including the universities of Arizona (USA), Barcelona (Spain), Autónoma de Barcelona (Spain), Bergen (Norway), Burgos (Spain), Leeds (UK), Leigh (USA), Michigan (USA), München (Germany), Newcastle upon Tyne (UK), Oxford (UK), País Vasco (Spain), Princeton (USA), Rennes (France), Southern California (USA), Strasbourg (France), Utrecht (Nether lands), Zaragoza (Spain), Zürich (Switzerland), and the Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC), Instituto Geológico y Minero de

España (Spain), the Istituto Nazionale di Geofisica (Italy), the Institut de Physique du Globe de Paris (France), Los Alamos National Laboratory (USA) and the Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetnek (Hungary), involving more than 50 paleomagnetists have demagnetized more than 17000 individual samples (about 1450 points including almost 50 kilometers of magnetostratigraphic profiles) during the development of 28 PhDs (7 of them in progress) and other research projects comprising a total of more than seventy peer review papers.

At present most Pyrenean structural units comprise (or are underway) a detailed control on their out-of-plane motions (i.e. vertical axis rotations; VAR) related with complex processes of lateral transference of deformation. These processes are a matter of active and multidisciplinary research in other orogenic areas around the world, but in the Pyrenees are especially well represented. The combination of abundant and homogeneous paleomagnetic datasets together with the structural knowledge and the exhaustive chronological frame, mostly based on

magnetostratigraphic profiles that have allowed the dating of deformation processes (including the VARs), convert this chain in a enviable location to achieve accurate 4D reconstructions and to understand orogenic processes difficult to attain in other areas. Among other important implications, this frame will make possible, in the near future, the successful application of real 3D restoration methods using the paleomagnetic database as primary information, since the already developed methods do not consider seriously this important data input.

Present weakness and future work.

A major problem in the development of the database is the fulfillment of all data fields; this is partially due to the lack of complete standard information in some publications. Among other subjects, the accurate location and geographic coordinates are key to correctly locate the paleomagnetic information, since this information is usually not published, a great effort is been doing using available published geological maps in combination with satellite interfaces (i.e. SIGPAC). Bedding attitudes are also key variable to perform re interpretation of data (e.g. integrative fold test), part of them can be deduced from published tables, but this is not

always possible since information is not always properly reported. Structural information (i.e. fold axis orientation) is key to appropriately restore paleomagnetic data in complex frames, to fulfill this information additional fieldwork have to done to obtain this key data. Rotation ages are very difficult to precise and are probably one of the worst data fields in the database. Rock magnetism information is also lacking in the majority of data (at least systematically described). This information, especially the magnitudes of the natural remanent magnetization and susceptibility, is invaluable to model magnetic anomalies since represents the two main variables to interpret geomagnetic measurements. Future studies are encouraged to include these data in order to be implemented in the database. Besides a big effort is going to be done with previous data to include this information in the SIGEOF (IGME). This future compilation (by lithology or stratigraphic age) will be useful in future investigations to select or to reject new paleomagnetic targets. In this way the inclusion of the AMS locations can be very practical to reuse already sampled rocks since AMS studies to achieve deformation patterns have also been very abundant in the Pyrenees, both in sedimentary and igneous rocks.

Future investigations include:
 1) The attaining of pilot studies in areas completely unexplored (e.g. North Pyrenean zone, eastern Internal Sierras). 2) The development of an on line interface on the web allowing the completion and inclusion of new information. This public access domain could include additional information like, maps, references, papers, etc...
 3) A structural overview. This synthesis should try to bring into line the structural and paleomagnetic data, partially due to the publication of paleomagnetic data in very specialized journals, which make them to remain ignored by geologists.
 4) The development (or at least the application) of a truly 3D restoration method that uses the paleomagnetic data as a primary input together to bedding attitudes. This couple of variables represent a real 3D element with references in both, the deformed and undeformed states, and would substantially reduce the number of possible solutions proposed by the existent algorithms. Some Pyrenean regions, as previously stated, satisfactorily fulfilled the needed information; high density of data, magnetochronologic control on sedimentary and deformation processes, many rotation magnitudes including in a few cases the rotation age.

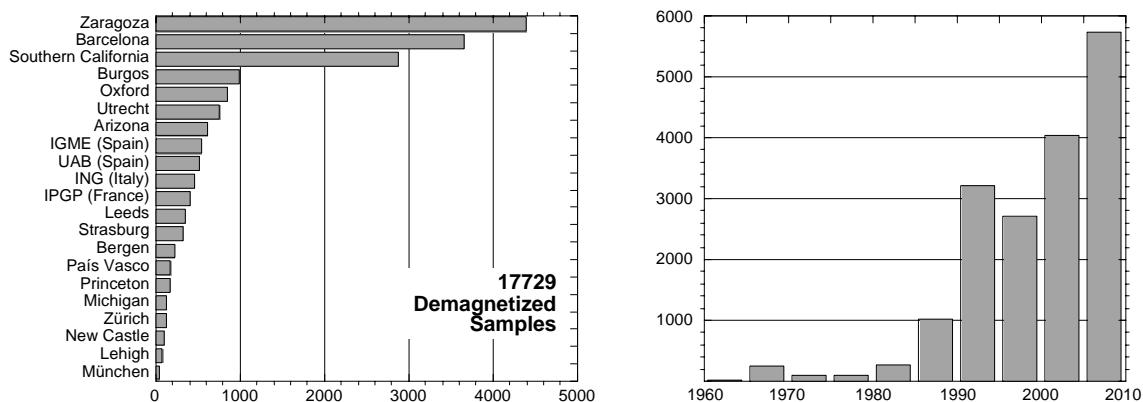


Figure 1: Demagnetized samples per university or research group (left) and number of demagnetized samples per year (right). Ongoing projects have been partially considered.

Acknowledgements: The INTERREG III program managed by the Pyrenean Network Community founds the Geokin3DPyr group activities (<http://wzar.unizar.es/acad/pirineo3D/unizar.htm>) and the development of electronic databases. E. L. Pueyo thanks a for "Ramón y Cajal" research contract (MEC). Additional financial support came from projects Pmag3Drest (CGL 2006 2289 BTE MEC) and the ChronoPyr (2006 2009 IGME).

References

- Almar, Y., 2006. Ongoing PhD Thesis Universitat de Barcelona.
- Baceta, J. I.; Pujalte, V.; Dinarès-Turell, J.; Payros, A.; Orue-Etxebarria, X.; Bernaola, G., 2000. The Paleocene/Eocene boundary interval in the Zumaia section (Gipuzkoa, Basque basin): Magnetostratigraphy and high-resolution lithostratigraphy. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, Vol. 130 Núm. 2, pg - 375-391
- Barnolas, A.; Pujalte, V. (eds.), 2004. Capítulo III: La Cordillera Pirenaica. In: *Geología de España*; Vera, J. A. (main editor). Sociedad Geológica de España - Instituto Geológico y Minero de España - Madrid (ISBN 84-7840-546-1), 231-343.
- Bates, M.P., 1987. *Palaeomagnetic studies of fold and thrust geometry in the Southern Pyrenees*. Unpub. PhD Thesis. Univ. Leeds, 474 pp.
- Bates, M.P., 1989. Palaeomagnetic evidence for rotations and deformation in the Noguera Zone, central southern Pyrenees, Spain. *J. Geol. Soc. London* 146, 459-476.
- Beamud, B., 2006. Ongoing PhD Thesis Universitat de Barcelona.
- Beamud, B.; Garcés, M.; Cabrera, Ll.; Muñoz, J. A.; Almar, Y., 2003. A new middle to late Eocene continental chronostratigraphy from NE Spain. *Earth and Planetary Science Letters* 216, 501-514.
- Beamud, E.; Garcés, M.; Muñoz, J. A.; Cabrera, Ll.; Almar, Y., 2004. Distribución de las rotaciones paleomagnéticas en la cuenca de Graus-Tremp durante el Terciario. *Geotemas* 6 (4); 283-286.
- Bentham, P. and Burbank, D.W., 1996. Chronology of Eocene foreland basin evolution along the western oblique margin of the South-Central Pyrenees. In: *Tertiary basins of Spain*. Edit: Friend, P.F., Dabrio, C.J. Cambridge Univ. Press, pp. 144-152.
- Bentham, P.; Burbank, D.W.; Puigdefábregas, C., 1992. Temporal and spatial controls on the alluvial architecture of an axial drainage system: Late Eocene Escanilla Formation, southern Pyrenean foreland basin, Spain. *Basin Research*, 4, 335-352.
- Bentham, P.A., 1992. *The tectono-stratigraphic development of the western oblique ramp of the south-central Pyrenean thrust system, Northern Spain*. Ph.D. University of Southern California. 253pp.
- Burbank, D.W.; Vergés, J.; Muñoz, J.A. and Bentham, P., 1992a. Coeval hindward- and forward-imbricating thrusting in the South-Central Pyrenees, Spain: Timing and rates of shortening and deposition. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 3-17
- Burbank, D. W.; Puigdefabregas, C.; Muñoz, J. A., 1992b. The chronology of the Eocene tectonic and stratigraphic development of the eastern Pyrenean foreland basin, Northeast Spain. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 9, Pages 1101-1120.
- Burbank, D.W.; Vergés, J., 1994. Reconstruction of topography and related depositional systems during active thrusting. *J. Geophys. Res.*, 99, 20281-20297.
- Calvo-Rathert, M.; Cuevas J.; Tubía J. M.; Bóbalo, M. F.; Goguitchaichvili, A., 2006 (accepted). A palaeomagnetic study of the Basque Arc (Northern Spain). *International Journal of Earth Sciences*.
- Capote, R.; Muñoz, J.A.; Simón, J.L.; Liesa, C.L.; Arlegui, L.E. 2002. Alpine tectonics I: The Alpine system north of the Betic Cordillera. In: *Geology of Spain*. Eds: Gibbons, W.; Moreno, T. Geol. Soc. London: 367-400.
- Casas, A. M.; Oliva, B.; Román-Berdiel, M. T.; Pueyo, E. L., 2003. Basement deformation: tertiary folding and fracturing of the Variscan Bielsa granite (Axial zone, central Pyrenees). *Geodinamica Acta* 16 (2003) 99-117.
- Cogné, J. P., 1987. *Contribution à l'étude paléomagnétique des roches déformées. Mémoires de Documents du Centre Armorican d'étude structurale des socles – Géosciences Rennes, CAESS, 17. 204 p. (PhD Université Rennes I). ISSN 0755-978X-17*
- Cogné, J. P., 1987. Paleomagnetic direction obtained by strain removal in the Pyrenean Permian redbeds at the "Col du Somport" (France). *Earth and Planetary Science Letters*, vol.85, no.1-3, pp.162-172.
- Cogné, J. P.; Gapais, D., 1986. Passive rotation of hematite during deformation; a comparison of simulated and natural redbeds fabrics. *Tectonophysics*, 121; 2-4, Pages 365-372.
- Costa, E., 2006. Ongoing PhD Thesis Universitat. de Barcelona.
- Dinarès, J., 1992. *Paleomagnetisme a les Unitats Sudpirinenques Superiors. Implicacions estructurals*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 462 pp.
- Dinarès, J.; McClelland, E. and Santanach, P., 1992. Contrasting rotations within thrust sheets and kinematics of thrust tectonics as derived from palaeomagnetic data: an example from the Southern Pyrenees. In: K.R. McClay (ed.), *Thrust tectonics*, pp. 265-276, Chapman and Hall Eds., London, 447 pp.
- Dinarès-Turell, J. & Garcia-Senz, J., 2000. Remagnetization of Lower Cretaceous limestones from the southern Pyrenees and relation to the Iberian Plate geodynamic evolution. *Journal of Geophysical Research*, B, Solid Earth and Planets. 105; 8, Pages 19,405-19,418.
- Dinarès-Turell, J.; Baceta, J. I.; Pujalte, V.; Orue-Etxebarria, X.; Bernaola, G., 2002. Magnetostratigraphic and cyclostratigraphic calibration of a prospective Paleocene/ Eocene stratotype at Zumaia (Basque Basin, northern Spain). *Terra Nova*, 14; 5, Pages 371-378.
- Dinarès-Turell, J.; Baceta, J. I.; Pujalte, V.; Orue-Etxebarria, X.; Bernaola, G.; Lorito, S., 2003. Untangling the Paleocene climatic rhythm: an astronomically calibrated Early Palaeocene magnetostratigraphy and biostratigraphy at Zumaia (Basque basin, northern Spain). *Earth and Planetary Science Letters* 216, 483-500.
- Dinarès-Turell, J.; McClelland, E., 1991. A cautionary tale for palaeomagnetists: a spurious apparent single component remanence due to overlap of blocking-temperature spectra of two components. *Geophysical Research Letters*, 18; 7, Pages 1297-1300.
- Fernández, Bellón, O. 2004. *Reconstruction of geological structures in 3D. An example from the Southern Pyrenees*. PhD. Universitat de Barcelona, 321pp.
- Garcés, M.; Oliva, B., 2006 (in prep). Magnetostratigraphic correlation between the Jaca piggy-back and the Ebro foreland basins across the External Sierras western termination.
- Garcés, M.; García-Senz, J.A. Muñoz, and E. Beamud, 2006 (in prep). Shallow and deep burial remagnetizations in the Cotiella Massif (late Cretaceous, South Central Pyrenees): insights from rock magnetic properties.
- Gil-Peña, I.; Oliva, B.; Pueyo, E. L.; Barnolas, A., 2006 (in press). Remagnetización Stefaniente-Pérnica del Ordovícico de la Zona Axial meridional del Pirineo Central; implicaciones paleogeográficas y tectónicas posthercáticas. *Resúmenes de MAGIBER IV-Paleomagnetismo en España y Portugal* (Vigo).
- Girdler, R. W., 1965. Continental drift and the rotation of Spain. *Nature*, 207: 395-397.
- Girdler, R. W., 1968. A palaeomagnetic investigation of some Late Triassic and Early Jurassic volcanics rocks from the Northern Pyrenees. *Annales de Geophysique*, 24 (2), 1-14.
- Gong, Z. , 2006. Ongoing PhD Thesis University of Utrecht
- Hogan, P.J. 1993. *Georchronologic, tectonic and stratigraphic evolution of the Southwest Pyrenean foreland basin, Northern Spain*. Unpublished PhD thesis, University of Southern California. 219 pp.
- Hogan, P.J. and Burbank D.W., 1996. Evolution of the Jaca piggyback basin and emergence of the External Sierra, southern Pyrenees. In: *Tertiary basins of Spain*. Edit: Friend, P.F., Dabrio, C.J. Cambridge Univ. Press. Pp 153-160.
- Holl, J. E., 1994. *Foreland deformation processes, southern Pyrenees, Spain*. PhD Thesis. Lehigh University. Bethlehem, PA, United States. Pages: 96. 1994.
- Holl, J. E.; Anastasio, D. J., 1993. Paleomagnetically derived folding rates, southern Pyrenees, Spain. *Geology* (Boulder). 21, 3, Pages 271-274.
- Keller, P., 1992. *Paläomagnetische und strukturengeschichtliche Untersuchungen als Beitrag zur Tektonogenese der SE-Pyrenäen*. Ph Thesis ETH-Zürich 122 pp.
- Keller, P.; Gehring, A. U., 1992. Different weathering stages indicated by the magnetization of limestones; an example from the Southeast Pyrenees, Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 111; 1, Pages 49-57.
- Keller, P.; Gehring, A. U., 1996. Consequences of post-collisional deformation on the reconstruction of the East Pyrenees. In: *Palaeomagnetism and Tectonics of the Mediterranean Region* (Eds: Morris, A. & Tarling, D. H.). *Geological Society Special Publication* No 105, 101-109.
- Keller, P.; Lowrie,W.; Gehring, A. U., 1994. Palaeomagnetic evidence for post-thrusting tectonic rotation in the Southeast Pyrenees, Spain. *Tectonophysics*, 239; 1-4, Pages 29-42.
- Larrañaga, J. C., 2000. *Estudio magnetotectónico de la zona de transición entre el Pirineo central y occidental; implicaciones estructurales y geodinámicas*. Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, 287 pp.
- Larrañaga, J. C.; Parés, J.C.; del Valle, J.; Millán, H., 2003a. Triassic paleomagnetism from the Western Pyrenees revisited: implications for the Iberian-Eurasian Mesozoic plate boundary. In: *Paleomagnetism applied to tectonics*; a tribute to Rob Van der Voo. Edited by Mac Niocaill, C.; Torsvik, T. H.; van der Pluijm, B. A. *Tectonophysics*, 362 (1-4), 161-182.
- Larrañaga, J. C.; Parés, J. M.; Millán, H., del Valle, J. & Pueyo, E. L. 2003b. Paleomagnetic, structural, and stratigraphic constraints on transverse fault kinematics during basin inversion: the Pamplona fault (Pyrenees, north Spain). *Tectonics*, 22 (6) 1071.
- Larrañaga, J. C.; Parés, J.C.; Pueyo, E. L., 2003c. Stable Eocene magnetization carried by magnetite and magnetic iron sulphides in marine marls (Pamplona-Arguis Formation, southern Pyrenees, N Spain). *Studia Geophysica Geodetica*, 47, 237-254.
- Larrañaga, J. C.; Pueyo, E. L.; Parés, J. M., 2004. An integrated AMS, structural, palaeo- and rock-magnetic study of the Eocene marine marls from the Jaca-Pamplona basin (Pyrenees, N Spain); new insights into the timing of magnetic fabric acquisition in weakly deformed mudrocks. In: *Magnetic fabrics: Methods and applications* (Eds: Martín-Hernández, F.; Hirt, A.). *Geological Society of London Special Publication* 238, 127 - 144.
- Larrañaga, J. C.; Murelaga, X.; Garcés, M., 2006a (in press). Magnetobiochronology of Lower Miocene (Ramblian) continental sediments from the Tudela Formation (western Ebro basin, Spain). *Earth and Planetary Science Letters* xx, xxx-xxx.
- Larrañaga, J. C.; Arz, J. A.; Arenillas, J. I.; Molina, E., 2006b (in prep). Paleocene magnetostratigraphy in the Zumaia section (western Pyrenees).
- López, M. A., 2006. Ongoing Ms Thesis *Universidad de Zaragoza*
- López-Martínez, N., Dinarès-Turrell J., Elez-Villar J., 2006 (in prep). Chronostratigraphy of the continental paleocene series from the South Central Pyrenees (Spain): New magnetostratigraphic constraints.
- Mannot, P. F., 1965. Paleomagnetism of the Garralda section. Report number 110. Geol. Inst. Utrecht State University.
- Mary, C.; Moreau, M. G.; Orue-Etxebarria, X.; Apellaniz, E.; Courtoillet, V., 1991. Biostratigraphy and magnetostratigraphy of the Cretaceous/Tertiary Sopelana section (Basque country). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 106, 133-150.
- McCaig, A. M. y McClelland, E., 1992. Palaeomagnetic techniques applied to thrust belts. In: *Thrust Tectonics*. (Ed. by K.R. McClay), pp. 209-216, Chapman y Hall Eds., London. 447 pp.
- McClelland, E. A.; McCaig-M 1989. Paleomagnetic estimates of rotations in compressional regimes and potential discrimination between thin-skinned and deep crustal deformation. In: *Paleomagnetic rotations and continental deformation* (Eds: Kissel, C.; Laj, C.) *NATO ASI Series C*, 254, 365-379.
- McClelland, E. A.; McCaig-M., 1989. Palaeomagnetic estimates of total rotation in basement thrust sheets, Axial Zone, southern Pyrenees. *Cuadernos de Geología Ibérica*. 12; Pages 181-193.
- Meigs, A. J., 1995. *Thrust faults, thrust sheets, and thrust-belts; new insights from the Spanish Pyrenees*. PhD Thesis University of Southern California. Los Angeles, CA, United States: 275pp.
- Meigs, A. J. and Burbank, D.W., 1997. Growth of the South Pyrenean orogenic wedge. *Tectonics*, 16, 239-258.

- Meigs, A. J., Vergés, J., Burbank, D.W., 1996. Ten-million-year history of a thrust sheet. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 108, 12, 1608-1625 pp.
- Mochales, T., 2006. *Ongoing PhD Thesis Universidad de Zaragoza*
- Moreau, M. G., 1986. Paléomagnétisme en zônes orogéniques, problèmes des réalignements, applications du paléomagnétisme à la volcanologie et à la biochronologie PhD thesis Institut Physique du Globe de Paris, 157 pp.
- Moreau, M. G.; Cojan, I.; Ory, J., 1994. Mechanisms of remanent magnetization acquisition in marl and limestone alternations; case study, Upper Cretaceous (Chron 31-30), Sopelana, Basque country. *Earth and Planetary Science Letters*. 123; 1-4, Pages 15-37.
- Oliva, B., 2003. Discontinuous deformation as a mechanism of remagnetization of limestones in the Internal Sierras (Southern Pyrenees, Spain). *IRM Quaterly*, 13 (1), 2-3.
- Oliva, B., 2004. *Geometría y cinemática rotacional en las Sierras Interiores y Zona Axial (sector de Bielsa) a partir del análisis estructural y paleomagnético*. Unpublished PhD University of Zaragoza, 290 pp.
- Oliva, B.; Pueyo, E. L., 2006a (accepted). Basement kinematic constrains from paleomagnetic data of remagnetized cover rocks (Internal Sierras, Southwestern Pyrenees). *Tectonics*.
- Oliva, B.; Pueyo, E. L., 2006b (in prep). New paleomagnetic data in the North Pyrenean zone (Aspe); structural and geodynamic implications.
- Oliva, B.; Pueyo, E. L.; Casas, A. M.; Román, M. T., 2006a (in prep). Paleomagnetic data from Perm-Triassic red beds in the central-western Pyrenees: kinematic constrains of the Iberian-Europe plate boundary and the extension of the Tertiary remagnetization. *Tectonophysics*.
- Oliva, B.; Pueyo, E. L.; Larrasaña, J. C., 2006b (in review) Magnetic re-equilibrium induced by pressure-solution; a potential orogenic-scale remagnetization mechanism. *Geology*.
- Oliva, B.; Pueyo, E. L.; Larrasaña, J. C.; Mata, M. P.; Gil-Imaz, A., 2006c (in prep). Remagnetization induced by pressure-solution reorganization and subsequent chemical changes in cleavage domains.
- Oms, O.; Dinarès-Turell, J.; Remacha, E., 2003. Magnetic stratigraphy from deep clastic turbidites: an example from the Eocene Hecho group (southern Pyrenees). *Studia Geophysica Geodetica*, 47, 275-288.
- Oms, O.; Babault, J.; Dinarès-Turell, J.; Rouby, D.; Remacha, E.; Eichenseer, H.; Urreiztieta, M.; Nalpas, T., 2006a. Validación de modelos geológicos y magnetotectónicos. Ejemplo en la Cuenca Surpirenaica Central. *MAGIBER I: Paleomagnetismo en la Península Ibérica*. Editores: M. Calvo, M. Garcés, C. Gomes, J.C. Larrasaña, E. Pueyo y J.J. Villalain. Universidad de Burgos, 41-44.
- Oms, O.; Dinarès-Turell, J.; Vicens, E.; Estrada, R.; Vila, B.; Galobert, A.; Bravo, A., 2006 (in prep). The Continental Cretaceous-Paleogene transition in the Vallespir syncline (Southeastern Pyrenees, Spain).
- Orue-Etxebarria, X.; Payros, A.; Apellaniz, E.; Bernaola, G.; Caballero, F.; Dinarès-Turell, J.; Tosquella, J., 2006 (in prep). A new high-resolution planktonic foraminifer biostratigraphic scale for the Ypresian/Lutetian transition at the Gorrondate beach section (Basque Country, W. Pyrenees).
- Parés, J. M. & Dinarès-Turell, J., 1993. Magnetic fabric in two sedimentary rock types from the Southern Pyrenees. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 193-205.
- Pares, J. M.; Kodama, K. P.; Anastasio, D. J.; Newton, M. L., 2006 (in prep). Magnetic Reversal Stratigraphy of Eocene Growth Strata, South Pyrenean Fold-and-Thrust Belt.
- Pascual, O., 1992. *Magnetoestratigrafía del estratotípico y paraestratotípico del Ilerdense, secciones de Tremp y Campo (Cuenca de Tremp-Graus)*. Unpublished PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Pascual, O.; Parés, J. M.; Langereis, C. G.; Zijderveld, J. D. A., 1992a. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Ilerdense stratotype at Tremp, Spain. *Phys. Earth Plan. Int.*, 74, 139-157.
- Pascual, J. O.; Pares, J. M.; Garcés, M., 1992b. Magnetoestratigrafía y bioestratigrafía del Eoceno inferior; sección de Campo (provincia de Huesca). In: Actas del Congreso Latinoamericano de Geología. 8; Pages 164-169.
- Pueyo Anchuela, O., 2006. *Ongoing PhD Thesis Universidad de Zaragoza*
- Pueyo, E. L., 2000. Rotaciones paleomagnéticas en sistemas de pliegues y cabalgamientos. Tipos, causas, significado y aplicaciones (ejemplos del Pirineo Aragonés). *Unpublished PhD thesis, Universidad de Zaragoza*. 296 pp.
- Pueyo, E. L.; H. Millán; A. Pocoví and J. M. Parés, 1997 (1999). Cinemática rotacional del cabalgamiento basal surpirenaico en las Sierras Exteriores Aragonesas: Datos magnetotectónicos. *Acta Geológica Hispánica*, 32 (3-4), 119-138.
- Pueyo, E. L.; Millán, H.; Pocoví, A., 2002. Rotation velocity of a thrust: a paleomagnetic study in the External Sierras (Southern Pyrenees). In: Growth strata. Marzo, M.; Muñoz, J. A. and Vergés, J. (Eds.), *Sedimentary Geology*, 146, 191 -208.
- Pueyo, E. L.; Parés, J.M.; Millán, H.; Pocoví, A., 2003a. Conical folds and apparent rotations in paleomagnetism (A case studied in the Southern Pyrenees). In: *Paleomagnetism applied to tectonics; a tribute to Rob Van der Voo*. Edited by: Mac Niocaill, C.; Torsvick, T. H.; van der Pluijm, B. A. *Tectonophysics*, 362 (1-4), 345-366.
- Pueyo, E. L.; Pocoví, A.; Parés, J.M.; Millán, H.; Larrasaña, J. C., 2003b. Thrust ramp geometry and spurious rotations of paleomagnetic vectors. *Studia Geophysica Geodetica*, 47, 331-357.
- Pueyo, E. L.; Pocoví, A.; Millán, H.; Sussman, 2004. Map-view models for correcting and calculating shortening estimates in rotated thrust fronts using paleomagnetic data. In: *Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses* (Eds: A. J. Sussman & A. B. Weil). *Geological Society of America Special Publication* 383, 57-71.
- Pueyo, E. L.; Pocoví, A.; Larrasaña, J. C.; Soto, R.; Oliva, B.; Millán, H.; Parés, J. M.; Casas, A. M., 2006 (in prep). Lateral transference of deformation, gradient of shortening and clockwise rotation in the External Sierras front (south-western Pyrenees). *Journal of Geology*.
- Pujalte, V.; Baceta, J. I.; Dinarès, J.; Orue-Etxebarria, X.; Pares, J. M.; Payros, A., 1995. Biostratigraphic and magnetostratigraphic intercalibration of latest Cretaceous and Paleocene depositional sequences from the deep-water Basque Basin, western Pyrenees, Spain. *Earth and Planetary Science Letters*. 136; 1-2, Pages 17-30.
- Rodríguez, A., 2006. *Ongoing PhD Thesis Universidad de Zaragoza*
- Rodríguez, A.; Pueyo, E. L.; Pocoví, A.; Barnolas, A.; Samsó, J. M.; Gil-Peña, I., 2006. Magnetoestratigrafía preliminar de las serie Cuisiense-Luteciense de la Cuenca Surpirenaica Occidental (anticlinal del Balces, Sierras Exteriores). Resúmenes de MAGIBER IV-Paleomagnetismo en España y Portugal (Vigo).
- Roggenthien, W. M., 1976. Magnetic stratigraphy of the Paleocene; a comparison between Spain and Italy. In: *Paleomagnetic stratigraphy of pelagic carbonate sediments*. Pialli, G. (editor). *Memorie della Società Geologica Italiana*. 15; Pages 73-82. 1976.
- Roggenthien, W. M., 1980. *Paleomagnetism of Late Cretaceous-early Tertiary European pelagic limestones*. PhD Thesis Princeton University. Princeton, NJ, United States. Pages: 98.
- Schott, J. J., Peres, A., 1987a. Paleomagnetism of the lower Cretaceous redbeds from northern Spain: evidence for a multistage c acquisition of magnetisation. *Tectonophysics* 139, 239- 253.
- Schott, J. J., Peres, A., 1987b. Paleomagnetism of Permo-Triassic Redbeds from the Asturias and Cantabrian Chain (northern Spain): evidence for strong lower Tertiary remagnetizations. *Tectonophysics*, 140, 179-191.
- Schott, J. J., Peres, A., 1988. Paleomagnetism of Permo-Triassic red beds in the western Pyrenees: evidence for strong clockwise rotations of the paleozoic units. *Tectonophysics* 156, 75- 88.
- Schott, J.L., 1985. *Paléomagnétisme des séries rouges du Permien, du Trias, et du Crétacé inférieur dans les chaînes Pyrénéo-cantabriques et NW-ibérique. Implications géodynamiques*. Thèse, Université de Strasbourg, 382p.
- Schwarz, E. J., 1962. *Geology and paleomagnetism of the valley of the Rio Aragón Subordan north and east of Oza*. (PhD Thesis, University of Utrecht) *Estudios Geológicos*, 18, 193-240.
- Schwarz, E. J., 1963. A paleomagnetic investigation of Permo-triassic redbeds and andesites from the Spanish Pyrenees. *Journal of Geophysical Research*, 68, 3265-3271.
- Schwarz, E. J., 1965. On the paleomagnetic results derived from European rocks of Permian age. *Journal of Geophysical Research*. 70; 12, Pages 2938-2939.
- Serra-Kiel, J.; Canudo, J. I.; Dinarès, J.; Molina, E.; Ortiz, N.; Pascual, J. O.; Samsó, J.M.; Tosquella, J., 1994. Cronoestratigrafía de los sedimentos marinos del Terciario inferior de la Cuenca de Graus-Tremp (Zona Central Surpirenaica). Revista de la Sociedad Geológica de España, 7, 273-297.
- Soto, R.; Casas, A.M.; Pueyo, E. L., 2006a (in press). Along-strike variation of orogenic wedges associated with vertical axis rotations. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*.
- Soto, R.; Villalain, J. J.; Casas, A. M., 2006b (in prep). Syn-extensional Remagnetization as a Tool to Analyse the Mesozoic Extensional Geometry in the Western Sector of the Basque-Cantabrian Basin (Northern Spain).
- Soto, R.; Casas, A. M., 2006c (in prep). Paleomagnetic rotations in the Cotiella-Bóixols nappe (South Central Pyrenees).
- Stauffer, K. W.; Tarling, D. H., 1971. Age of the Bay of Biscay: new paleomagnetic evidence. In: *L'histoire structurale du Golfe de Gascogne*. Ed. Technip, Paris, vol11 (2), 1-18.
- Storetvedt, K. M.; Marton, E.; Abranches, M. C.; Rother, K., 1999. Alpine remagnetization and tectonic rotations in the French Pyrenees. *Geologische Rundschau*. 87; 4, Pages 658-674.
- Sussman, A. J., 2003. *Thrust belt curvature: Structural and paleomagnetic analyses in the Catalunya Pyrenees and Sevier orogen, unpublished Ph.D. Dissertation*, The University of Arizona, 175 pp.
- Sussman, A. J. ; Butler, R. F.; Dinarès-Turell, J.; Vergés, J., 2003. Vertical axis rotation of a foreland fold and implications for the orogenic curvature: an example from the Southern Pyrenees, Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 1-15.
- Sussman, A. J.; Chase, C. G.; Pueyo, E. L.; Weil, A. J., 2006 (accepted). The impact of vertical-axis rotations on shortening estimates. *Journal of Structural Geology*.
- Taberner, C.; Dinarès-Turell, J.; Giménez, J. and Docherty, C., 1999. Basin infill architecture and evolution from magnetostratigraphic cross-basin correlations in the southeastern Pyrenean foreland basin. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 118, 8, 1155-1174.
- Tait, J. A.; Bachadse, V.; Dinarès-Turell, J., 2000. Paleomagnetism of Siluro-Devonian sequences, NE Spain. *Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets*. 105; 10, Pages 23,595-23,603. 2000.
- Thibal, J.; Etchecopar, A.; Pozzi, J.-P.; Barthès, V.; Pocochard, J., 1999. Comparison of magnetic and gamma ray logging for correlations in chronology and lithology: example from the Aquitanian Basin (France). *Geophys. J. Int.*, 137, 839-846.
- Van den Berg, J., 1979. New paleomagnetic data from the Iberian peninsula. *Geol. Mijnb.*, 59, 1-49-60.
- Van der Lingen, G. J., 1960. *Geology of the Spanish Pyrenees, north of Canfranc, Huesca province*. (PhD Thesis, University of Utrecht). *Estudios Geológicos. Inst. Invest. Geol. "Lucas Mallada"*, Madrid, 16, 205-242.
- Van der Voo, R., 1968. *Paleomagnetic evidence for the rotation of the Iberian peninsula*. PhD Thesis, University of Utrecht
- Van der Voo, R., 1969. Paleomagnetic evidence for the rotation of the Iberian peninsula. *Tectonophysics*, 7:5-56.
- Van der Voo, R. & Boessken, K. A., 1973. Permian paleomagnetic results from the western Pyrenees delineating the plate boundary between the Iberian peninsula and stable Europa. *J. Geophys. Res.*, 78,23:5118-5127.
- Van Dongen, P. G., 1967. The rotation of Spain: Paleomagnetic evidence from the eastern Pyrenees. *Palaeogeogra., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 3, 417-432.
- Vergés, J. & Burbank, D.W., 1996. Eocene-Oligocene thrusting and basin configuration in the eastern and central Pyrenees (Spain). In: *Tertiary basins of Spain*. Edit: Friend, P.F., Dabrio, C.J. Cambridge Univ. Press., 120-133.
- Vergés, J.; Marzo, M.; Santaeularia, T.; Serra-Kiel, J.; Burbank, D. W.; Muñoz, J. A.; Giménez-Montsant, J., 1998. Quantified vertical motions and tectonic evolution of the SE Pyrenean foreland basin. In: *Cenozoic foreland basins of Western Europe*. Maschle, A.; Puigdefabregas, C.; Luterbacher, H. P.; Fernandez, M.(Editors). *Geological Society Special Publications*. 134; Pages 107-134.
- Vidal, O., 2006. *Ongoing PhD Thesis Universitat de Barcelona*.
- Zijderveld, J. D. A.; Van der Voo, R., 1971. Les données paléomagnétiques et leur implication sur l'histoire structurale du golfe de Gascogne. In: *L'histoire structurale du Golfe de Gascogne*. Ed. Technip, Paris, vol11 (2), 1-18.

El registro magnetoambiental de los cambios paleoclimáticos de los últimos 30.000 años en el Margen Atlántico de Galicia

The environmagnetic record of paleoclimatic changes during the last 30.000 years in the Galician Atlantic Margin

D. Rey ^a, B. Rubio ^a, K. Mohamed ^a, R. Coimbra ^{a, c}, F. Vilas ^a, B. Alonso^b, G. Ercilla^b

(a) Dpto. Geociencias Marinas, Universidad de Vigo, 36310 Vigo, España, danirey@uvigo.es

(b) Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Ciencias del Mar, Paseo Marítimo 37-49, 08003 Barcelona, España

(c) Dpto. Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, 3000-272 Coimbra, Portugal.

ABSTRACT

U-channel-based studies of geochemical and magnetic proxies carried out on six sediment cores recovered from the Galicia Bank slope and scarp demonstrates the applicability of magnetochemical proxies as recent climatic events tracers. The records showed climatically forced detrital signatures of regional importance. These are mostly associated with continental slope sedimentary processes (i.e. hemipelagic, contouritic, turbiditic) and Heinrich events. The magnetochemical data supported by radiocarbon dating and SEM analysis, have provided an insight into some of the original environmental conditions of the sediments which are relevant for inter-core correlation and age model inference, and subsequently for the geological evolution of the area.

RESUMEN

Se realiza un estudio de indicadores geoquímicos y magnéticos en seis testigos de sedimentos procedentes del talud y escarpe continental en la zona del Banco de Galicia. Se demuestra la aplicabilidad de los indicadores magnetoquímicos como marcadores de eventos climáticos recientes. Los registros estudiados pusieron de manifiesto rasgos detríticos forzados climáticamente a escala regional. Estos aparecen asociados a procesos sedimentarios de tipo hemipelágico, contornítico y turbidíticos, típicos del talud continental y con eventos de Heinrich. Los datos magnetoquímicos apoyados por las dataciones radiocarbónicas y análisis de SEM, proporcionan información muy valiosa para establecer la correlación y estratigráfica y el modelo de edad de los testigos; y en último término para determinar la evolución sedimentaria de la zona.

Introducción

Este trabajo aborda la evolución sedimentaria del flanco SO del Banco de Galicia durante el Pleistoceno superior y el Holoceno., desde el punto vista del magnetismo ambiental y la

geoquímica de fase sólida. Cuenta con el apoyo adicional de las técnicas de datación radiométrica y análisis textural por microscopía electrónica de barrido.

El proyecto se desarrolló en el contexto de la evaluación de riesgos

geológicos en la zona de naufragio del buque Prestige, acaecida en noviembre de 2002.

Área de estudio

Desde el punto de vista morfológico, la zona de

estudio está limitada por un escarpe de falla de dirección N-S que se extiende entre los 2.790 y los 3.600 m de profundidad. Al pie de este

por Ercilla *et al.* (2006); estos son: canales interlobulares, (TG1, TG9 y TG10), lóbulos sedimentarios (TG11b, TG8) y escarpe de falla (TG4) (Fig.

magnética normalizada al contenido en carbonato cálcico (KCFB) muestra variaciones verticales en amplitud y frecuencia

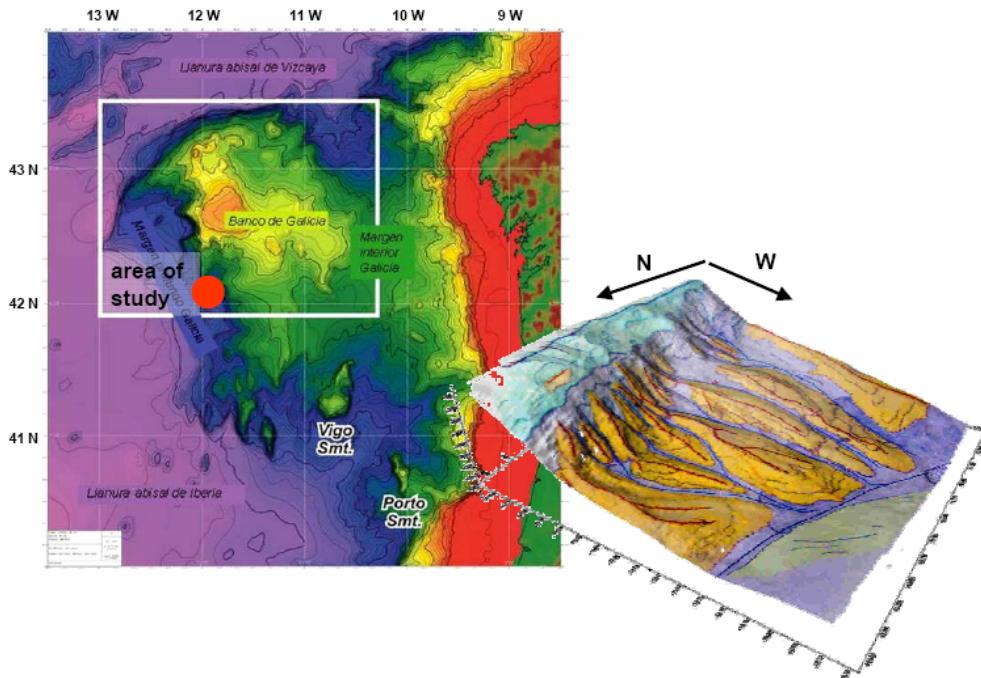


Fig. 1: Localización del área de estudio.

Fig. 1: Location of the study area

escarpe aparecen una serie de lóbulos deposicionales alongados que alcanzan una longitud máxima de 4 km y varios cientos de metros de anchura. Estos lóbulos están separados por pequeñas estructuras con forma de canal. En la actualidad, área se encuentra bajo la influencia de varias masas de agua que fluyen hacia el norte, en el contexto de la circulación termohalina regional.

Material y Métodos

El estudio se basa en seis testigos de gravedad recogidos durante la campaña oceanográfica realizada por el BIO Hespérides en el lugar de hundimiento del Prestige y sus zonas adyacentes. El muestreo cubrió unos 200 km², en la que los testigos son representativos de los tres ambientes morfosedimentarios descritos

1). La estrategia metodológica se realizó en dos fases. Durante la primera fase, se obtuvieron dos registros de alta resolución a partir de U-channels: (a) Propiedades magnéticas obtenidas en un magnetómetro criogénico de tipo 2G., (b) Determinación semicuantitativa de XRF

Resultados

Se definen cinco facies magnetoquímicas (Fig. 2) a partir del análisis cluster de todas las variables estudiadas. Estas facies reflejan los diferentes ambientes de sedimentación (p.e. hemipelágico, contornítico o turbidítico), la procedencia de sus constituyentes mineralógicos, y los procesos diagenéticos tempranos de origen redoxomórfico (p.e. picos de Mn), característicos de estos ambientes.

La susceptibilidad

asignificativas; originando un patrón caracaterístico en diente de sierra en los 50 cm superiores de los testigos (Fig. 2). Esta variación se interpreta como el resultado de variaciones en la velocidad e intensidad de las corrientes de fondo subsecuentes con las fluctuaciones de en la entrada de material detrítico en la zona . Este patrón domina la unidad superior, constituida principalmente por materiales hemipelágico/contorníticos.

Por debajo de esta unidad, las propiedades magnéticas muestran un perfil más plano y monótono, sobre el que destacan esporádicamente algunos horizontes de pocos centímetros en los que la valor de susceptibilidad es un orden de magnitud superior.

El conjunto magnético de estos niveles está Enriquecido en material magnético grueso; y se interpreta como IRDs

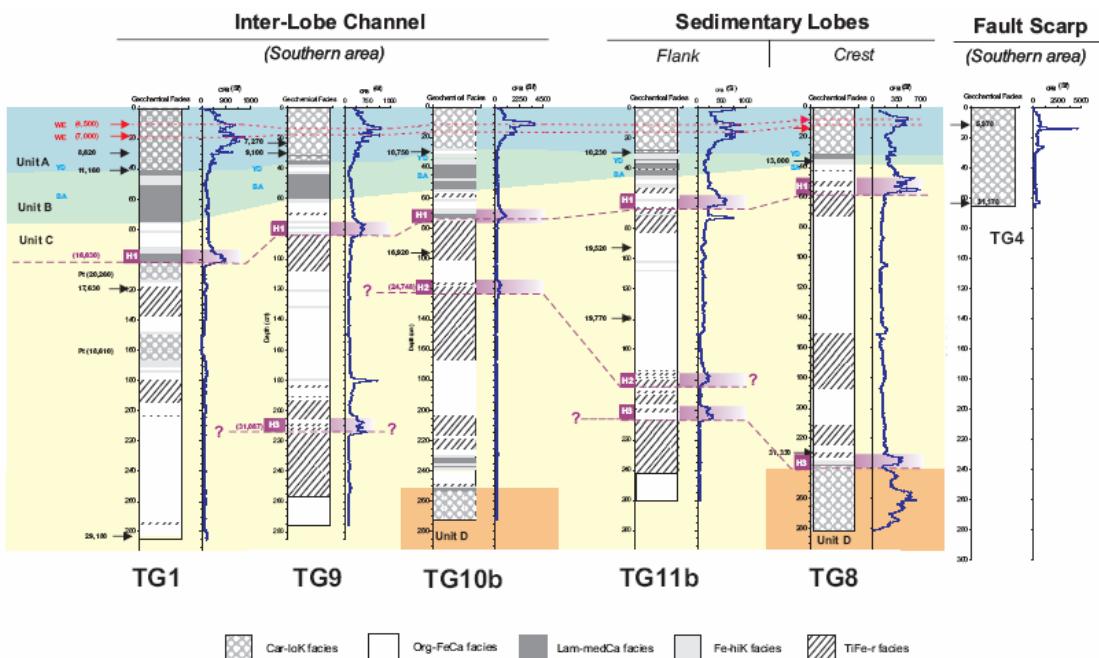


Fig. 2: Correlación de los testigos estudiados.

Fig. 2: Correlation of the studied cores.

distales. Este tipo de material ya ha sido detectado en el Margen Continental Ibérico por Thouveny *et al.* (2000). La atenuación general de la señal magnética en estas unidades se debe principalmente a la disolución progresiva del material magnético durante el enterramiento. La aparición de procesos diagenéticos tempranos de origen redoxomórfico, responsables de la disolución del material magnético original se detectan por la presencia de picos de movilización de Fe y Mn.

El coeficiente Fe/KCFB, considerado como un indicador de diagénesis redoxomórfica (Funk *et al.* 2003), mantiene valores muy bajos en aquellos intervalos en los que la alteración redoxomórfica de los minerales magnéticos detriticos es despreciable. Este indicador se utiliza como filtro para establecer las correlaciones y llevar a cabo las interpretaciones paleoclimáticas.

Conclusiones

Los registros estudiados muestran la presencia de

rasgos detriticos de importancia regional forzados climáticamente, asociados a los procesos sedimentarios del talud continental.

La cronoestratigrafía y correlación de los testigos propuesta (Fig. 2), se basa en 20 dataciones de ¹⁴C-AMS, el reconocimiento de los eventos de Heinrich H1 a H3 y en la identificación de rasgos climáticos holocenos bien documentados.

Desde el punto de vista geoquímica y del magnetismo ambiental, la evolución de la zona durante el Pleistoceno Superior y Holoceno muestra dos contextos sedimentarios bien diferenciados. El MIS 2 está dominado por procesos deposicionales transversales al talud. Durante este procesos se alcanzan las tasas de sedimentación más elevadas (9,1 cm/ka). La actividad turbidítica más antigua se registra a lo 31,000 años BP, y la más reciente a los 14,500 años BP. Durante este periodo también se identifican la llegada sucesiva de los IRDs H1 a H3.

Por el contrario, la sedimentación holocena está dominada por una mezcla de procesos de tipo hemipelágico

y contornítico.

Agradecimientos

Los testigos se recogieron como parte de la Acción Especial del MEC para la valoración de los riesgos geológicos de la zona del Prestige. Los U-Channels se midieron en la Universidad de Bremen en 2004 co parte del Programa Paleostudies de la UE.

Referencias

- Ercilla G., Córdoba D., Gallart J., Gracia E., Muñoz J.A., Somoza L., Vázquez J.T., Vilas F. y Grupo Prestige. (2006). Geological characterization of the Prestige sinking area. Marine Pollution Bulletin, 53: 208-219.
- Funk, J.A., von Dobeneck, T.A., Reitz A., 2003b. Integrated rock magnetic and Geochemical Quantification of redoxomorphic iron mineral diagenesis in Late Quaternary Sediments from the Equatorial Atlantic. In: G. Wefer, S. Mutzila, V. Ratmeyer (Editors), The South Atlantic in the late Quaternary – Reconstruction of material budget and current systems. Springer, 237-260.
- Thouveny, N., Moreno, E., Delanghe, D., Candon, L., Lancelot, Y., Shackleton, N.J. 2000. Rock magnetic detection of distal ice rafted debries: Clue for the identification of Heinrich layers on the Portuguese margin. Earth Planet. Sci. Lett. 180, 61-75.

Magnetoestratigrafía Cuisiense-Luteciense preliminar de la cuenca surpirenaica occidental

Preliminary Cuisian-Lutetian magnetostratigraphy
from the southwestern pyrenean basin

Rodríguez-Pintó, A.(1); Pueyo, E. L.(2); Barnolas, A.(2); Pocoví, A.; (1); Samsó, J. M.; Gil-Peña, I.(2)

(1) Geodinámica Interna. Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Spain (adrianar@unizar.es).

(2) Estudios Geológicos. Unidad de Geología y Geofísica. Instituto Geológico y Minero de España (unaim@igme.es).

ABSTRACT

Cuisian and Lutetian magnetostratigraphy has received very little attention despite of the large number of paleomagnetic studies in the Pyrenean domain. Five pilot mini-sections (≈ 100 demagnetized specimens) have been studied along this temporal gap to establish the quality of the remanence in order to address future investigations. Paleomagnetic components comprise a low-temperature (up to 200°) record of the present magnetic field and an intermediate direction ($\approx 450^\circ$) displaying two polarities, which can be considered as a primary record. Subsequent growing of spurious mineralogy hampers the definition of paleomagnetic directions. Notwithstanding the low intensity, polarity can be unambiguously defined in most samples and the discrete local magnetostratigraphic profile seems to fit very well with the GPTS. Rotation values do not appear to be very robust and consistent with previous data therefore they should be based on a large number of better-quality samples in future studies.

Key words: South Pyrenean Basin, External Sierras, Magnetostratigraphy, Lutetian, Cuisian

Introducción

La datación magnetoestratigráfica de series sintectónicas ha tenido una gran relevancia durante los últimos años en el desarrollo de la investigación pirenaica debido al excelente grado de preservación de los materiales sintectónicos. Hasta el momento se han realizado más de 50 kilómetros de serie magnetoestratigráfica distribuidos por toda la cuenca surpirenaica, si bien la mayor parte de ellos se han centrado en las series molásicas o deltaicas (Bentham 1992; Hogan, 1993; Meigs 1995 y Beamud et al., 2003) y muy pocos en las series marinas (Pascual 1992; Hogan, 1993; Oms et al., 2003). Además el tránsito Cuisiense-Luteciense ha sido escasamente estudiado (Burbank et al., 1987; Holl y Anastasio 1992). Este trabajo pretende explorar la calidad magnética de este intervalo con el fin de completar este lapso de

tiempo y disponer en el futuro de una cronoestratigrafía integrada y rigurosa para todo el Eoceno de la Cuenca Surpirenaica. Este marco permitirá establecer con precisión las secuencias deposicionales, correlacionarlas y precisar las edades de deformación (incluyendo las rotaciones de eje vertical). El objetivo principal de esta línea de investigación es establecer, a medio plazo, reconstrucciones 3D de gran detalle. En este estudio se muestran los resultados preliminares obtenidos en 5 perfiles piloto localizados en el sector oriental de las Sierras Exteriores Altoaragonesas.

Situación geológica

Los perfiles estudiados se encuentran involucrados en las estructuras del frente de cabalgamiento surpirenaico occidental (Sierras Exteriores)

Estas estructuras se han desarrollado de forma diacrónica en dos etapas durante el Eoceno medio y superior y durante el Mioceno inferior (Millán 1996; Millán et al., 2000; Pocoví et al., 2004). El cabalgamiento basal en este sector ha hecho aflorar en su bloque superior (y estructuras asociadas) los materiales eocenos de la Cuenca Surpirenaica. En el sector del río Isuela (ISU1, ISU2 e ISU3), la serie mesozoico-terciaria cabalga sobre la serie continental miocena por encima de una rampa de bloque inferior que buza 30° al norte. El Anticlinal del Balces (BZ01 y SIV1) es una estructura oblicua y virgada de gran escala situada en el extremo oriental del frente de cabalgante que involucra serie desde el Ilerdiense superior hasta el Luteciense. Por otra parte esta estructura presenta el interés añadido de la falta de información sobre rotaciones asociadas a su formación y se sospecha que pueden ser

importantes si se atiende a los valores y tendencias observados en el frente de Sierras Exteriores (Pueyo 2000) y en el anticlinal de Boltanya (Dinarès, 1992; Fernández, 2004).

Desde el punto de vista estratigráfico, el sector oriental de las Sierras Exteriores, al este de Gabardiella, presenta la superposición de tres unidades en facies de plataforma carbonática; Fm Ager, Fm Boltanya y Fm Guara que corresponden aproximadamente, al Ilerdiense, Cui-siense y Luteciense. Al oeste del cabalgamiento de Gabardiella la serie es mucho más reducida de espesor y la Fm Guara descansa directamente sobre las facies continentales del Garumniense. La relación geométrica entre las tres unidades queda patente en la transversal de los anticlinales de Boltanya – Balces y responde a un margen carbonático escalonado,

retrogradacional desarrollado en el margen de antepaís de la cuenca de Jaca – Pamplona y sobre el que las turbiditas del Grupo Hecho se disponen en *onlap* (Barnolas y Teixell, 1994).

La plataforma carbonática cui-siense (Fm Boltanya) corresponde a una rampa mixta, siliciclastica y carbonática, distalmente truncada y formada internamente por la agraciación de secuencias decamétricas somerizantes con base siliciclastica y techo carbonático (Barnolas et al., 1991). La existencia de una cuña siliciclastica de procedencia meridional (nivel de San Pelegrín) permite separar dos sub-unidades que han sido denominadas Boltanya inferior y superior (Barnolas et al., 1991; Barnolas y Gil-Peña, 2001).

La plataforma carbonática luteciense (Fm Guara) ha sido descrita estratigráficamente por Samsó et al. (1994), reconociéndose cuatro subunidades que se denominan Inferior, Media 1, Media 2 y Superior. El registro sedimentario de la plataforma luteciense está controlado ya por la generación de los pliegues N-S asociados a la rampa lateral de la Unidad Surpirenaica Central. La Fm. Guara Media 2 presenta espesores variables con engrosamientos en las áreas sinclinales (Samsó et al., 1994) mientras la Guara superior es discordante al este de Gabardiella (Samsó et al., 1994; Barnolas y Gil-Peña, 2001). Al oeste de Gabardiella la sucesión es continua, sin discordancias internas, y su techo viene marcado por una superficie de inundación que da paso a las margas de Arguis (Bartonense – Priaboniense inferior).

Datos Magnetoestratigráficos

Se realizaron cinco mini-perfiles piloto. La estación SIV01, se localiza en las cercanías de Alquezar y de San Pelegrín, en la terminación meridional del anticlinal de Balces en su flanco este. En este perfil aflora desde la parte inferior de la Fm Boltanya (Cui-siense) a la parte alta de la Fm Guara inferior (Luteciense) (Fig. 1). Por medio de una perforadora portátil de gasolina se tomaron 27 muestras estándar en la parte inferior de la Fm Boltanya. Los testigos se espacian apropiadamente cada 2 m a lo largo de 40 m de perfil. La estación, BZ01, se localiza al sur de Bagüeste, cerca de la Ermita de Santa Marina; en la parte septentrional del anticlinal pero en su flanco oeste. Se tomaron 8 núcleos a lo largo de 12 m de perfil de la parte inferior de la Fm Guara. Las siguientes tres estaciones ISU01, ISU02 e ISU03, están ubicadas en el corte del Río Isuela, en la carretera entre Nueno y Arguís, al oeste

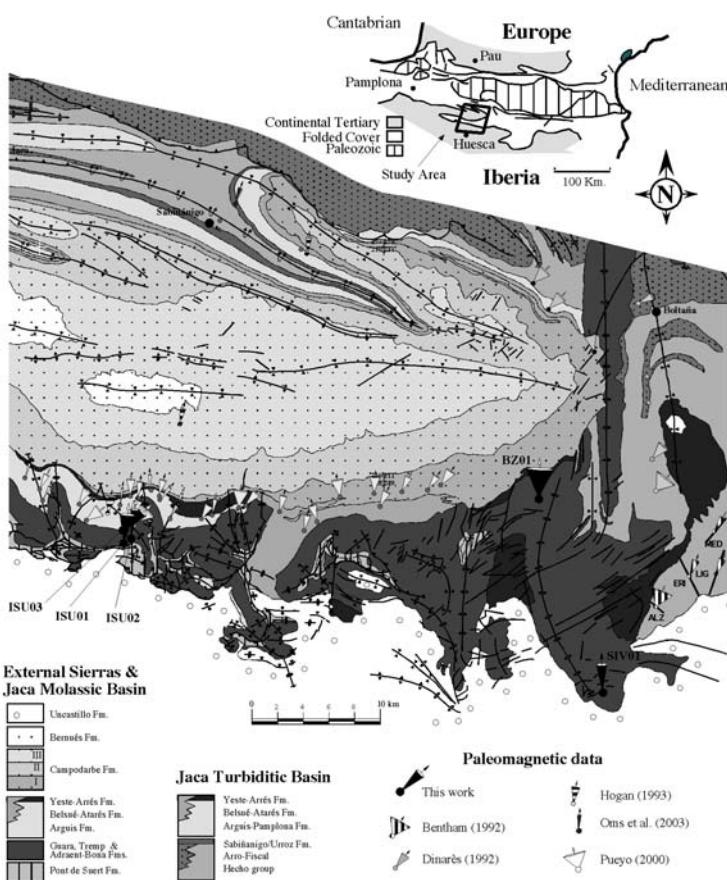


Figura 1: Mapa geológico esquemático del sector Oriental de la Cuenca de Jaca según Puigdefábregas (1975) y Millán (1996, 2006) estructura de las Sierras Exteriores.

del anticinal del Pico del Águila. Se distribuyeron estratégicamente en la parte baja, media y alta de la Fm Guara (Luteciente). En estas estaciones se tomaron en total 36 núcleos (10, 11 y 15 respectivamente) con un espaciamiento de 2 a 3 m, con nueve, veinte y treinta metros de perfil respectivamente.

Se estudiaron un centenar de especímenes estándar provenientes de las 71 muestras perforadas en campo. Se utilizó el espécimen más profundo de cada núcleo para realizar la desmagnetización térmica y una selección de 5 especímenes se desmagnetizaron por campos alternos. Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos. Los equipos utilizados para las mediciones fueron un desmagnetizador térmico TD48-SC (ASC) con bobina de inducción y sistema de vacío, un magnetómetro criogénico superconductor 2G-755. Para la desmagnetización térmica se realizaron 12 pasos con intervalos de 50° (entre 20° y 300°) y de 35° (entre 300° y 500°). Para la desmagnetización con campos alternos se siguieron trece pasos hasta aplicar un campo máximo de 100mT. Las direcciones se ajustaron por análisis de componentes principales (Kirschvink, 1980) utilizando el programa PALDIR y en algunos casos a partir de círculos de desmagnetización (Bailey &

Halls, 1979). Las medias por estación (Fisher, 1954) y las correcciones estructurales se realizaron con el programa STEREO NET 6.3.3 (Allmendinger 2005).

Componentes y mineralología

La NRM osciló entre 100 y 400 10^{-6} A/m y las susceptibilidades son débilmente paramagnéticas o incluso diamagnéticas y oscilan entre -5 y 9 10^{-6} S.I. En general todas las muestras estudiadas presentan una componente secundaria entre los 20° y 200° que muestra la dirección de polaridad actual. En algunos casos esta componente viscosa parece estar inducida durante la perforación, transporte o almacenamiento. Las estaciones SIV01 y BZ01 presentan una componente característica entre 200° y 500° que se define a partir de 6 - 8 pasos de desmagnetización. Las estaciones ISU01, ISU02 y ISU03 exhiben una componente característica entre 250° - 470° (6 pasos de desmagnetización). El crecimiento de nuevas fases minerales impidió la caracterización posterior de direcciones.

Las muestras analizadas se han diferenciado tres tipos según su calidad. Tipo I con una componente característica bien definida, utilizadas para calcular las direcciones medias de la estación. Tipo II, que no

presenta buena calidad en las direcciones pero sí una polaridad sin ambigüedades, con el uso de los círculos de desmagnetización se calcularon las direcciones medias (Halls, 1978). Tipo III, corresponde a muestras de mala calidad en las que no se pudo observar paleodirecciones por ninguno de los dos métodos mencionados y no se han tomado en cuenta para este estudio.

Conclusiones

1) Las direcciones definidas se pueden considerar registro primario del campo magnético, en vista de la existencia de dos polaridades y de la similitud con los abundantes datos de otros autores (Hogan, 1993, Pueyo, 2000) en zonas circundantes. La aplicación de la prueba del pliegue deberá esperar a la obtención de estaciones en posiciones estructurales bien diferenciadas.

2) La baja intensidad registrada en muchas de las muestras estudiadas no impide conocer con claridad la polaridad magnética en la mayoría de ellas (tipos I y II).

3) Si se tiene en cuenta la posición estratigráfica, las polaridades definidas se corresponden con las esperables según la escala de tiempo de polaridad magnética (Fig. 3), abriendo buenas expectativas al desarrollo de perfiles de mayor longitud.

Site	K	NRM	Ajuste	n	N	DEC	INC*	α_{95}	K	DEC	INC†	α_{95}	K
SIV01 (N)	9,1	363	PCA	18	21	000	69	11	11	008	44	11	10
SIV01 (R)	9,2	318	PCA	5	6	173	-63	31	9	186	-38	33	8
SIV01	9,1	353	PCA	23	27	358	68	10	10	007	43	10	10
BZ01	-4,6	354	CD+PCA	8	8	000	28	24	7	353	04	25	7
ISU01	5,5	117	CD+PCA	16	18	187	-70	15	7	193	-34	15	7
ISU02	18,0	131	CD+PCA	22	27	188	-57	8	17	176	-36	8	17
ISU03	12,0	173	CD+PCA	21	29	227	-59	10	11	202	-39	10	11

Tabla 1: Datos paleomagnéticos piloto. K: susceptibilidad magnética (10^{-6} S.I.). NRM: Magnetización Remanente Natural (10^{-6} A/m). Ajuste de direcciones. PCA: análisis de componentes principales de pasos seleccionados directamente sobre los diagramas ortogonales, CD: análisis de círculos de desmagnetización. DEC&INC*: vector paleomagnético medio en coordenadas geográficas, DEC&INC†: abatido a la horizontal por medio del rumbo de las capas.

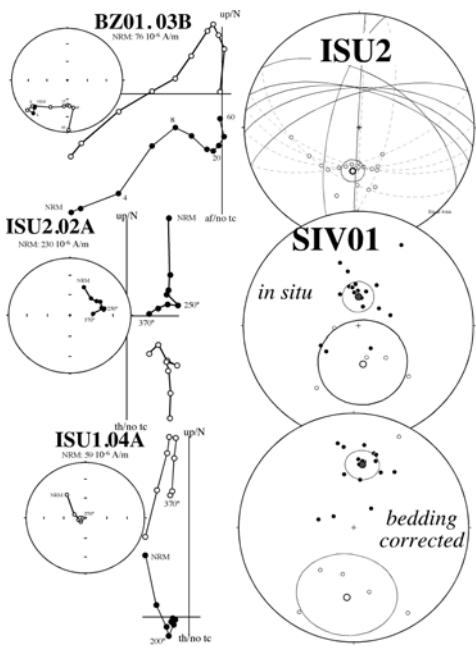


Figura 2: Diagramas ortogonales de dos muestras de la formación Guarra, desmagnetización progresiva por campos alternos (BZ01.03B) y tratamiento térmico (ISU2.02A) y ISU1.04A). Proyección estereográfica de los círculos de desmagnetización y de las (escasas) direcciones calculados en la estación ISU2 (datos *in situ*). Proyección estereográfica de las direcciones características del perfil SIV01 antes y después de la corrección de capa.

4) Las rotaciones horarias encontradas en el perfil del Isuela son de cierta magnitud (22°) aunque inferiores a las esperables (Pueyo et al., 2002). Las encontradas en el anticlinal Balces no parecen significativas aunque presentan errores importantes (25°). En ambos casos, estudios ulteriores con mayor número de muestras de calidad óptima permitirán precisar los valores de rotación necesarios para llevar a cabo los modelos y restituciones 3D.

Agradecimientos: Al laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Burgos y a Juanjo Villalain por el apoyo prestado. Trabajo financiado por un beca de la U. Zaragoza - BSCH - Fundación Carolina (AR) y por un contrato de investigación del programa "Ramón y Cajal" (ELP). Fondos adicionales para el desarrollo de este proyecto provienen de los proyectos: Geokin3D-Pir (CTPR04/2005 de la INTERREG IIIb- CTP, UE), Pmag3Drest (CGL-2006-2289-BTE del MEC) y del ChronoPyr (2006-2009-IGME).

Bibliografía

Barnolas, A., J.M. Samsó, A. Teixell, J. Tosquella y M. Zamorano. (1991). Libro-

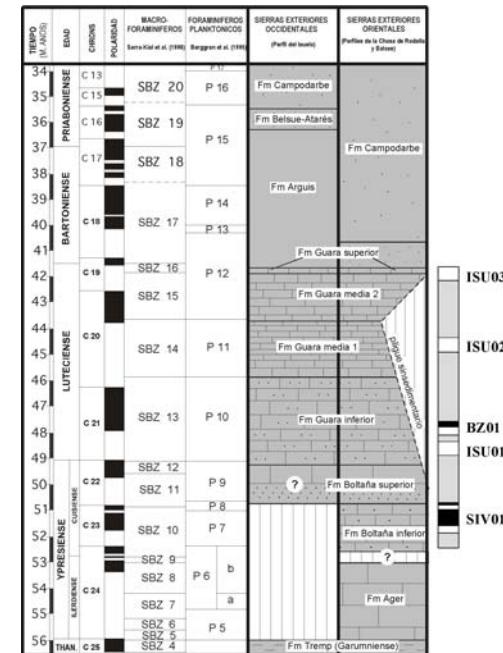


Figura 3: Esquema estratigráfico de las calizas en facies de plataforma, de edad eocena, aflorantes en las Sierras Exteriores y en el anticlinal de Boltanya. Basado en Van Lunsen (1970), Barnolas et al. (1991), Samsó et al. (1994) y datos no publicados procedentes del Mapa Geológico de España escala 1:50.000 (MAGNA) (hojas de Apiés, Boltanya y Alquézar). EN la columna derecha se localiza la polaridad magnética encontrada en las estaciones estudiadas.

Guía Excursión nº 1, I Congreso Terciario (Univ. Barcelona). 1-123.

Barnolas, A. y Gil-Peña, I. (2001).- Boletín Geológico y Minero, 112 (3), 17-38.

Barnolas, A. y Teixell, A. (1994). Geology, 22, 1107-1110.

Bailey, R. C. & Halls H. C., (1984). Journal of Geophysics, 54, p. 174-182.

Beamud, B.; Garcés, M.; Cabrera, Ll.; Muñoz, J. A.; Almar, Y., (2003). Earth and Planetary Science Letters 216, 501-514.

Bentham, P.A., (1992). Ph.D. Univer. of Southern California. 253pp.

Burbank, K. D. W. ; Hogan, P. ; King, M.; Jolley, Z. J., (1987). Workshop of paleomagnetism in the Iberian Peninsula. Servei Geològic de Catalunya. Abstracts, 1-3.

Dinarès, J., (1992). Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 462 pp.

Fernández, Bellón, O. (2004). Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 321pp.

Fisher, R. A., (1953). Proceedings of the Royal Society, A217, p. 295 - 305.

Hogan, P.J. (1993). PhD thesis, Univer. of Southern California. 219 pp.

Holl, J. E.; Anastasio, D. J., (1993). Geology. 21; 3, Pages 271-274.

Kirschvink, J. L., (1980). Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 62, 699-718.

Meigs, A. J., (1995). PhD Thesis University of Southern California. Los Angeles, CA, United States: 275pp.

Millán, H., (1996). Tesis Doctoral Universidad de Zaragoza. 330 pp.

Millán, H., Pueyo, E. L., Aurell, M., Luzón, A., Oliva, B., Martínez-Peña, M. B. and Pocoví, A., (2000). Rev. Soc. Geol. España 13(2), 279-300.

Oms, O.; Dinarès-Turel, J.; Remacha, E., (2003). Studia Geophysica Geodetica, 47, 275-288.

Pascual, O., (1992). PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona.

Pocoví, A.; Millán, H.; Pueyo, E. L.; Larrasoña, J. C.; Oliva, B., (2004). Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España (ISBN 84-7840-546-1), 328-330.

Pueyo, E. L., (2000). PhD thesis, Universidad de Zaragoza. 296 pp.

Pueyo, E.L.; Millán, H.; Pocoví, A., (2002). Sedimentary Geology , 146, 191-208.

Samsó, J.M.; Serra-Kiel, J.; Tosquella, J. y Travé, A. (1994).- II Congreso del Grupo Español del Terciario, Jaca, Comunicaciones, 205-208.

Van Lunsen, H. (1970). Geol. Ultraiectina, 16, 1 -119.

Resultados paleomagnéticos y de ASM en sedimentos del Triásico Superior de la Meseta Occidental Marroquí y del Cretácico Superior del cratón Africano: discusión en el contexto de la evolución geodinámica mesozoica del NW de África

Palaeomagnetism and AMS results from sediments of the Late Triassic Western Moroccan Meseta and the Late Cretaceous African craton: a discussion within the NW-African Mesozoic geodynamic evolution framework.

V.C. Ruiz-Martínez (*), A. Palencia-Ortas (**), J.J. Villalaín (***)

(*) V.C. Ruiz-Martínez, Dpto FTAA I, Fac. CC. Físicas, UCM, vcarlos@fis.ucm.es

(**) A. Palencia-Ortas, Dpto FTAA I, Fac. CC. Físicas, UCM.

(***) J.J. Villalaín, Departamento de Física, Escuela Técnica Superior, Univ. de Burgos.

ABSTRACT

Palaeomagnetic and AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) studies have been carried out in two distinct Moroccan sedimentary sequences (120 oriented samples analyzed). The sampled sections consist in (i) Late Triassic (Norian) red beds from the Argana Basin (Western Moroccan Meseta) and (ii) Late Cretaceous (early Turonian) marine black marls and silicic limestones from the Tarfaya Basin (Western African craton). In order to average the geomagnetic secular variation in these well-known age sections, sampling strategy was applied along 15-30 m vertical profiles taking into account previously estimated accumulation rates due to orbital-forced sedimentation. AMS reveals well-defined fabrics with the minimum susceptibility axis perpendicular to the foliation plane, with magnetic lineations interpreted in terms of tectonic stresses and/or palaeocurrents directions. Thermal and "Alternating Field" demagnetizations of the marine samples from Tarfaya Basin show a single, stable, low coercivity and low unblocking temperature (T_{ub}) directional component. Some intervals of reversal polarity have been found (apparently without a lithological control), suggesting the record of very short reversal polarities events (even assuming an "early" diagenetic remanence blocking in the entire section), though contradictory magnetic interactions related to iron-sulphide ferromagnetic minerals can't be excluded. Mean paleomagnetic direction from Tarfaya basin sediments confirm the Late Cretaceous segment of the synthetic Apparent Polar Wander path proposed for Africa. Detailed, complete thermal demagnetization of the Argana red beds show that samples are affected by a remagnetization (of normal polarity and T_{ub} around 570°C) followed by a high T_{ub} – hematite component (of mixed polarity, mostly reversed) that is thought to be of Norian age. To constrain the remanences acquisition times and the possibility (amount/timing) of vertical axis rotations, the mean directions of these components, before and after the (Alpine) tilt corrections, are compared with the expected ones derived from the available palaeogeography reconstructions of Gondwana and its reliable paleopoles, resulting on different reconstructions of consecutive events according with the geodynamic evolution of NW-Africa during the Mesozoic.

Key words: *Palaeomagnetism, Anisotropy of Magnetic Susceptibility, NW Africa, Mesozoic geodynamic evolution.*

RESUMEN

Se ha realizado un estudio de paleomagnetismo y anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) en un total de 120 muestras orientadas en dos secuencias sedimentarias distintas de Marruecos, que consisten en (i) lechos rojos del Triásico Superior (Noriense) de la Cuenca de Argana (Meseta Occidental Marroquí) y (ii) sedimentos marinos (alternancia de lutitas negras y calizas silíceas) del Cretácico Superior (Turoniano Inferior) de la cuenca de Tarfaya (cráton del NW de África). El muestreo se ha realizado en perfiles verticales a lo largo de 15-30 m con la intención de promediar en el tiempo la variación secular geomagnética, teniendo en cuenta previamente las tasas de sedimentación, controladas por la ciclicidad orbital, existentes para estas secciones de precisa edad. Los estudios de ASM revelan fábricas sedimentarias con lineaciones magnéticas que se interpretan como resultado de esfuerzos tectónicos y / o direcciones de paleocorriente. En las muestras de sedimentos marinos de la Cuenca de Tarfaya, la desimanación térmica y por campos alternos revela una única componente estable direccional, de bajas coercitividad y temperatura de desbloqueo (T_{ub}). Se han encontrado algunos intervalos de polaridad invertida, aparentemente no litológicamente controlados, que sugieren el registro de rápidos eventos de inversión de polaridad, incluso si se asume una adquisición de la remanencia durante una diagénesis “temprana” que afecte a la sección; aunque tampoco puedan excluirse interacciones magnéticas contradictorias debido a la presencia de minerales ferromagnéticos de sulfuro de hierro. La dirección paleomagnética media de los sedimentos de la Cuenca de Tarfaya confirman el segmento correspondiente del Cretácico Superior de la curva sintética de deriva polar aparente propuesta para África. Los lechos rojos de la Cuenca de Argana se han desimanado térmicamente de forma completa y detallada, evidenciándose una reimanación de polaridad normal con T_{ub} de unos 570°C, seguida de una componente portada por hematites con alta T_{ub} , de polaridad mixta aunque predominantemente invertida, y que se ha considerado de edad Noriense. Para acotar los tiempos de adquisición de las remanencias y la posibilidad (cuantía/momento) de rotaciones de bloques sobre ejes verticales, se comparan sus direcciones antes y después de la corrección por el basculamiento (Alpino) con las esperadas correspondientes en edad según las existentes reconstrucciones paleogeográficas de Gondwana y sus paleopolos de calidad, de lo que resultan diferentes reconstrucciones de eventos consecutivos, que se discuten atendiendo a la evolución geodinámica del NW de África durante el Mesozoico.

Rotaciones locales vs. Variación Secular geomagnética: resultados paleomagnéticos preliminares del magmatismo (Mioceno Medio – Superior) del Arco Bético-Rifeño en el NE de Marruecos.

Local rotations vs. geomagnetic Secular Variation: preliminary palaeomagnetic results from the Middle-Late Miocene Betic-Riffian Arc volcanism of NE Morocco.

V.C. Ruiz-Martínez (*), V. Villasante (**), G. McIntosh (***) , I. Palencia, K. El Kadiri (****), A. Chalouan (*****)

(*) V.C. Ruiz-Martínez, Dpto FTAA I, Fac. CC. Físicas, UCM, Madrid vcarlos@fis.ucm.es

(**) V. Villasante, Dpto FTAA I, Fac. CC. Físicas, UCM, Madrid.

(***) G. McIntosh, Dpto FTAA I, Fac. CC. Físicas, UCM, Madrid.

(****) K. El Kadiri, Fac. de CC., Universidad de Tetuán.

(*****) A. Chalouan, Univ. Mohammed V - Agdal, Rabat.

ABSTRACT

Numerous efforts are being made directed to understand the complex (and debated) tectonic evolution of the Betic-Riffian Arc. During the last the two decades, diverse paleomagnetic studies have been carried out along the Arc (mainly in the Betics). They sometimes have detected small crustal blocks which have experienced vertical axes rotations characterized by different amount and sense, but the sequential deformation pattern of the Arc is still a long way off. Accurate determinations of both the amount and age (and their uncertainties) of these crustal rotations are crucial to the knowledge of the mechanisms that cause them and how long they remain active. A total of 20 sites (193 samples) have been sampled in the Rast Tarf (13.1-12.0 Ma) and of Cap Trois Furches (9.6 ± 0.4 Ma) volcanic massifs (around Alhucemas and Melilla, respectively). Their calcoalcaline series offer the older available radiometric (K/Ar) datings from the Moroccan Neogene magmatism (Middle-Late Miocene, 13-9Ma): 7 volcanic basaltic andesite lava flows and breccias have been sampled in the Rast Tarf area, together with 13 lava flows, tuffs and breccias of rhyolites and dacites in the Cap Trois Furches volcanic massif. Detailed AF demagnetization was effective to analyze, in different coercivity spectra ranges, the remanence directions associated to the different lithologies that were calculated by principal component analysis: Most of the samples possessed a fairly a stable single component, and other showed weak secondary viscous components which were easily removed revealing a more stable component of magnetization, with the exception of 1 andesitic flow (that were characterized by a chaotic behaviour), and the sampled tuffs, where two components were superposed. Big clasts from volcanic breccias sites have been discarded because they showed a high (random) sample directions scatter after demagnetization of their single, stable component. The reliability of the great circle analysis technique has been checked in the tuffs (with small pyroclasts in each sample) when calculating a shared remanence direction. The rest of the sampled lava flows (4 in Rast Tarf, 8 in Cap Trois Furches) led to mean site directions with reduced within-site scatters, mostly of reversed polarities. Finally, the tectonic implications that palaeomagnetic results suggest are discussed taking into account (i) the stress regimen and major strike-slip faults that border the volcanic massifs and (ii) the statistical requirements that are necessary to average adequately the geomagnetic Secular Variation.

Key words: Secular Variation, palaeomagnetic rotations, Neogene volcanism, NE Morocco.

RESUMEN

Numerosos esfuerzos se siguen aún realizando en el Arco Bético-Rifeño encaminados a comprender su compleja y debatida evolución tectónica. Los diversos estudios de paleomagnetismo que se han realizado de las últimas dos décadas (mayormente en las Béticas) han ayudado a detectar en ocasiones pequeños bloques corticales que han experimentado rotaciones sobre ejes verticales de diferente cuantía y sentido, pero aún se está lejos de poder describir y secuenciar el patrón deformacional del Arco. Acotar lo más posible la cuantía y edad de las rotaciones (junto a sus incertidumbres) es crucial para entender los mecanismos que las causan y el tiempo que permanecen activos. Por ello, se han muestreado un total de 20 sitios (193 muestras) en los dos macizos volcánicos Neógenos de Marruecos que constan con dataciones radiométricas (K/Ar) de mayor edad (Mioceno Medio – Superior: de 13 a 9 Ma), correspondientes al magmatismo calcoalcalino de Ras Tarf (13.1-12.0 Ma) y del Cabo Tres Forcas (9.6 ± 0.4 Ma), en los alrededores de Alhucemas y Melilla, respectivamente. Se han muestreado 7 flujos y brechas volcánicas de andesitas basálticas en el macizo de Ras Tarf, y 13 flujos, tobas y brechas de riolitas y dacitas en el de Tres Forcas. La detallada desmagnetización por campos alternos decrecientes realizada se muestra efectiva, en distintos rangos de coercitividades, para caracterizar la dirección de las remanencias de las distintas litologías. Las rocas han presentado en general una componente estable, a veces tras eliminar una componente viscosa, cuya dirección podía calcularse por regresión lineal; con la excepción de un flujo andesítico de comportamiento caótico y de las tobas muestreadas, donde se superponen más de una componente. Los grandes clastos muestreados en brechas volcánicas han presentado direcciones aleatorias con una única componente estable durante la desimanación, por lo que estos sitios han sido rechazados. En el caso de las tobas (con pequeños piroclastos en cada muestra) se discute la fiabilidad de la técnica de círculos de reimanación aplicada para calcular la dirección de la remanencia común a las muestras. En el resto de los flujos muestreados (4 en Ras Tarf, 8 en Tres Forcas) han podido obtenerse direcciones medias mediante regresión lineal con un buen agrupamiento interno de las direcciones de sus especímenes, mostrando casi todos los sitios polaridades invertidas. Se discuten por último las implicaciones tectónicas que sugieren los resultados obtenidos atendiendo tanto (i) al régimen de esfuerzos y a las fallas de cizalla que rodean los macizos volcánicos estudiados como (ii) a los requisitos estadísticos y geomagnéticos que son necesarios para promediar correctamente la Variación Secular.

Fabrics magnéticos em granitos variscos da Zona Centro-Ibérica

Magnetic fabrics of variscan granites in Central Iberian Zone

Helena Sant'Ovaia (*)

(*) GIMEF, Centro de Geologia U.Porto; Departamento de Geologia FCUP; Rua do Campo Alegre, 687
4169-007 Porto; hsantov@fc.up.pt

ABSTRACT

Magnetic susceptibility measurements have been widely used as lithologic indicator in granitic rocks or in the broad discrimination between paramagnetic ("ilmenite-type granites") and ferromagnetic granitoids ("magnetite-type granites"). In the paramagnetic granites, magnetic susceptibility is a valuable tool for the distinction between granites where muscovite contents is higher than biotite contents and granites where the inverse occurs. On the other hand, the analysis of the magnetic anisotropy can be used to document internal fabrics of granitic rocks and can be related with the strain pattern to which the magma was subjected.

Key words: Anisotropy of Magnetic Susceptibility, Gravimetry, Bouguer Anomaly, Granites, Paramagnetism

RESUMO

A medição da susceptibilidade magnética para rochas graníticas permite permitir o enquadramento no grupo dos "magnetite-type" (granitos ferromagnéticos) e "ilmenite-type granites" (granitos paramagnéticos). Nos granitos paramagnéticos, "ilmenite type", a susceptibilidade magnética está relacionada com a abundância relativa em biotite e moscovite. Por outro lado, nestes granitos, os diferentes valores de anisotropia magnética relacionam-se com o seu grau de deformação, o que permite a sua classificação quanto ao período de instalação.

Introdução

A técnica do estudo da anisotropia da susceptibilidade magnética (ASM). permite uma análise sistemática dum maciço granítico, proporcionando dados direcionais (foliação e lineação magnética) que podem ser comparados com

os da foliação e lineação magmática. Para além disso, obtém-se também, parâmetros quantitativos que estão relacionados com a composição química e com a taxa de deformação que sofreram as rochas. Neste trabalho apresenta-se uma síntese de resultados de ASM de granitos portugueses com vista à sua caracterização

magnética e estrutural. Apresenta-se também uma classificação com base em características petrofísicas (susceptibilidade magnética e anisotropia magnética) para os granitos variscos e apresenta-se a comparação desta classificação com a proposta por Ferreira *et al.* em 1987.

Enquadramento geológico

Os granitos cujos resultados apresentamos pertencem a três tipos distintos de acordo com a classificação de Ferreira *et al.* (1987): granitos pós-tectónicos, granitos sin a tarditectónicos e granitos sintectónicos relativamente à terceira fase da deformação hercínica (D3).

No primeiro grupo, incluem-se os granitos dos maciços de Vila Pouca de Aguiar (VPA), Águas Frias-Chaves (AF), Lavadores e Madalena (Gaia), Caria e Vila da Ponte; no segundo grupo, incluem-se granitos do maciço de Castro Daire e no terceiro grupo, incluem-se os granitos da Gralheira, Serapicos, Minheu e Lagoa. Estes maciços localizam-se no interior da Zona Centro-Ibérica com exceção dos granitos de Lavadores e da Madalena que se localizam na fronteira desta zona com a Zona Ossa Morena (Fig. 1).

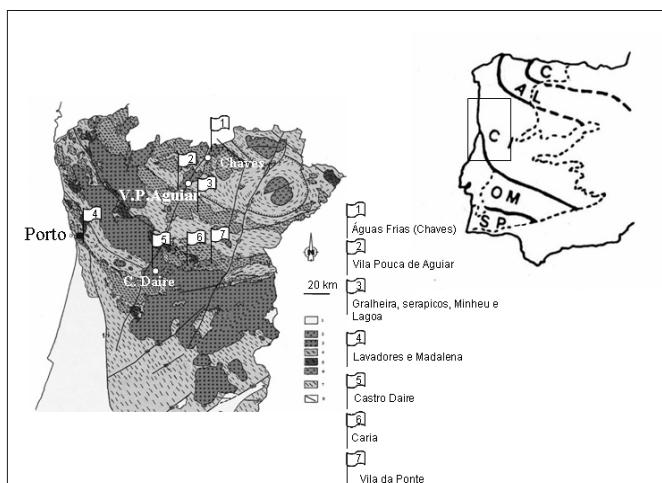


Fig. 1: Localização dos granitos estudados.

Fig. 1: Localization of studied granites.

Os granitos dos maciços de VPA, AF, Vila da Ponte e Caria são granitos porfiróides bióticos de granulometria

variável, todos semelhantes em termos mineralógicos e geoquímicos. Os granitos de Lavadores e da Madalena são granitos bióticos porfiróides mas a fácie de Lavadores evidencia a presença de magnetite como principal opaco, enquanto que a fácie da Madalena apresenta magnetite em menor quantidade e também ilmenite. O complexo granítico de Castro Daire é constituído por granitos bióticos porfiróides (granitos de Castro Daire e Calde), assim como por granitos de duas micas que afloram centralmente (granito de Alva). Os granitos da Gralheira, Serapicos, Minheu e Lagoa são granitos de duas micas e apresentam mineralogia muito semelhante

Fundamentos

Quando um material é exposto a um campo magnético H , adquire uma magnetização induzida, M . A magnetização induzida e o campo magnético H estão relacionados através

efectivo na direcção j . A superfície representativa daquele tensor é um elipsóide triaxial. Medindo a magnetização induzida em três direcções ortogonais acede-se aos termos diagonais e simétricos do tensor. A diagonalização desta matriz permite obter três vectores K_{11}, K_{22}, K_{33} . A intensidade desses três vectores próprios e a sua orientação (direcção e inclinação) no referencial geográfico fornecem os semi-eixos do elipsóide da ASM tal que: $K_{11}=K_1$ ou K_{\max} ; $K_{22}=K_2$ ou K_{\min} ; $K_{33}=K_3$ ou K_{med} com $K_{\max} \geq K_{\min} \geq K_{\text{med}}$. As medições de ASM apresentadas foram realizadas no Kappabridge KLY-2 e KLY-3 (no "Laboratoire de Pétrophysique et Tectonique" da Universidade Paul Sabatier de Toulouse) e no Kappabridge KLY-4S no Departamento de Geologia da FCUP. No tratamento automático dos ficheiros de dados utilizamos o programa que calcula as médias para cada estação: de susceptibilidade (K), intensidades e orientações dos eixos K_1 , K_2 e K_3 ($K_1 \geq K_2 \geq K_3$), de anisotropia paramagnética ($P_{\text{para}} = 100 \times (k_1 + 1,4) / (k_3 + 1,4) - 1$), do parâmetro de forma do elipsóide ($T = [2 \ln(K_2/K_3) / \ln(K_1/K_3)] - 1$), da linearização magnética (paralela à direcção de K_1) e da foliação magnética (azimute e inclinação do plano perpendicular a K_3).

Nos estudos de ASM, uma rede de amostragem que cubra o afloramento de cada um dos maciços graníticos é extremamente importante para a validação estatística dos dados obtidos. A metodologia que temos utilizado é a da realização de uma rede de amostragem de malha quadrada de 1 km, sendo realizados em cada estação

da susceptibilidade magnética K : $M = KH$. Se o corpo é anisotrópico a susceptibilidade magnética K é representada por um tensor simétrico de 2ª ordem da forma: $M_{ij} = K_{ij}H_j$ ($i, j = 1, 2, 3$) em que M_{ij} traduz a magnetização na direcção i , H_j representa o campo indutor

quatro furos, para obtenção de quatro testemunhos, utilizando uma sonda portátil. No laboratório, os testemunhos são cortados perpendicularmente ao seu eixo, obtendo-se dois cilindros individuais (22 mm de altura por 25 mm de diâmetro). Cada estação está, assim, representada em média por cerca de oito amostras.

Fabrics magnéticos em granitos portugueses

Com os dados de ASM obtidos para os diferentes maciços, procedemos a uma sistematização dos resultados e interpretações. Se uma rocha contém minerais paramagnéticos como constituintes comuns e se K é superior a 10^{-3} SI, então a susceptibilidade da rocha é devida à presença de uma fracção ferromagnética (magnetite), o que é o caso do granito de Lavadores o que permite incluir este granito no grupo dos "magnetite type granite" (Ishihara, 1977). No caso do granito da Madalena, a susceptibilidade magnética é devida a contribuições de fracções ferromagnéticas e paramagnéticas (ilmenite e biotite). Com exceção do granito de Lavadores e Madalena, todos os outros granitos estudados apresentam valores de susceptibilidade fracos evidenciando um comportamento paramagnético, uma vez que K é inferior a 10^{-4} SI e pertencendo, portanto, ao grupo "ilmenite type granite". Nos granitos paramagnéticos estudados, as fácies com duas micas apresentam, em média, valores de K inferiores aos granitos biotíticos, pelo contrário, os valores de anisotropia são, em média, mais elevados para os granitos de duas micas (moscovite>biotite). Nestes granitos em que a moscovite é

mais abundante que a biotite, embora o comportamento magnético destes dois minerais seja semelhante, os mais baixos valores de K justificam-se pela susceptibilidade magnética intrínseca que é menor na moscovite.

Os granitos pós-tectónicos apresentam sempre valores de anisotropia paramagnética, Ppara, inferiores a 2,2%. Nos granitos sin a tarditectónicos os valores de Ppara são sempre mais elevados dependendo do grau de deformação dos granitos. No entanto na maioria dos granitos estudados os "fabric" magnéticos são essencialmente magmáticos. Nos granitos em que a anisotropia paramagnética é superior a 4% observa-se já uma deformação no estado sólido susceptível de modificar o "fabric" magmático original. Este grau de deformação é visível no campo e é evidenciado na análise das microestruturas que, na sua maioria, são indicativas de deformação no estado sólido de alta temperatura. Nos granitos paramagnéticos estudados a forma do elipsóide de ASM é geralmente achatada o que se relaciona com o facto dos minerais mais anisotrópicos (do ponto de vista magnético) presentes serem micas. As micas apresentam uma anisotropia magnetocristalina que condiciona um plano de fácil magnetização que coincide com o plano de clivagem. A organização planar dos planos de clivagem, essencialmente da biotite, condiciona a forma achatada do elipsóide de ASM.

Nos granitos biotíticos estudados as foliações magnéticas são paralelas aos contornos dos maciços.

Nos granitos de VPA, AF e Vila da Ponte são pouco

inclinadas, enquanto que nos restantes granitos apresentam pendentes mais elevados, relacionáveis com a forma mais laminar ou mais enraizada dos maciços. Discordanças no sentido do pendor das foliações permitem identificar e distinguir fácies ou pulsões magmáticas. Este aspecto é particularmente notório no caso do complexo de Castro Daire em que a fácie central é discordante relativamente à fácie periférica, o que indica fases diferentes de estruturação e de instalação. Já no maciço de VPA a passagem da fácie central à fácie periférica não influencia o traçado das foliações magnéticas, o que é indicativo de que houve uma coestruturação das duas fácies ainda num estado magmático e uma instalação quase síncrona. As lineações magnéticas têm azimutes geralmente paralelizáveis com os acidentes ao longo dos quais estes maciços se intruiram e materializam fluxos magmáticos. Para os granitos de VPA há um paralelismo entre as lineações magnéticas N190° e a falha Penacova-Régua-Verin. Nos maciços de Vila da Ponte e Caria, as lineações têm direcções NNW-SSE. Estas lineações materializam possivelmente campos de tensões pós-D3 com a tensão compressiva máxima E-W. Em Castro Daire, as famílias de lineações materializam fluxos magmáticos controlados pelo cisalhamento do Sulco Dúrico-Beirão (lineaões muito fracamente inclinadas com azimute em torno dos N140°) e pela intersecção de estruturas relacionadas com esse cisalhamento e com estruturas mais recentes associadas à falha Penacova-Régua-Verin. Estes factos permitem considerar estes granitos

como sin a tardi-tectónicos relativamente a D3, com a estruturação de todo o complexo num estado ainda magnético para as duas fácies principais e associada a um regime dúctil-frágil dos acidentes tectónicos (falha Penacova-Régua-Verin e cisalhamento do Sulco Dúrico-Beirão).

A dominância de lineações fracamente inclinadas em detrimento de lineações magnéticas verticais ou subverticais, permite provar que os incrementos de deslocamento horizontal registados pelo “fabric” foram maiores que os incrementos de deslocamento vertical, pelo que as zonas de alimentação destes maciços estão distantes em profundidade. Este aspecto favorece a ideia de uma instalação para estes granitos a níveis estruturais altos.

Nos granitos sintectónicos, é frequente a presença de foliações e lineações magnéticas com direcções que correspondem a cisalhamentos dúcteis e que materializam um “fabric” deformacional relacionado com a estruturação D3.

Os resultados obtidos, bem como a sua interpretação, levou-nos a propor uma classificação (Sant’Ovaia & Noronha, 2005) para os granitos hercínicos baseada na susceptibilidade magnética e na anisotropia paramagnética. A susceptibilidade magnética pode ser relacionada com a abundância relativa em biotite e moscovite. Assim para granitos do grupo “ilmenite type”, ou seja, em granitos com comportamento paramagnético, considera-se o valor de K de 70×10^{-6} SI como a “fronteira” entre granitos em que o teor de moscovite é superior ou igual ao teor em biotite e granitos em que o teor da biotite é superior a moscovite. Quanto à anisotropia paramagnética,

os valores podem ser agrupados em três grupos: valores baixos ou inferiores a 2,5%, valores intermédios ou compreendidos entre 2,5 e 4% e valores elevados ou superiores a 4%. Estes três grupos podem ser relacionados com a classificação em granitos sintectónicos, tardi e pós-tectónicos de Ferreira *et al.*, (1987) (fig. 2).

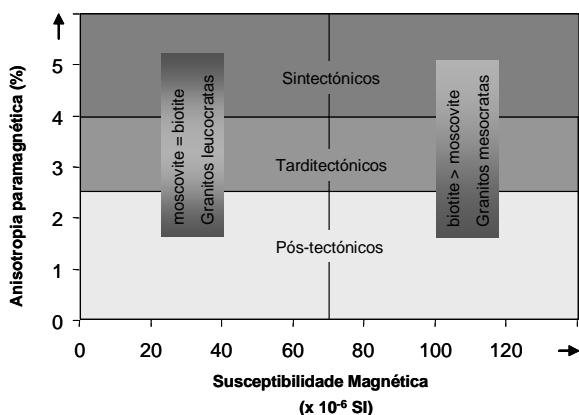


Fig.2: Classificação proposta para granitos do grupo “ilmenite-type”.

Fig. 2: Proposed classification for the ilmenite type granites.

Referências

- Ferreira, N.; Iglesias, M.; Noronha, F.; Pereira, E.; Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L. (1987). Granitos da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea, A Carnicer, J. Gonzalo, M. Lopez Plaza & M. Rodriguez Alonso, Eds, Geología de los Granitoides y Rocas Asociadas del Macizo Hespérico, p. 37-51. Editorial Rueda, Madrid. (Libro de Homenaje a L.C. García de Figuerola).
- Ishihara, S. (1977). The Magnetite-series and the Ilmenite-series Granitic rocks. Mining Geology, 27: 292-305.
- Sant’Ovaia, H. & Noronha, F. 2005. Classificação de granitos hercínicos portugueses com base nas suas características petrofísicas. Cad. Lab. Xeol. Laxe, 30: 75-86.

Geometría extensional del sector occidental de la cuenca Vasco-cantábrica a partir de datos paleomagnéticos

R. Soto (*), J.J. Villalaín (**), A.M. Casas-Sainz (***)

(*) Dpto. Física, Univ. Burgos, Av. Cantabria s/n, 09006 Burgos, rlsoto@ubu.es.

(**) Dpto. Física, Univ. Burgos, Av. Cantabria s/n, 09006 Burgos.

(***) Dpto. Ciencias de la Tierra, Univ. Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna, 50009 Zaragoza

ABSTRACT

To analyse the geometry of syn-extensional deposits in a sedimentary basin, field and subsurface data are necessary. If the sedimentary basin has been inverted, elucidate the geometry related to its previous extensional stage is a more complex process. This is because many features linked to the extensional regime appear modified or hidden. In this work we use paleomagnetism as a useful tool to determine the syn-extensional geometry of inverted basins. Paleomagnetic studies can detect movements around horizontal axes, when a remagnetization at an intermediate stage is present. Only when the remagnetization is acquired during the extensional period and before the inversion of the basin is possible to apply this analysis to describe the extensional geometry of an inverted basin.

To infer the extensional geometry of the western sector of the Basque-Cantabrian basin, we collected samples of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous limestones, sandstones and shales (Cabuerniga and Pas Groups). These deposits represent the syn-extensional sequence linked to an extensional stage generalized in the Iberian plate. Specifically, we sampled in the Cabuerniga sector, a thick Mesozoic sedimentary basin. Preliminary results point out a remagnetization, that could be Albian, as in similar areas in the Iberian chain.

Key words: paleomagnetism, remagnetization, sedimentary basin, extensional geometry, Cabuerniga sector (W Basque-Cantabrian basin)

RESUMEN

Datos tanto de superficie como de suelo son necesarios para analizar la geometría de depósitos sin-extensionales de una cuenca sedimentaria. Si la cuenca sedimentaria ha sido invertida, determinar la geometría de la misma en relación a su fase extensiva anterior, supone una tarea más difícil, puesto que muchas características han sido modificadas u ocultas. En este trabajo utilizamos el paleomagnetismo como una herramienta para determinar la geometría sin-extensional de cuencas sedimentarias invertidas. Si los materiales analizados presentan una remagnetización adquirida durante la fase extensiva y anterior a la fase compresiva, su estudio paleomagnético puede detectar rotaciones de eje horizontal. Dichas rotaciones nos servirán para describir la geometría de la cuenca anterior a su inversión tectónica.

El área estudiada se encuentra en el sector occidental de la cuenca Vasco-Cantábrica. Los materiales muestreados son calizas, areniscas y lutitas del Jurásico Superior y Cretácico Inferior (Grupos Cabuérniga y Pas). Estos depósitos representan la secuencia sin-extensional ligada a una fase extensiva generalizada en toda la placa Ibérica. Concretamente, el área estudiada es la cuenca de Cabuérniga, una potente cuenca Mesozoica. Resultados preliminares nos indican la existencia de una remagnetización, posiblemente Albiense, como en áreas similares de la Cordillera Ibérica.

Propiedades magnéticas de sedimentos remagnetizados en cuencas mesozoicas del norte de Iberia.

J.J. Villalaín (1), R. Soto (1), A.M. Casas (2), M.P. Mata (3), G. Fernández (1) y M.F. Bógallo (1)

(1) Dep. Física. Universidad de Burgos. E. Politécnica Superior. Avda. Cantabria S/N. 09006 Burgos, Spain (villa@ubu.es). (2) Dep. de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna Cerbuna, 12. 50009 Zaragoza. (3) Dep. Geología. Fac. de CC. Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real, Cádiz, Spain

Los estudios paleomagnéticos realizados en calizas jurásicas de la Cordillera Ibérica (noreste de Iberia) tienen en común la presencia de remagnetizaciones. Considerando sus paleodirecciones, algunos de estos trabajos sugieren una edad cretácica para estas imanaciones secundarias (Juárez et al., 1998). En la actualidad estamos desarrollando un programa de estudios paleomagnéticos en diferentes zonas de la cadena con el fin de caracterizar la extensión y edad de esta remagnetización. Uno de estos estudios, realizado con muy alta resolución en el borde norte de la cuenca Cameros demostró que la espesa secuencia de sedimentos continentales de edad cretácico inferior expuesta muestra una remagnetización de polaridad normal portada por hematites (Villalaín et al., 2003). A partir de los resultados de tests de pliegue y de conglomerado se pudo concluir que la remagnetización fue adquirida antes de la compresión terciaria y después de la mayor parte de la extensión que dio lugar a la formación de la cuenca (Berriasiense-Albiense). Teniendo en cuenta esta edad se ha propuesto una metodología para interpretar las direcciones de la reimanación sin-extensional. Este procedimiento permite determinar los basculamientos de las capas en el momento de la adquisición de la remanencia y, por tanto, definir la geometría original de la cuenca, posteriormente modificada por la inversión tectónica de la misma durante la deformación terciaria.

En la actualidad estamos continuando el trabajo en otras secciones de la cuenca de Cameros y en otras subcuenca de la Cordillera Ibérica y de la Cuenca Vasco-Cantábrica que presentan importantes espesores de la serie sin-rift mesozoica. Hemos extendido también el estudio a otras litologías y edades: *red beds* del Triásico (Bunsandstain), calizas marinas del jurásico y *red beds* del cretácico inferior, mostrándose todas ellas completamente remagnetizadas (a excepción de algunos afloramientos triásicos que, además, presentan la componente primaria). Las direcciones de esta remagnetización confirman el patrón observado en la cuenca de Cameros, mostrando una consistente geometría extensional previa al plegamiento terciario.

En este trabajo se muestra un estudio mineralógico y de magnetismo de las rocas de las distintas litologías remagnetizadas. Se han realizado experimentos de adquisición de la IRM, desmagnetización térmica de tres componentes de IRM y ciclos de histéresis. En cuanto a los estudios mineralógicos se ha realizado observación con microscópico por luz transmitida y reflejada de secciones pulidas, así microscopía electrónica de barrido y microanálisis EDS.

Referencias

- Juárez T., Lowrie W., Osete M.L. and Meléndez G., 1998. Evidence of widespread Cretaceous remagnetisation in the Iberian Range and its relation with the rotation of Iberia. *Earth and Planetary Science Letters* **160**: 729-743.
- Villalaín J.J., Fernández-González G., Casas A.M. and Gil-Imaz A., 2003. Evidence of a Cretaceous remagnetization in the Cameros Basin (North Spain): implications for basin geometry. *Tectonophysics*, **377**: 101-117.

Propiedades magnéticas de concreciones carbonatadas ligadas a escapes de gases en el talud continental del Golfo de Cádiz.

J.J. Villalaín, (1) M.P. Mata (2)

(1) Dep. Física. Universidad de Burgos. E. Politécnica Superior. Avda. Cantabria S/N. 09006 Burgos, Spain (villa@ubu.es).. (2) Dep. Geología. Fac. de CC. Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real, Cádiz, Spain

En los últimos años se han descubierto en el golfo de Cádiz, en zonas de emisión de fluidos fríos del talud continental, una serie de concreciones y costras carbonatadas, una gran parte de ellas tubulares. Aunque los estudios microbiológicos y de isótopos estables han indicado que la mayor parte de estas concreciones se formaron en relación con la liberación de metano en el suelo oceánico y la oxidación anaeróbica por microbios oxidantes de metano, se sabe aún muy poco sobre los mecanismos de conducción de estos fluidos a escala local o regional.

Las muestras estudiadas en este trabajo corresponden a las obtenidas con draga durante las campañas oceanográficas Anastasya 2000 y 2001, en los montículos submarinos Ibérico, Cornide y Fila de Hormigas, situados todos ellos en el entorno del Golfo de Cádiz. Las concreciones tienen diferentes formas y tamaños, desde irregular a nodular o tubular, con uno o más conductos centrales. Un número importantes de ellas tienen forma tubular de gran simetría y fueron inicialmente bautizadas con el nombre de "chimeneas". Recientemente se ha dado una explicación alternativa a estas estructuras interpretándolas como un sedimento cementado alrededor de madrigueras con importante bioturbación en un ambiente rico en metano.

Este estudio está incluido en el marco de un proyecto de colaboración entre grupos europeos en el que se está realizando una caracterización geoquímica completa de estos materiales. Uno de los principales objetivos es el conocimiento de los mecanismos de crecimiento de estas estructuras y la caracterización del flujo del metano. En este trabajo se ha realizado un estudio mineralógico y de magnetismo de las rocas en una selección de muestras con forma tubular, la mayor parte, y también tabular. Los estudios mineralógicos han consistido en análisis de difracción de rayos X (XRD), microscopía óptica y SEM. Los métodos de magnetismo de las rocas han sido desmagnetización térmica y por campos alternos de la NRM, adquisición de IRM y desimanación térmica de tres componentes de IRM así como medida de la anisotropía, tanto de la susceptibilidad magnética (ASM), como de la magnetización remanente anhisterética (ARM).

Los carbonatos autigénicos dominantes en estas estructuras son dolomita fundamentalmente y calcita, así como calcita con alto contenido en magnesio. Su textura general es de grano fino (micrita). En las muestras de Ibérico y Fila de Hormigas dominan los minerales de baja coercitividad, con la magnetita como mineral magnético dominante. Sin embargo se observa también una considerable contribución de hematites a la IRM. Aunque no se ha detectado un contenido significativo de hematites con XRD, este mineral ha sido detectado mediante imágenes SEM como producto de oxidación de la pirita llenando conchas de foraminíferos. También ha sido detectada la presencia de goethita en algunas caras externas de las "chimeneas". Por otra parte, en las muestras del afloramiento de Cornide, domina entre los minerales magnéticos el hematites con una contribución variable de magnetita.

La anisotropía de la susceptibilidad magnética se ha medido en submuestras cúbicas orientadas respecto del eje de simetría de las concreciones tubulares. La ASM indica una característica fábrica magnética sedimentaria, con un elipsoide oblato con plano de simetría perpendicular al eje de la estructura. Estos estudios preliminares excluyen que estas estructuras tubulares se formaran en un intenso flujo fluido y probablemente su orificio interior no fue un conducto de fluidos ricos en metano. La orientación del elipsoide de anisotropía

magnética sugiere una fábrica sedimentaria inalterada por un posible flujo, difuso en todo caso, que no reorientó los minerales magnéticos.