

Evidencias de facies rojas remagnetizadas en el Atlas Medio (Marruecos)

Evidence of remagnetized red-beds in the Middle Atlas (Morocco)

Pablo Calvin¹, Juan J. Villalain¹ y Abdelkader Mahmoudi²

¹ Dep. Física, U. Burgos, Escuela Politécnica Superior, Avda. Cantabria s/n 09006 Burgos, España. pcalvin@ubu.es, villa@ubu.es.

² Département de Geologie, Faculte des Sciences, Université Moulay-Ismaïl, BP 11201, Zitoune, Meknes, Marruecos. h.elouardi@fs-umi.ac.ma, geo_mahmoudi@yahoo.fr

ABSTRACT

A paleomagnetic study has been carried out in the boundary between the Folded Middle Atlas and the Tabular Middle Atlas, around Skoura and Tighboula synclines and Boulemane anticline. The goal of this work is to test the existence of a remagnetization affecting the sedimentary rocks in this area. For this purpose different stability tests were done: (i) two fold tests, one in the Boulemane anticline by studying five paleomagnetic sites located in Jurassic limestones, and the other in the Tighboula syncline in three sites from Cretaceous red-beds; (ii) a conglomerate test was done sampling a Cretaceous basal level and the overlying red-beds. The results of these tests show a synfolding remagnetization in the red-beds, whereas the magnetic signal of the limestones is too weak and it is not possible to isolate a magnetic component. Red-beds shows similar paleomagnetic properties than in other basins of the High Atlas (properties of the natural remanent magnetization, a probably NNW trend of the remagnetization and a systematic normal polarity), which could indicate a relationship between both.

Key-words: Middle Atlas, Cretaceous remagnetization, carbonates, red beds.

Geogaceta, 61 (2017), 87-90
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introduction

Los materiales sedimentarios infra-Albiense de las cuencas mesozoicas intraplaca, situadas en el dominio occidental del Tethys (Península Ibérica y NW de África), presentan una remagnetización de similares características y polaridad sistemáticamente normal (e.g. Galdeano *et al.*, 1989; Moreau *et al.*, 1992; Juárez *et al.*, 1998; Villalain *et al.*, 2003; Soto *et al.*, 2008; Torres-López *et al.*, 2014; Moussaid *et al.*, 2015). Esta remagnetización afecta tanto a materiales carbonatados como a capas rojas. En los primeros la remagnetización suele estar limitada a los sectores de la cuenca que más

subsistencia han registrado, desapareciendo hacia las zonas marginales (Torres-López *et al.*, 2014). Por el contrario, el grado de enterramiento no parece ser un factor limitante para que produzca un evento de remagnetización en las capas rojas (Moussaid *et al.*, 2015).

La remagnetización ha sido datada en el Alto Atlas Central (AAC) como Albiense-Cenomaniense (López-Torres *et al.*, 2014; Moussaid *et al.*, 2015) por comparación entre su dirección y la curva de deriva polar aparente para dicha localidad. En el caso de las cuencas ibéricas dicha curva presenta incertidumbres que no permiten aplicar este método a las diferentes cuencas ibéricas.

RESUMEN

Se ha realizado un estudio paleomagnético en el límite entre el Atlas Medio Plegado y el Atlas Medio Tabular, en el entorno de los sinclinales de Skoura y Tighboula y el anticlinal de Boulemane. La finalidad de este trabajo es tratar de reconocer una remagnetización que afecte a los materiales sedimentarios de dicha área. Para ello se han realizado diferentes test de estabilidad: (i) dos test del pliegue, uno en el anticlinal de Boulemane muestreando cinco estaciones paleomagnéticas en calizas jurásicas, y otro en el sinclinal de Tighboula, con tres estaciones en capas rojas del Cretácico Inferior; (ii) un test del conglomerado en un nivel basal del Cretácico. Los resultados de dichos test indican que en capas rojas la componente característica es una remagnetización sinpliegue, mientras que la señal magnética en las calizas es débil y no permite aislar ninguna componente paleomagnética. La similitud en el comportamiento paleomagnético de las capas rojas (propiedades de la magnetización remanente natural, probable dirección NNW de la remagnetización, polaridad normal sistemática) con la observada en cuencas de similares características del Alto Atlas podrían indicar que ambas remagnetizaciones están relacionadas.

Palabras clave: Atlas Medio, remagnetización cretácica, carbonatos, capas rojas.

Recepción: 15 de julio de 2016
Revisión: 3 de noviembre de 2016
Aceptación: 25 de noviembre 2016

A pesar de ello, se ha asignado una posible edad de remagnetización Albiense-Cenomaniense para la cuenca de Cameros (Villalain *et al.*, 2003) basada en los materiales a los que afecta y a la existencia de un pico térmico regional datado en 100 Ma. que afectó a la cuenca (~350 °C) (Mata *et al.*, 2001).

En el presente trabajo analizamos la magnetización remanente natural (NRM) de las calizas jurásicas y las capas rojas cretácicas en el Atlas Medio (AM), con la finalidad de conocer si están afectados por una remagnetización de características similares a las descritas en las cuencas sedimentarias del AAC.

Contexto Geológico

El Atlas Medio es una cadena intraplaca resultado de la inversión tectónica durante el Cenozoico de una cuenca extensional mesozoica (Mattauer *et al.*, 1977). Constituye la rama septentrional del sistema atlásico (Fig. 1A), situada en el antepaís meridional del Sistema Alpino Mediterráneo. El AM se extiende con dirección NE-SW a lo largo de 200 Km y 80 Km de anchura (Fig. 1A). La falla norte del Atlas Medio (FNAM), de dirección NE-SW, limita el AM Tabular del AM Plegado (Fig. 1B). Mientras que el primero se caracteriza por la presencia de materiales mesozoicos poco deformados y de basaltos cuaternarios, el AM Plegado está constituido por sinclinales abiertos limitados por anticlinales apretados asociados a fallas previas. La FNAM presentó actividad sinsedimentaria durante el Mesozoico, evidenciada por la presencia de diversas discordancias angulares y conglomerados con cantos de materiales mesozoicos, como en la base del Cre-

tácico (Barremiense) (Ensslin, 1992). Durante la inversión cenozoica la FNAM actuó con componente sinistra en un contexto transpresivo (Gomez *et al.*, 1998).

Según du Dresnay (1988) y Andreu *et al.* (1995), la cobertera sedimentaria mesozoica del AM consta de materiales triásicos de escaso espesor (aproximadamente 500 m) compuesto por lutitas rojas yesíferas y basaltos. Los materiales jurásicos, inicialmente carbonatados, pasando a margosos y finalmente a facies rojas, son relativamente homogéneos a lo largo del AM, si bien se observan variaciones de espesor entre las cubetas sinclinales y los anticlinales. Los materiales cretácicos afloran únicamente en el núcleo de los sinclinales y muestran gran heterogeneidad tanto en espesor como en facies debido a la tectónica extensiva sinsedimentaria. Los materiales cenozoicos son de carácter inicialmente marino, ligados a los núcleos de las cubetas sinclinales, dando paso a materiales detríticos continentales

asociados con la inversión cenozoica de la cuenca sedimentaria.

La zona de estudio se sitúa en los sinclinales de Skoura y Tighboula y el anticlinal de Boulemane, limitando con la FNAM (Fig. 1B).

Muestreo y metodología

Se han muestreado un total de doce estaciones paleomagnéticas en materiales del Jurásico y del Cretácico Inferior con la finalidad de caracterizar la NRM que portan los materiales; seis de ellas han sido muestreadas en calizas jurásicas, cinco (JB02 a JB06) en sendos flancos del anticlinal de Boulemane, y otra en la serie subhorizontal al norte de la FNAM (LB07). En las otras seis estaciones paleomagnéticas se han muestreado capas rojas del Cretácico Inferior: los conglomerados basales del Cretácico, compuestos por cantos de calizas jurásicas (KB08) y matriz lutítico-arenosa roja (KB09), las lutitas rojas suprayacentes (KB-10) y los flancos del cierre periclinal septentrional del sinclinal de Tighboula (KB11, KB12 y KB13).

Entre seis y ocho muestras de cada estación han sido desmagnetizadas térmicamente en el laboratorio de la Universidad de Burgos haciendo uso del magnetómetro criogénico 2G y el horno TD48-DC. Se han aplicado entre 13 y 25 pasos, con incrementos de la temperatura de 25 o 50 °C (dependiendo de las temperaturas). El proceso se continuó hasta 550 °C en las calizas y 675 °C en las capas rojas.

Las componentes paleomagnéticas fueron calculadas mediante el análisis de componentes principales (orientación y desviación angular máxima -MAD-) (Kirschvink, 1980). Las direcciones medias para cada estación paleomagnética fueron calculadas mediante estadística fisheriana (Fisher, 1953). Para este proceso se utilizó el software Remasoft 3.0 (Chadima y Hrouda, 2006).

Resultados

Desmagnetización de la NRM

Las calizas jurásicas presentan valores de la NRM en torno a 0.02-0.3 mA/m. Estos materiales no presentan una componente paleomagnética estable, aunque en algunas muestras es posible aislar una componente con temperaturas de desbloqueo entre 200 y 500 °C (Fig. 2A). Las direcciones calculadas presentan polaridad normal y gran dispersión en su dirección, pero con tendencia a situarse en el cuadrante estereográfico NW. Dichas direcciones paleomagnéticas presentan valores de MAD mayores

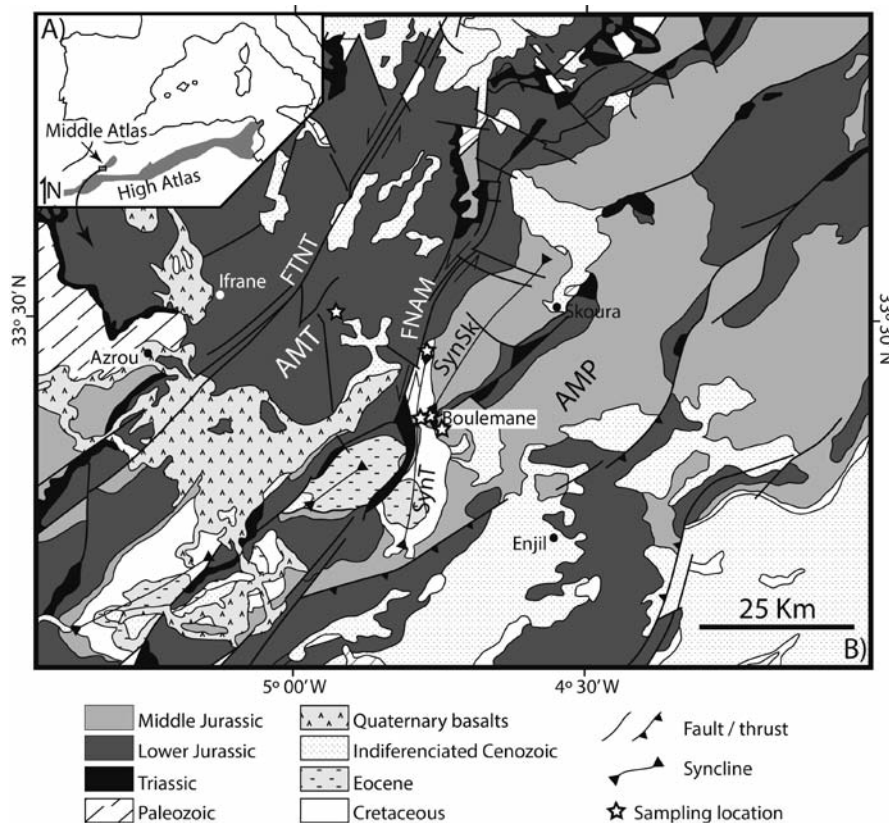


Fig. 1.- A) Situación geográfica del Atlas Medio en el contexto occidental mediterráneo y B) cartografía geológica sintética del área de estudio. Cada punto de muestreo puede corresponder con más de una estación paleomagnética. AMT: Atlas Medio Tabular; AMP: Atlas Medio Plegado; FTNT: falla de Tizi-n-Tretten; FNAM: falla norte del Atlas Medio; SynSk: sinclinal de Skoura; SynT: sinclinal de Tighboula.

Fig. 1.- A) Geographic context of the Middle Atlas in the west-Mediterranean area and B) geological sketch map of the study area. Each sampling location can correspond with more than one paleomagnetic site. AMT: Tabular Middle Atlas; AMP: folded Middle Atlas; FTNT: Tizi-n-Tretten fault; FNAM: North Middle Atlas fault; SynSk: Skoura syncline; SynT: Tighboula syncline.

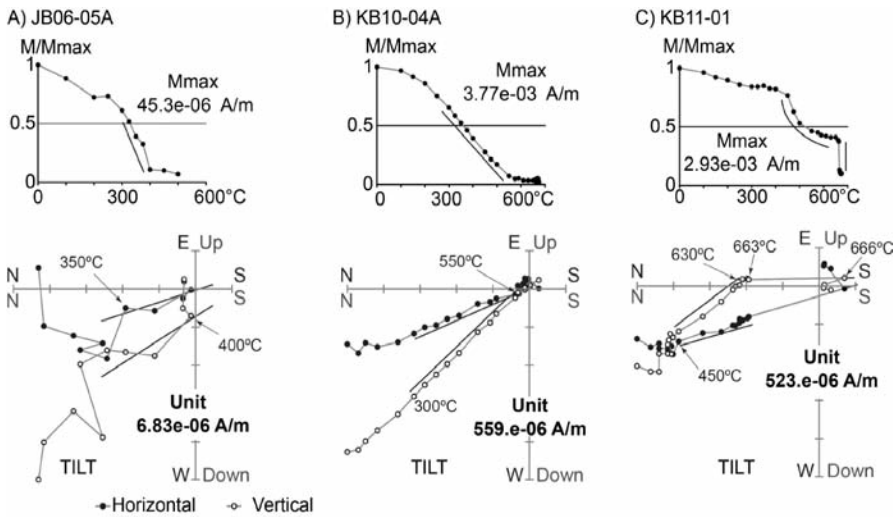


Fig. 2.- Diagramas ortogonales de la desmagnetización térmica de la NRM y gráficos de desmagnetización de tres muestras representativas. A) Caliza jurásica mostrando una componente mal definida. B) Capa roja monocomponente. C) Capa roja mostrando dos componentes. Los círculos con relleno oscuro están proyectados sobre el plano horizontal (N hacia la izquierda y E hacia arriba) y los de relleno blanco sobre el plano vertical N-S. Las rectas negras en los diagramas ortogonales muestran la componente calculada y tienen correspondencia con su respectivo gráfico de desmagnetización superior.

Fig. 2.- Orthogonal plot of NRM thermal demagnetization and demagnetization graphics of three representative samples. A) Jurassic limestone showing a bad defined component. B) Unicomponent red bed. C) Red bed with two components. Dark solid circles are projected on the horizontal plane (N towards the left and E upwards) and hollow circles on the vertical N-S plane. Black lines show the calculated component and correspond with the black line of the upper graphics

de 10° y no han podido aislarse en suficientes muestras por estación como para definir una dirección paleomagnética estable.

El comportamiento paleomagnético de las capas rojas es muy similar al descrito por Moussaid *et al.* (2015) en los materiales del Cretácico Inferior del sinclinal de Ait Attab, en el AAC. Muestran valores de la NRM de 0.6-4 mA/m. En la mayoría de las muestras ha podido definirse una dirección paleomagnética dentro del intervalo de temperatura de 250-600 °C, que hemos considerado como la componente característica química (ChRM). Mientras que las muestras de algunas estaciones sólo muestran la ChRM (Fig. 2B), en otras esta componente no se dirige al origen, pudiendo observarse una componente de alta temperatura (650-675 °C) (Fig. 2C) que sin embargo no ha podido ser aislada e interpretada. Los cantos calizos muestreados en el nivel de conglomerados cretácicos presentan un comportamiento paleomagnético similar a las calizas jurásicas, si bien las direcciones obtenidas en ellos presentan mayor dispersión.

Análisis de las direcciones paleomagnéticas

La ChRM fue sistemáticamente aislada en cuatro estaciones de capas rojas (Tabla I) (KB09, KB10, KB11 y KB12) en las que se pudieron definir direcciones medias que presentan pola-

ridad normal y direcciones NNW (Fig. 3). Su agrupamiento no mejora significativamente antes o después de aplicar la corrección tectónica. La matriz de los conglomerados cretácicos (KB09) y las lutitas rojas suprayacentes (KB10) presentan dirección N-NNW e inclinación intermedia. Por el contrario los cantos de caliza presentan direcciones dispersas indicando que, al menos estos, no están remagnetizados.

El test del pliegue incremental (Tauxe, 2010) se ha realizado sobre las direcciones obtenidas de las estaciones KB11 y KB12 en el sinclinal de Tighboula. El test muestra (Fig. 4) a priori que la magnetización es sinpliegue, aunque el intervalo de incertidumbre del test es muy amplio (17°-77° de despliegue) debido a la poca variación de buzamiento entre los flancos del pliegue y la gran dispersión de las direcciones de KB11.

Interpretación

Los resultados obtenidos en el análisis de la NRM, el análisis de direcciones y los test de estabilidad parecen indicar que las capas rojas están afectadas por una remagnetización. Sin embargo, esta no ha afectado a los materiales calizos como sí ocurre en el AAC (Torres-López *et al.*, 2014). Por ello, el test del conglomerado no es significativo, dado que la matriz (formada por material

similar al de las facies rojas) se ha podido remagnetizar, pero no los cantos de caliza, del mismo modo que no se han remagnetizado las calizas subyacentes de las que provienen dichos cantos. Esto es debido a que los mecanismos de remagnetización son diferentes en capas rojas y en carbonatos; mientras que el proceso en capas rojas es eficaz sin que el espesor de materiales suprayacentes sea un factor limitante, las rocas carbonatadas necesitan estar a una profundidad mínima de unos pocos kilómetros para que se desencadene un proceso remagnetizador (Villalain *et al.*, 2014).

Las limitaciones de este estudio dado el bajo número de muestras en las que se ha podido aislar la ChRM, así como la posibilidad de que los materiales estén afectados por rotaciones de eje vertical, impiden aplicar el método de intersección de círculos menores para calcular la dirección paleomagnética de la remagnetización (Waldhör y Appel, 2006; Villalain *et al.*, 2015). Sin embargo, las intersecciones de los cuatro círculos menores (Fig. 3) se encuentran bastante agrupadas, indicando una probable dirección de la remagnetización NNW e inclinación en torno a 40-45°, con polaridad normal. Esta dirección sería coherente con la hallada por Torres-López *et al.* (2014) y Moussaid *et al.* (2015) en el AAC, y que fue adquirida durante el Albicense-Cenomaniense durante el Supercron de polaridad normal del Cretácico. La polaridad normal sistemática que presentan las muestras apoya esta hipótesis. El hecho de que se observe cierto grado de agrupamiento en las interseccio-

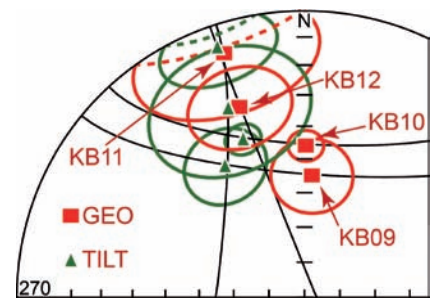


Fig. 3.- Proyección de equiareal de las direcciones paleomagnéticas medias de la componente característica hallada en las cuatro estaciones de facies rojas, antes y después de la corrección tectónica (GEO y TILT respectivamente). Los círculos menores que contienen ambas direcciones (GEO y TILT) también se han representado. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Equal-area projection of the mean direction of the characteristic remanent magnetization isolated in the four red-beds sites, before and after tilt correction (GEO and TILT respectively). Small circles which contain both directions (GEO and TILT) also were represented. See color figure in the web.

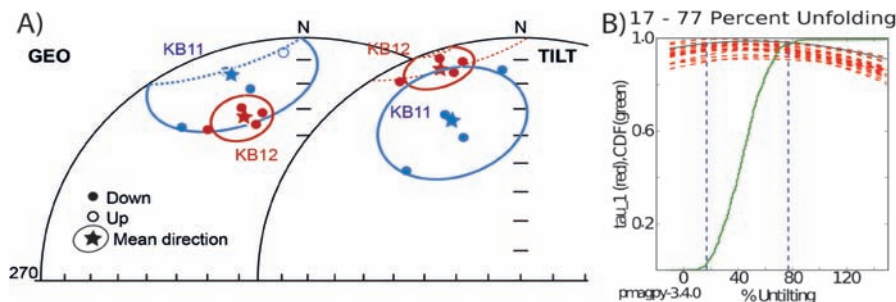


Fig. 4.- A) Proyección de igual área de las direcciones paleomagnéticas de la componente característica antes y después de la corrección tectónica (GEO y TILT respectivamente) procedentes de los especímenes medidos en los sitios KB11 y KB12, así como la dirección media para cada uno de los sitios y su correspondiente α_{95} . B) Test del pliegue incremental según Tauxe (2010), indicando que la magnetización es contemporánea al pliegue. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- A) Equal-area projection of the characteristic remanent magnetization direction before and after bedding correction (GEO and TILT respectively) from the sites KB11 and KB12 and mean direction and associated α_{95} of them. B) Incremental fold-test according Tauxe (2010) showing a syn-folding magnetization. See color figure in the web.

nes entre los cuatro círculos menores considerados (Fig. 3) indicaría la ausencia de rotaciones de eje vertical diferenciales entre dichas estaciones. Además, que la dirección de la remagnetización obtenida sea similar a las direcciones calculadas por otros autores para el Alto Atlas indicaría la ausencia total de rotaciones de eje vertical que pudieran estar asociadas al movimiento sinistral de la FNAM durante la convergencia alpina, que en caso de tener lugar, habrían producido una rotación antihoraria en las direcciones paleomagnéticas.

El test del pliegue incremental, sin ser totalmente concluyente, muestra una remagnetización sinpliegue. Esto es probablemente debido a que la remagnetización se adquirió afectando a materiales previamente deformados como consecuencia de la actividad tectónica sinsedimentaria mesozoica, y dichos materiales fueron otra vez deformados durante la inversión cenozoica. Sin embargo, esta interpretación únicamente es válida apoyándose en los estudios realizados por los autores anteriormente mencionados. En nuestro caso, dada la incertidumbre que presenta el test del pliegue no es factible realizar una reconstrucción de la estructura.

Conclusiones

Las capas rojas del Atlas Medio están afectadas por una remagnetización sinpliegue de polaridad sistemáticamente normal, con probable dirección NNW e inclinación de 40-45°. Basándonos en las similitudes entre el comportamiento paleomagnético de estas rocas y las estudiadas por otros autores en el Alto Atlas Central, interpretamos que esta remagnetización pudo adquirirse durante el Albiense-Cenomaniense. Sin embargo, las calizas no registran la remagnetización, indicando que no han sufrido un enterramiento importante durante su historia geológica. En este sentido, este trabajo prueba nuevamente que los materiales carbonatados necesitan unas condiciones de enterramiento mayores que las capas rojas para verse afectados por un proceso de remagnetización.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2012-38481 de la DGICYT, MINECO y por fondos FEDER de la Unión Europea. Pablo Calvin agradece la financiación obtenida de la beca F.P.I. del MINECO. Agradecemos los comentarios realizados por los revisores

Sitio	Longitud	Latitud	N/n	Declinación	Inclinación	Alpha	Estrat.
KB09	4° 44,598' W	33° 22,244' N	8/7	3,4/328,6	55,3/45,8	11,1	274/29
KB10	4° 44,656' W	33° 22,227' N	8/8	0,4/338,6	46,4/40,9	4,7	273/23
KB11	4° 46,371' W	33° 24,675' N	5/4	341,7/337,9	11,7/30,0	21,2	182/20
KB12	4° 46,371' W	33° 24,675' N	6/4	341,0/340,7	30,8/8,8	13,1	339/22

Tabla I.- Parámetros de magnetización remanente de la componente característica en coordenadas GEO/TILT. N/n: número de muestras desmagnetizadas / número de muestras usadas para calcular la dirección paleomagnética. La estratificación (Estrat.) está dada como dirección de buzamiento/ buzamiento. El datum de las coordenadas es WGS84.

Table I.- Remanent Magnetization Parameters for the Characteristic Component in GEO/TILT coordinates. N/n: number of measured samples / number of samples used to calculate the paleomagnetic direction. Bedding (Estrat.) is given as dip direction / dip. Coordinates are with WGS84 datum.

Cristina García Lasanta y Miguel Garcés, así como por los editores de la revista, que han ayudado a mejorar sustancialmente el trabajo.

Referencias

Andreu, B., Charrière, A., Magné, J., Tronchetti, G. y Vila, J.M. (1995). *Geobios* 28, 281-291.

Chadima, M. y Hrouda, F. (2006). Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Trav. Géophysiques* 27, 20-21.

du Dresnay, R. (1988). En: *The Atlas System of Morocco* (Jacobshagen, V. Ed.). Springer-Verlag, Berlin, 293-320.

Ensslin, R., (1992). *Geologische Rundschau* 81, 91-104.

Fisher, R.A. (1953). *Proceedings Royal Society London* 217A, 295-305.

Galdeano, A., Moreau, M.G., Pozzi, J.P., Berthou, P.Y. y Malod, J.A. (1989). *Earth and Planetary Science Letters* 92, 95-106.

Gomez, F., Allmendinger, R. y Barazangi, M., (1998), *Tectonics* 17, 520-533.

Juárez, M., Lowrie, W., Osete, M. y Meléndez, G., (1998). *Earth and Planetary Science Letters* 160, 729-743.

Kirschvink, J.L., (1980). *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62(3), 699-718.

Mata, M.P., Casas, A. M., Canals, A., Gil, A. y Pocovi, A. (2001). *Basin Research* 13, 91-111.

Mattauer, M., Tapponnier, P. y Proust, F. (1977). *Bulletin la Société géologique France* 19, 321-326.

Moreau, M.G., Canerot, J., Malod, J.A., (1992). *Bulletin la Société géologique France* 163, 393-402.

Moussaid, B., Villalaín, J.J., Casas-Sainz, A., El Ouardi, H., Oliva-Urcia, B., Soto, R., Román-Berdiel, T. y Torres-López, S. (2015). *Journal of Structural Geology* 70, 65-77.

Soto, R., Villalaín, J.J. y Casas-Sainz, A.M. (2008). *Tectonics* 27, TC1017.

Tauxe, L. (2010). *Essentials of Paleomagnetism*. University of California, Berkeley.

Torres-Lopez, S., Villalaín, J.J., Casas, A.M., EL Ouardi, H., Moussaid, B. y Ruiz-Martinez, V.C. (2014). *Journal Geological Society London*. 171, 673-687.

Villalaín, J., Fernández-González, G., Casas, A. y Gil-Imaz, A. (2003). *Tectonophysics* 337, 101-117.

Villalaín, J.J., Casas-Sainz, A.M. y Soto, R. (2015). *Geological Society London, Special Publications* 425.

Villalaín, J.J., Casas-Sainz, A., Bógalo, M.F., Rossi, C., Liesa, C., y Greca, I.M. (2014). In: *14th Castile Meeting*, Évora, Portugal.

Waldhör, M. y Appel, E. (2006). *Geophysical Journal International* 166, 33-45.