

# Restitución estructural por medio de direcciones paleomagnéticas en un cuerpo de gabro (macizo de Tirrhist, Alto Atlas central, Marruecos)

*Structural restoration using paleomagnetic directions in a gabbro body (Tirrhist Massif, Central High Atlas, Morocco)*

Pablo Calvin<sup>1</sup>, Vicente C. Ruíz-Martínez<sup>2</sup>, Juan J. Villalain<sup>1</sup>, Bennacer Moussaid<sup>3</sup> y Hmidou El Ouardi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos. Avda. Cantabria s/n, 09006 Burgos, España. pcalvin@ubu.es, villa@ubu.es

<sup>2</sup> Departamento de Geofísica y Meteorología, Facultad de Física, Universidad Complutense de Madrid. Avda. Complutense s/n, 28040 Madrid, España. vcarlos@fis.ucm.es

<sup>3</sup> Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, BP. 11201 Zitoune, Meknès, Marruecos. bnmous@hotmail.fr, hmidouelouardi@yahoo.fr

## ABSTRACT

The origin of the anticlines of the Central High Atlas (Morocco) is still debated due to the different processes involved in their formation. We show a paleomagnetic study in the Tirrhist anticline developed in Middle Jurassic gabbro bodies (8 sites). Principal component analysis led to the isolation of the characteristic remanent magnetization (ChRM) that shows low to intermediate coercivities and unblocking temperatures of 565°C and is carried by magnetite. The corresponding site-mean directions (with statistical parameters useful for tectonic purposes in most of the sites) are dispersed according to a small circle around an E-W trending axis. Therefore, the ChRM is used to restore the structure of the anticline at the time of blocking of the magnetization, shedding light on post-emplacement tectonic processes and allowing us to conclude that some of the actual deformation was originated before the moment of blocking the magnetization.

**Key-words:** Paleomagnetism, horizontal-axis rotations, Central High Atlas, gabbro, Jurassic.

## RESUMEN

La estructuración de los anticlinales del Alto Atlas Central es todavía materia de debate, debido principalmente a que son resultado de diferentes procesos. En este trabajo presentamos un estudio paleomagnético en el anticlinal de Tirrhist, desarrollado en gabros emplazados durante el Jurásico Medio (8 estaciones). El análisis de componentes principales ha permitido aislar la magnetización remanente característica en 5 de las 8 estaciones, que muestran coercitividads bajas a intermedias y temperaturas máximas de bloqueo de 565°C, siendo portada por magnetita. Las direcciones medias obtenidas de cada estación muestran una distribución a lo largo de un círculo menor de eje horizontal y de dirección E-W. Dicha distribución se interpreta en términos estructurales, usando dichas direcciones para restituir la estructura del anticlinal al momento del bloqueo de la magnetización estudiada y permitiéndonos concluir que parte de la deformación que se observa en la actualidad es previa al bloqueo de la magnetización.

**Palabras clave:** Paleomagnetismo, rotación de eje horizontal, Alto Atlas central, gabro, Jurásico.

Geogaceta, 58 (2015), 75-78  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 5 de febrero de 2015  
Fecha de revisión: 29 de abril de 2015  
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2015

## Introducción

La evolución tectónica de la cordillera del Alto Atlas Central (Marruecos; Fig. 1) es compleja y ampliamente discutida. La estructura de esta cadena está caracterizada por una serie de anticlinales apretados ENE-WSW que limitan amplios sinclinales. Clásicamente, la cordillera del Atlas se considera resultado de la inversión tectónica durante el Cenozoico de una cuenca mesozoica intraplaca (Mat-tauer *et al.* 1977; Frizon de Lamotte *et al.*, 2008 y referencias allí incluidas). Sin embargo, Torres-López *et al.* (2012) han puesto de manifiesto, mediante la restitución de una remagnetización cretácica que afecta a las rocas jurásicas del Alto Atlas (Torres-López *et al.*, 2014, 2015), que los anticlinales que surcan la cordillera se encontraban estructura-

dos al menos hace 100 Ma. Saura *et al.* (2014) observan relaciones tectono-sedimentarias en los materiales del Jurásico inferior y proponen la actividad de una tectónica salina que comenzaría a generar dichos anticlinales, produciendo altos sedimentarios que limitaban sub-cuencas. Por otro lado, Laville y Piqué (1992) proponen un evento de deformación temprana de carácter transpresivo, simultáneo a la intrusión de gran cantidad de rocas ígneas situadas en la actualidad en el núcleo de algunos de los anticlinales de la zona central de la cordillera. Este evento transpresivo sería el causante principal de la estructuración de los anticlinales, con desarrollo de foliación, asociada y limitada al entorno de dichos anticlinales con intrusiones ígneas. Por último, Michard *et al.* (2011) indican también la existencia de un

diapirismo tardío, coetáneo a la deformación Cenozoica.

Mediante un análisis paleomagnético de los gabros situados en el núcleo de uno de estos anticlinales (Macizo de Tirrhist), tratamos de aportar nueva información que ayude a valorar la importancia de los diferentes procesos generadores de dichas estructuras.

## Contexto geológico del macizo de Tirrhist

El magmatismo alcalino del Jurásico Medio está caracterizado por complejos intrusivos y flujos de lava basálticos (Frizon de Lamotte *et al.*, 2008 y referencias allí incluidas). El magma intruyó a través de fracturas verticales y finalmente se emplazó a presiones aproximadas de 1,5 Kbar (Lhachmi *et al.*,

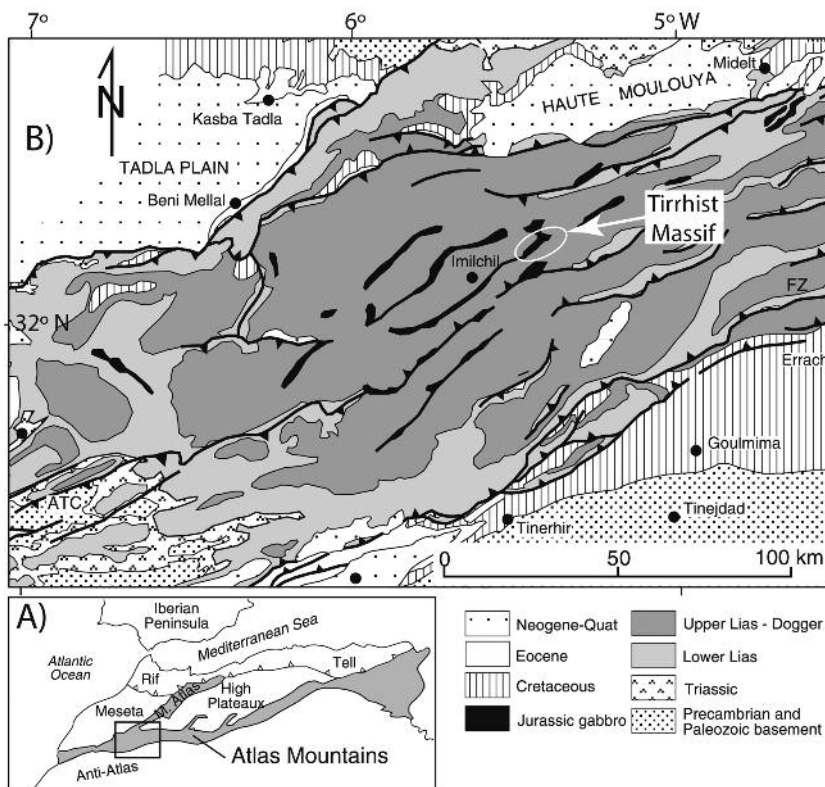


Fig. 1.- A) Situación del Alto Atlas Central. B) Mapa geológico del Alto Atlas Central mostrando la situación de los anticlinales NE-SW, en cuyo núcleo aparecen los cuerpos de gabros jurásicos. Modificado de Teixell *et al.* (2003).

Fig. 1.- A) Location of the Central High Atlas. B) Geological map of the Central High Atlas showing the NE-SW anticlines with Jurassic gabbro bodies in their core. Modified from Teixell *et al.* (2003).

2001), hace 145-160 Ma según dataciones K-Ar y Ar-Ar (Hailwood y Michael, 1971; Armando, 1999).

Actualmente, las rocas ígneas asociadas a este evento magmático, y concretamente los gabros que forman parte de la *suite* magmática (junto con otras rocas intermedias y ácidas), se encuentran en los núcleos de dichos anticlinales junto con materiales lutíticos y evaporíticos triásicos (Fig. 1). Es común el metamorfismo de contacto afectando a la roca encajante (Lhachmi *et al.*, 2001).

Por otro lado, es interesante destacar un trabajo paleomagnético pionero realizado en los gabros, desarrollado con la finalidad de obtener un polo paleomagnético para el Jurásico en África (Hailwood y Michael, 1971). Además de las dataciones K-Ar de los gabros antes mencionadas, estos autores consideraban que los gabros estudiados portaban una magnetización primaria asociada a su enfriamiento. Dichas rocas habrían sufrido deformación como bloques rígidos debido a la tectónica que generó variaciones en la inclinación de las direcciones obtenidas en los cuerpos de gabros con respecto a las provenientes de los diques asociados. Las direcciones de los gabros fueron incluidas en el cálculo del polo jurásico tras una corrección tectónica de

acuerdo con las unidades sedimentarias adyacentes.

El macizo de Tirrhist presenta una dirección general NE-SW a E-W, si bien presenta

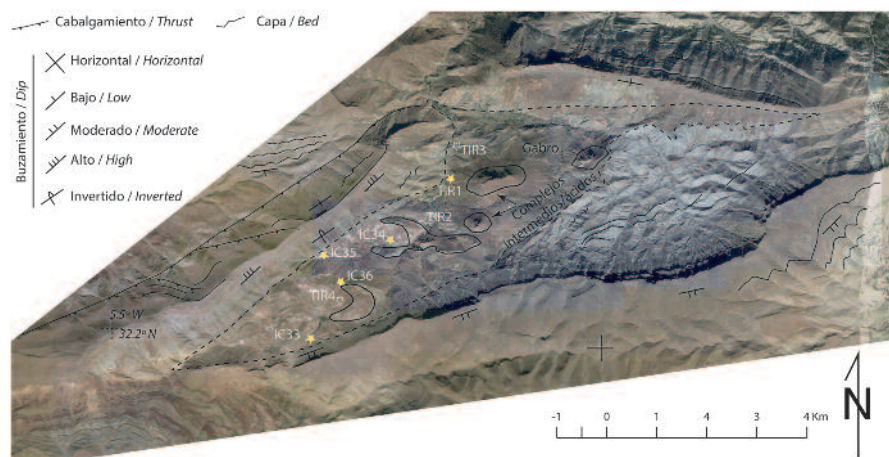


Fig. 2.- Imagen de satélite del anticlinal de Tirrhist mostrando la situación de las estaciones paleomagnéticas (estrellas rellenas representan las estaciones de las que se ha obtenido la dirección paleomagnética estable). Las líneas discontinuas indican el contacto entre el complejo ígneo y las calizas del Jurásico Medio; las líneas continuas indican el contacto entre las rocas intermedias/ácidas y los gabros. Nótese la presencia de tres flancos, y la orientación NE-SW del cuerpo ígneo, paralelo al flanco NW.

Fig. 2.- Satellite image of the Tirrhist anticline and location of the paleomagnetic sites (solid stars show the sites with a stable paleomagnetic component). The dashed lines are the contact between the igneous rocks and the Middle Jurassic limestones and the solid lines the contact between the intermediate/acid suite and the gabbro. Note the three limbs of the anticline, and the igneous body NE-SW parallel to NW limb.

variaciones en la dirección de cada uno de los flancos del anticlinal. El flanco S tiene orientación principalmente E-W, mientras que la parte occidental del flanco N es NE-SW y la oriental ESE-WNW (Fig. 2). El núcleo del anticlinal presenta una dirección principal NE-SW, paralelo al flanco NW, con cierta geometría sigmoidal. Dentro del núcleo se observan estructuras compresivas menores que pliegan las calizas triásico-jurásicas en dirección E-W o que superponen mediante fallas inversas diversos materiales contenidos en el núcleo. Las rocas ígneas intruyen rocas del Jurásico medio (Aalenense-Bajociense) y están compuestas por un complejo máfico (troctolitas y gabros), que a su vez es intruido por rocas intermedias y ácidas tardías, emplazadas con posterioridad al complejo máfico pero siendo respuesta al mismo evento ígneo (Beraâouz y Bonin, 1993).

### Muestreo y análisis paleomagnético

Para este trabajo se han muestreado 8 estaciones paleomagnéticas (Fig. 2) y en cada una de ellas se han obtenido 8 muestras mediante una perforadora de gasolina. Las muestras fueron orientadas *in situ* mediante un orientador solar y magnético y la desmagnetización de las mismas se llevó a cabo en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos usando el magnetómetro criogénico 2G 755.

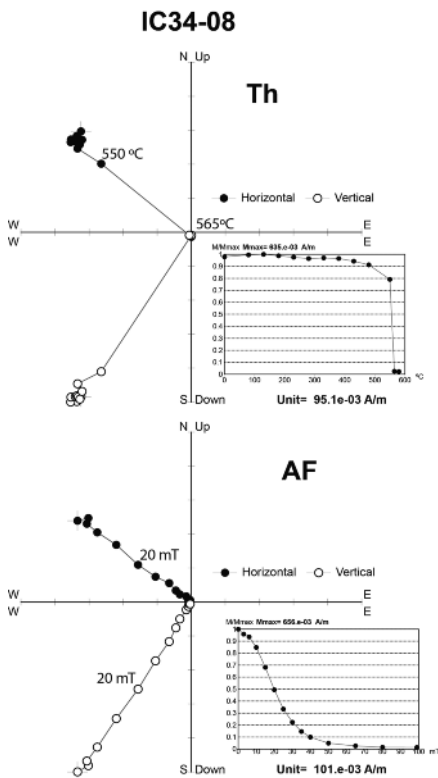


Fig. 3.- Diagramas de desmagnetización térmica (Th) y por campos alternos (AF) de la muestra IC34-08.

Fig. 3.- Thermal (Th) and alternating field (AF) demagnetization of the IC34-08 sample.

Las muestras fueron sometidas a desmagnetización térmica y/o por campos alternos decrecientes (según el comportamiento de cada una de ellas). Tras el análisis magnético las componentes paleomagnéticas fueron calculadas usando técnicas de regresión lineal y la distribución de las direcciones fue determinada usando la estadística propuesta por Fisher (1953).

La desmagnetización progresiva de las muestras (Fig. 3) indica la presencia de una componente característica estable de alta temperatura de desbloqueo (565°C máximo) y de coercitividad baja/intermedia (20-100 mT). Además, se han realizado diversos experimentos de magnetismo de rocas (curvas termomagnéticas, ciclos de histéresis, adquisición progresiva de remanencia isoterma y curvas de *back-field*), indicando de manera general la presencia de magnetita como mineral magnético dominante. Sin embargo, en algunas muestras, el comportamiento de las curvas de desmagnetización, así como los experimentos de magnetismo de rocas, parecen indicar la presencia de fases de óxido de hierro con cierto contenido de titanio, lo cual es esperable en este tipo de rocas con mineralogía magnética compleja. Según el estudio mineralógico de Beraouz y Bonin (1993), el

macizo plutónico de Tirrhist refleja diferentes fases evolutivas, con óxidos magmáticos como espinelas cromíferas, ilmenita y magnetita (y hematites en la paragénesis oxidada tardía). No obstante, la componente característica estable ha podido ser aislada en 5 de las 8 estaciones estudiadas.

Las direcciones calculadas para cada estación (Fig. 4A) muestran dispersión entre ellas y no coinciden con la dirección paleomagnética de referencia para el noroeste de África para el Mesozoico (obtenida a partir de Torsvik *et al.*, 2012).

Las tres estaciones de las que no se ha podido aislar la componente característica muestran comportamientos heterogéneos y diferentes a los que muestran aquellas en las que sí ha sido posible aislarla. TIR3 se desmagnetiza completamente a 450°C y la componente calculada hasta ese valor de temperatura presenta valores de error elevados. TIR2 y TIR4 presentan una componente de alta temperatura, pero con gran dispersión entre las direcciones calculadas para las distintas muestras. Por tanto, estas diferencias en el comportamiento impiden que puedan usarse dado que no es posible asegurar que se trate de la misma magnetización.

### Interpretación de la componente característica

Las direcciones paleomagnéticas muestran una notable dispersión, debida probablemente a deformación tectónica post-emplazamiento de las rocas ígneas, que presumiblemente también afecte a las rocas encajantes. Sin embargo, no han podido ser observadas relaciones claras entre los materiales ígneos muestreados y las rocas mesozoicas intruidas que aporten información sobre cómo restituir las direcciones paleomagnéticas halladas en los gabros, es decir, no conocemos el eje y la magnitud de rotación que han sufrido cada una de las estaciones analizadas. Sin embargo, cuando observamos la distribución de las direcciones paleomagnéticas *in situ* (Fig. 4A), podemos apreciar que ésta no es caótica, sino que se ajusta a un círculo menor con eje horizontal E-W en proyección estereográfica, que es la dispersión cónica que genera un vector cuando es rotado en torno a un eje (Villalain *et al.*, 2015). Así mismo, observamos que dicho círculo menor engloba la dirección paleomagnética del noroeste de África para 150 Ma (Fig. 4B), apoyando la hipótesis de que se trata de una componente primaria rotada según un eje horizontal de dirección E-W.

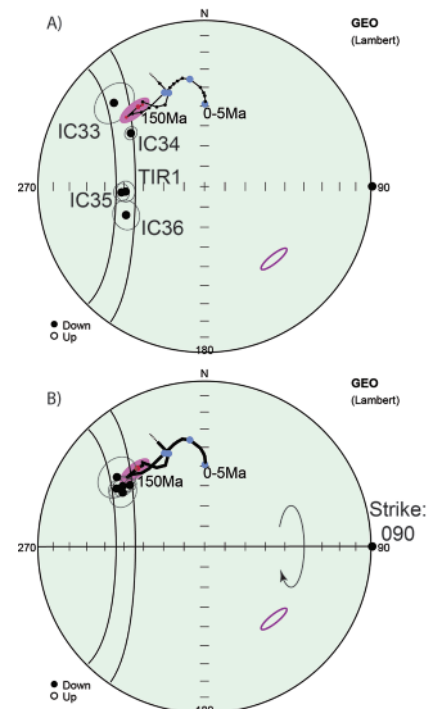


Fig. 4.- A) Proyección de las direcciones paleomagnéticas (puntos negros) y su error asociado. Se indican además las direcciones esperadas (puntos grises) para el Mesozoico y Cenozoico en el noroeste de África obtenidas a partir de la curva global de deriva polar aparente en coordenadas del NW de África (Torsvik *et al.*, 2012). La elipse muestra la dirección esperada para la edad de la intrusión de los gabros en crones de polaridad normal (relleno) e inversa (sin relleno). Podemos observar que las cinco direcciones paleomagnéticas, así como la dirección esperada para el Jurásico medio, se encuentran agrupados en torno a un círculo menor de eje E-W. B) Direcciones paleomagnéticas después de rotarlas mediante un eje horizontal E-W hasta la dirección de referencia jurásica. Nótese que todas las direcciones han de rotarse en sentido horario (mirando hacia el E) excepto IC33 que ha de rotarse en sentido anti-horario.

Fig. 4.- A) Stereoplot with the paleomagnetic directions (black points) and their associated errors. The expected directions (grey points) are also indicated for NW Africa according to the global apparent wander path in NW African coordinates (Torsvik *et al.*, 2012). The ellipse shows the expected direction for the gabbro intrusion ages with normal (filled) and reversed (hollow) polarities. Note that the five sites directions and the Middle Jurassic expected direction lie on a small circle. B) Paleomagnetic directions after rotation along horizontal E-W axis to the Jurassic reference direction. Note that all directions were rotated in clockwise sense (looking to the E) except IC33, which was rotated in counter-clockwise sense.

### Aplicación a la estructura y discusión

Por tanto, a pesar de no conocer de manera directa la rotación que han sufrido los bloques de gabro después del registro de la mag-

netización característica que estudiamos, podemos inferir a través del patrón de dispersión dicha deformación rotacional. Asimismo, vemos que es coherente con la dirección de la estructura del núcleo del anticlinal, así como con el flanco S y la parte oriental del flanco N. Debido a la cercanía de las estaciones IC35 e IC33 a los flancos NW y S, respectivamente (Fig. 2), podemos rotar dichos flancos usando el eje y magnitud de rotación usados para sendas estaciones (45° en sentido horario y 10° en sentido anti-horario respectivamente). La estratificación del flanco N junto a IC35 presenta una orientación [241, 124] (acimut y buzamiento de la capa, según la regla de la mano derecha, es decir invertidas buzando 66° al S), y tras realizar la rotación correspondiente a los gabros muestra una orientación [246, 83]. Aplicando el mismo proceso al flanco S, que presenta en la actualidad una menor inclinación, este pasa de presentar una orientación actual de [081, 37] a una paleo-orientación [078, 27]. Si asumimos que los gabros y los materiales de los flancos se han movido de manera conjunta, podemos inferir la paleo-estructura del anticlinal para el momento de la fijación de la magnetización remanente en los gabros, es decir, poco después de su emplazamiento y enfriamiento. Dicha paleo-estructura, claramente asimétrica, presentaría un flanco NW en posición subvertical y dirección NE-SW, paralela al afloramiento actual de las rocas ígneas en el núcleo del anticlinal, y el flanco S con valores de buzamiento inferiores a 30°. Extrapolando al flanco NE y dadas sus similitudes con el flanco S en cuanto orientación e inclinación, posiblemente se encontraría también con buzamientos bajos.

La similitud en orientación entre el flanco NW, su elevado paleo-buzamiento y la disposición paralela con los afloramientos de rocas ígneas, apoyan que parte de dicha deformación sea simultánea al emplazamiento de los cuerpos ígneos; la clara directriz estructural NE-SW tanto del flanco NW como del afloramiento de rocas ígneas, sugieren que el ascenso de las rocas ígneas se favoreciese por medio de una falla de basamento de la misma dirección. Sin embargo, tal y como evidencian Saura *et al.* (2014), las relaciones tectono-sedimentarias presentes alrededor de estos anticlinales (*onlaps*, abanicos de capas, etc.) afectando a los materiales del Jurásico inferior, evidencian que parte de la deformación es previa al emplazamiento de las rocas ígneas, siendo originada por procesos halocinéticos que elevaron las zonas centrales de los anticlinales. Sin embargo, en la actualidad no nos es posible determinar la importancia de cada

proceso en la deformación de las rocas encajantes. En todo caso, dado que tanto los flancos S y NE, como las estructuras encontradas en el núcleo y la rotación de los gabros indican una directriz estructural E-W, la disposición del flanco NW según la dirección NE-SW es heredada. Por todo ello, y asumiendo que las rocas encajantes del NW y las rocas ígneas se han movido de manera conjunta, puede excluirse que el elevado buzamiento de dicho flanco sea debido a un basculamiento posterior a la adquisición de la magnetización y probablemente también a la intrusión.

No obstante, para corroborar que las rocas ígneas se han movido de manera conjunta a las rocas sedimentarias que conforman el anticlinal, es necesario realizar un análisis paleomagnético en las rocas encajantes como el realizado por Torres-López *et al.* (2012), en el que se restituye la remagnetización cretácica que también podría afectar a esta área.

## Conclusiones

El análisis paleomagnético de los gabros situados en el núcleo del anticlinal de Tirrhist ha permitido aislar una componente característica en 5 de las 8 estaciones estudiadas. Estas cinco estaciones paleomagnéticas muestran un comportamiento magnético homogéneo, y la señal paleomagnética es portada por magnetita.

Las direcciones muestran una distribución que se agrupa en un círculo menor, indicando la rotación diferencial de las mismas en torno a un eje horizontal de dirección E-W. La comparación de las direcciones con la dirección esperada para el Jurásico Medio-Superior en esta región de África permite valorar la magnitud de la rotación que han sufrido los distintos afloramientos. La dirección del eje de rotación, E-W, es coherente con las direcciones estructurales encontradas en el núcleo del anticlinal; por el contrario, la disposición oblicua del flanco NW se debe a una dirección heredada, formada con anterioridad a que las rocas ígneas se enfriasen por debajo de la temperatura de bloqueo de la magnetita.

## Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido financiado mediante el proyecto CGL2012-38481 de la Dirección General de Investigación Científica y Técnica, Ministerio de Economía y Competitividad y fondos FEDER de la Unión Europea. Pablo Calvin disfruta de una beca FPI del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. Agradecemos encarecidamente el trabajo aportado

por Antonio Casas Sainz, ayudando a la maduración de este trabajo. Así mismo, agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos, que han enriquecido este trabajo.

## Referencias

- Armando, G. (1999). *Intracontinental alkaline magmatism: geology, mineralogy and geochemistry of the Jbel Hayim massif (central High Atlas-Morocco)*. Mémoires Géologiques Lausanne 31, 108 p.
- Berañouz, E.H. y Bonin, B. (1993). *Comptes Rendus Académie des Sciences* 317, 647-653.
- Fisher, R.A. (1953). *Society of London, Series A*, 217, 295-305.
- Frizon de Lamotte, Zizi, M., Missenard, Y., Hafid, M., El Azzouzi, M., Maury, R.C., Charrière, A., Taki, Z., Benami, M. y Michard, A. (2008). En: *Continental evolution: The Geology of Morocco* (A. Michard, O. Saddiqui, A. Chalouan, D. Frizon de Lamotte, Eds.). Lecture Notes in Earth Sciences 116, 133-202.
- Hailwood, E.A. y Mitchell, J.C. (1991). *Geophysics Journal Royal Astrophysics Society* 24, 351-364.
- Laville, E. y Piqué, A. (1992). *Geologische Rundschau* 81, 157-170.
- Lhachmi, A., Lorand, J.P. y Fabries, J. (2001). *Journal of African Earth Sciences* 32, 741-764.
- Mattauer, M., Tapponier, P. y Proust, F. (1977). *Bulletin de la Société Géologique de France* 19, 521-526.
- Michard, A., Ibouh, H. y Charrière, A. (2011). *Terra Nova* 23, 314-323.
- Saura, E., Vergés, J., Martín-Martín, J.D., Messenger, G., Moragas, M., Razin, P., Grélaud, C., Joussiaume, R., Malaval, M., Hornke, S. y Hunt, D.W. (2014). *Journal of the Geological Society, London* 171, 97-105.
- Teixell, A., Arboleya, M.L. y Julivert, M. (2003). *Tectonics* 22, 1051.
- Torres-López, S., Villalain, J.J., Casas, A., El Ouardi, H., Moussaid, B. y Ruiz-Martínez, V.C. (2012). En: *Contributions to Geophysics and Geodesy, Special Issue*, 116-117.
- Torres-López S., Villalain, J.J., Casas, A., El Ouardi, H., Moussaid B. y Ruiz-Martínez V.C. (2014). *Journal of the Geological Society, London* 171, 673-687.
- Torres-López, S., Villalain, J.J., Casas, A., El Ouardi, H., Moussaid, B. y Ruiz-Martínez, V.C. (2015). *Geogaceta* 57, 23-26.
- Torsvick, T.H., Van der Voo, R., Preeden, U., Mac Niocaill, C., Steinberger, Dobrovine, P.V., van Hinsbergen, D.J.J., Domeier, M., Gaina, C., Tøhver, R., Meert, J.G., McCausland, P.J.A. y Cocks, L.R.M. (2012). *Earth-Science Reviews* 114, 325-368.
- Villalain, J.J., Casas-Sainz, A.M. y Soto, R. (2015). En: *Paleomagnetism in Fold and Thrust Belts: New Perspectives* (E.L. Pueyo, F. Cifelli, A.J. Sussman, B. Oliva-Urcía, Eds.). London, Geological Society, Special Publications, 425.