

# Estudio de fábricas magnéticas en las Sierras Interiores (Pirineo Central) y su relación con la deformación a diferentes escalas

*Magnetic fabrics study in the Internal Sierras (Central Pyrenees) related to different-scale deformation*

Esther Izquierdo-Llavall<sup>1</sup>, Antonio Casas Sainz<sup>1</sup>, Belén Oliva-Urcia<sup>2</sup> y Emilio L. Pueyo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España. estheriz@unizar.es, acasas@unizar.es

<sup>2</sup> Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. C/ Francisco Tomás y Valiente 7, 28049 Madrid, España. belen.oliva@uam.es

<sup>3</sup> Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Zaragoza. C/ M. Lasala 44, 50006 Zaragoza, España. unaim@igme.es

## ABSTRACT

Magnetic fabrics (AMS) have been studied in the Upper Cretaceous units forming the Internal Sierras, in the Central Pyrenees. The Internal Sierras are affected by E-W to ESE-WNW-trending folds with axial planar cleavage that deform a previously developed thin-skinned thrust system. Our goal is to relate magnetic fabrics results to the deformation history of the area, taking into account that AMS is an extremely sensitive deformation marker that could register tectonic events that are not easy to identify at the mesoscopic scale. From the whole dataset we observed that magnetic lineations are dominantly subvertical in geographic coordinates. In 16% of the sites, these subvertical magnetic lineations are clearly within the cleavage plane and evidence the stretching direction during regional cleavage development. *K*min axes show a substantial dispersion but can be divided into two groups: (1) *k*min axes forming a N-S-striking, subvertical girdle, that correspond to pre-folding magnetic foliations and (2) subhorizontal *k*min axes with an E-W to NE-SW-trending maximum that could be result of a mixture of inverse magnetic fabrics and late tectonic, post-cleavage magnetic ellipsoids.

**Key-words:** Magnetic fabrics, Internal Sierras, deformation, cleavage, Central Pyrenees.

## RESUMEN

El presente estudio recoge los resultados del estudio de la fábrica magnética (ASM) del Cretácico Superior de las Sierras Interiores (Pirineo Central). Las Sierras Interiores están afectadas por pliegues con foliación de plano axial, de dirección E-W a ESE-WNW, que deforman a un sistema de cabalgamientos previo (sistema de Larra-Monte Perdido). Nuestro objetivo es correlacionar las fábricas magnéticas con la historia deformacional de este sector, teniendo en cuenta que la ASM es un marcador de la deformación muy sensible y puede registrar fases tectónicas difíciles de identificar a partir de estudios mesoestructurales. Los datos de ASM indican un máximo de lineaciones magnéticas subverticales en coordenadas geográficas. En el 16% de las estaciones de muestreo, esta lineación subvertical está contenida en el plano de foliación y evidencia la orientación de la lineación de estiramiento dominante durante el desarrollo de la foliación. Los ejes *k*min pueden dividirse en dos grupos: (1) ejes distribuidos en un plano subvertical de dirección N-S, que corresponden con foliaciones magnéticas plegadas según la dirección dominante en las Sierras Interiores y (2) ejes *k*min subhorizontales con un máximo de dirección E-W a NE-SW, que pueden estar relacionados con una mezcla de fábricas magnéticas inversas y elipsoides asociados a un evento tectónico tardío, posterior al desarrollo de la foliación.

**Palabras clave:** Fábricas magnéticas, Sierras Interiores, deformación, foliación, Pirineo Central.

Geogaceta, 58 (2015), 95-98  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 8 de febrero de 2015  
Fecha de revisión: 29 de abril de 2015  
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2015

## Introducción

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) es una medida indirecta de la orientación preferente de los granos o redes cristalinas de los minerales que forman una roca. En rocas deformadas, la fábrica magnética actúa como marcador de la deformación interna, tratándose de una técnica muy sensible, capaz de registrar eventos de deformación que no desarrollan estructuras a nivel mesoscópico (Parés *et al.*,

1999; Soto *et al.*, 2009; Larrasoña *et al.*, 2011). La fábrica magnética se expresa como un elipsoide cuyos tres ejes (*k*max, *k*int y *k*min) representan las direcciones de susceptibilidad máxima, intermedia y mínima y se define a partir de la lineación (eje *k*max) y la foliación magnética (plano perpendicular al eje *k*min). En regímenes compresivos, la foliación magnética rota desde el plano de estratificación o laminación sedimentaria ( $S_0$ ) hacia el plano de foliación tectónica o aplastamiento ( $S_1$ ). La lineación

magnética adquiere diferentes orientaciones. En función del grado de deformación, puede ser paralela a los ejes de pliegues, a la dirección de transporte de los cabalgamientos, a la lineación de intersección entre estratificación y foliación  $S_0 \wedge S_1$  o a la lineación de estiramiento desarrollada sobre el plano de aplastamiento (Parés *et al.*, 1999; Pueyo-Anchuela *et al.*, 2010; Pocoví *et al.*, 2014).

El presente trabajo estudia la fábrica magnética registrada por las unidades cre-

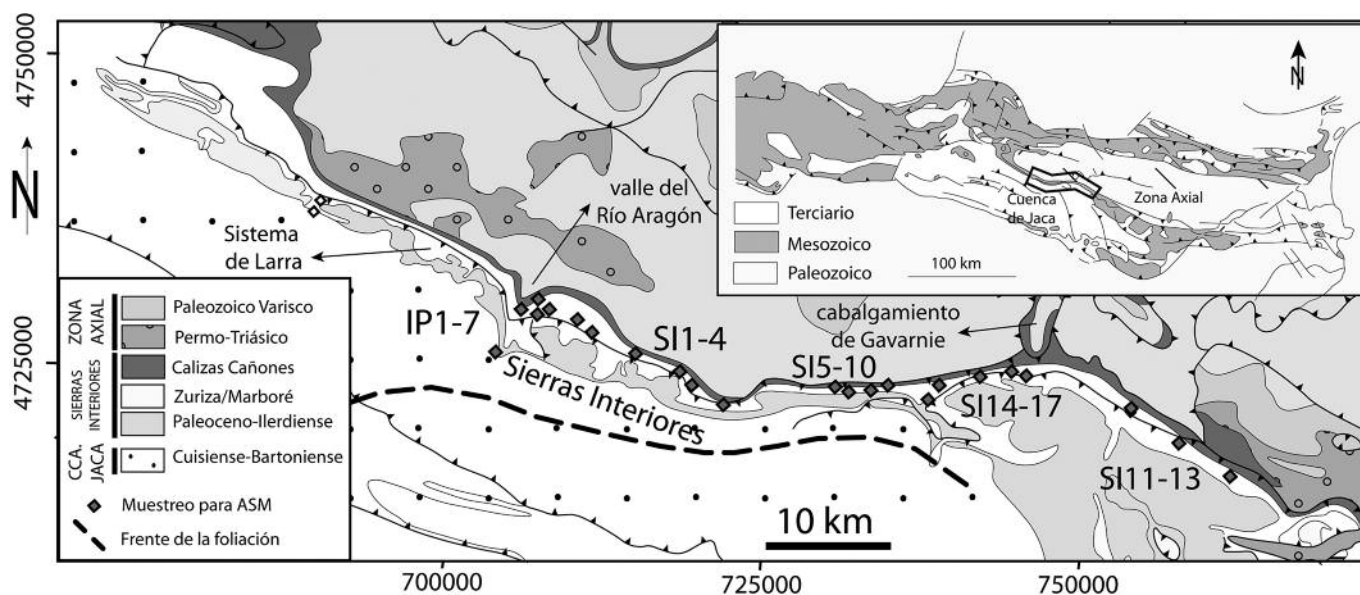


Fig. 1.- Ubicación de la zona de estudio con indicación de la posición de las estaciones muestreadas.

Fig. 1.- Location of the study area and the sampling sites considered in this work.

táticas del sector centro-oriental de las Sierras Interiores, en la Zona Surpirenaica (Fig. 1). Este sector está afectado por pliegues asociados a foliación y cabalgamientos de vergencia sur (Teixell, 1996). El principal objetivo de este estudio es definir la relación entre la fábrica magnética y los elementos estructurales reconocidos en las Sierras Interiores. Estudios anteriores han analizado unidades análogas hacia el Oeste de la zona muestreada en este trabajo (Oliva-Urcia *et al.*, 2009; Pueyo-Anchuela *et al.*, 2013), que nos permitirán evaluar la existencia de variaciones longitudinales en las fábricas magnéticas de este sector del Pirineo, que se extiende en torno a 95 km en dirección WNW-ESE.

## Contexto geológico

Las Sierras Interiores están situadas en el sector septentrional de la Zona Surpirenaica (Pirineo central), por encima de los materiales paleozoicos de la Zona Axial (Fig. 1). Están formadas por tres unidades estratigráficas principales (Teixell, 1992; Fig. 1): (1) las Calizas de los Cañones (Cenomaniense - Santoniense), (2) las Areniscas de Marboré y Margas de Zuriza (Campaniense - Maastrichtiense) y (3) los carbonatos del Paleoceno - Ilerdiense. Hacia el Sur aflora la potente serie turbidítica de la Cuenca de Jaca, de edad eocena (Grupo Hecho).

La estructura alpina de las Sierras Interiores es resultado de la superposición de dos fases tectónicas (Labauve *et al.*, 1985; Teixell, 1996): (1) el desarrollo del sistema

de cabalgamientos de Larra-Monte Perdido, que afecta a la parte superior de la serie cretácica, al Paleoceno y a la parte basal de las turbiditas y tiene una dirección de transporte hacia el SSW, y (2) el desarrollo de pliegues con foliación de plano axial, de dirección ESE-WNW y vergencia Sur, que deforman el sistema de cabalgamientos previo. Los pliegues afectan a la totalidad de la serie estratigráfica y están relacionados con el emplazamiento de la lámina de Gavarnie, que involucra unidades del zócalo paleozoico. La lámina de Gavarnie lleva asociada un amplio anticlinal de bloque superior que presenta geometría de pliegue de adaptación (Teixell, 1996). La unidad de Sierras Interiores está situada en el flanco frontal de este anticlinal, que tiene buzamientos variables hacia el Sur.

Hacia la parte oriental de las Sierras Interiores, el bloque inferior de la unidad de Gavarnie está afectado por dos importantes cabalgamientos de basamento, Bielsa y Guara-Gèdre (Román-Berdiel *et al.*, 2004; Millán-Garrido *et al.*, 2006).

## Metodología

Han sido muestreadas un total de 23 nuevas estaciones (369 especímenes estándar) distribuidas longitudinalmente a lo largo de la estructura de las Sierras Interiores (Fig. 1). Las estaciones muestreadas corresponden siempre a margas y calizas margosas de las unidades Areniscas de Marboré y Margas de Zuriza. Los especímenes muestreados han sido analizados mediante un

susceptómetro KLY-3S de AGICO, en el laboratorio de fábricas magnéticas de la Universidad de Zaragoza.

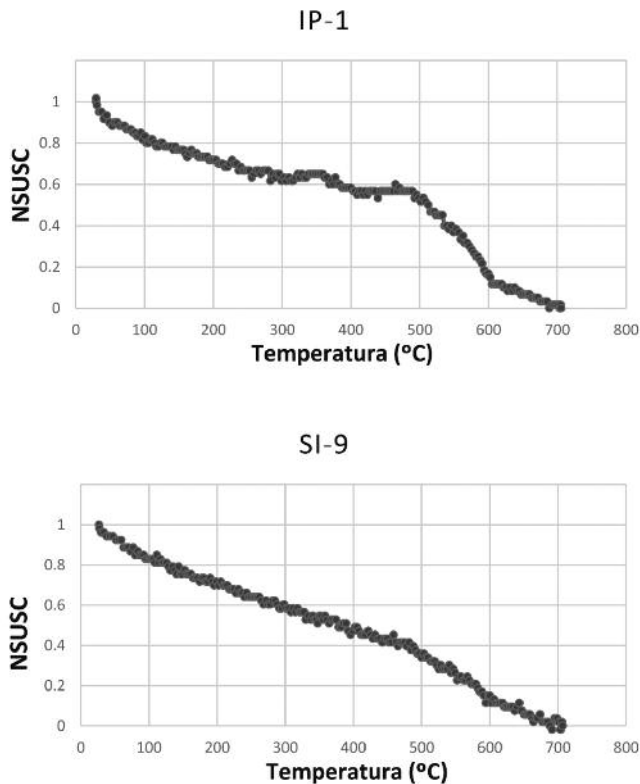
Han sido además realizadas un total de 15 curvas termomagnéticas (variación de la susceptibilidad con la temperatura), entre 40 y 700 °C, con objeto de identificar de manera preliminar los minerales portadores de la susceptibilidad magnética. Las curvas termomagnéticas han sido realizadas con el susceptómetro KLY-3S en combinación con el horno CS3 de AGICO.

## Resultados

Los valores promedio de la susceptibilidad magnética en las estaciones muestreadas varían entre 40 y  $209 \cdot 10^{-6}$  S.I., con un valor medio de  $118 \cdot 10^{-6}$  S.I. Las curvas termomagnéticas (Fig. 2) indican la presencia de una fracción importante de minerales paramagnéticos, que pueden reconocerse por la presencia de caídas de tipo hipérbola en la susceptibilidad magnética entre los 40 y los 300-400 °C. Es también habitual el registro de caídas bruscas de la susceptibilidad en torno a los 580-600 °C que indican la existencia de magnetita en las muestras.

La orientación de los ejes  $k_{max}$ ,  $k_{int}$  y  $k_{min}$  varía en las diferentes estaciones y puede agruparse en cuatro tipos principales de elipsoides magnéticos:

- (1) Elipsoides tipo 1 (25% de las estaciones, Fig. 3A) en los que  $k_{min}$  es perpendicular a la estratificación y  $k_{max}$  está contenido en ella, con orientaciones variables
- (2) Elipsoides tipo 2 (28% de las esta-



ciones, Fig. 3B) con ejes  $k_{min}$  perpendiculares o subperpendiculares a la foliación y ejes  $k_{max}$  contenidos en ella

(3) Elipsoides de tipo 3 (13% de las estaciones, Fig. 3C), con el eje  $k_{min}$  paralelo a la lineación de intersección entre estratificación y foliación y el eje  $k_{max}$  perpendicular a uno de estos dos planos

(4) Elipsoides tipo 4 (17% de las estaciones, Fig. 3D) en los que  $k_{min}$  es subhorizontal y tiene una dirección NE-SW, independiente de la dirección de estratificación y foliación

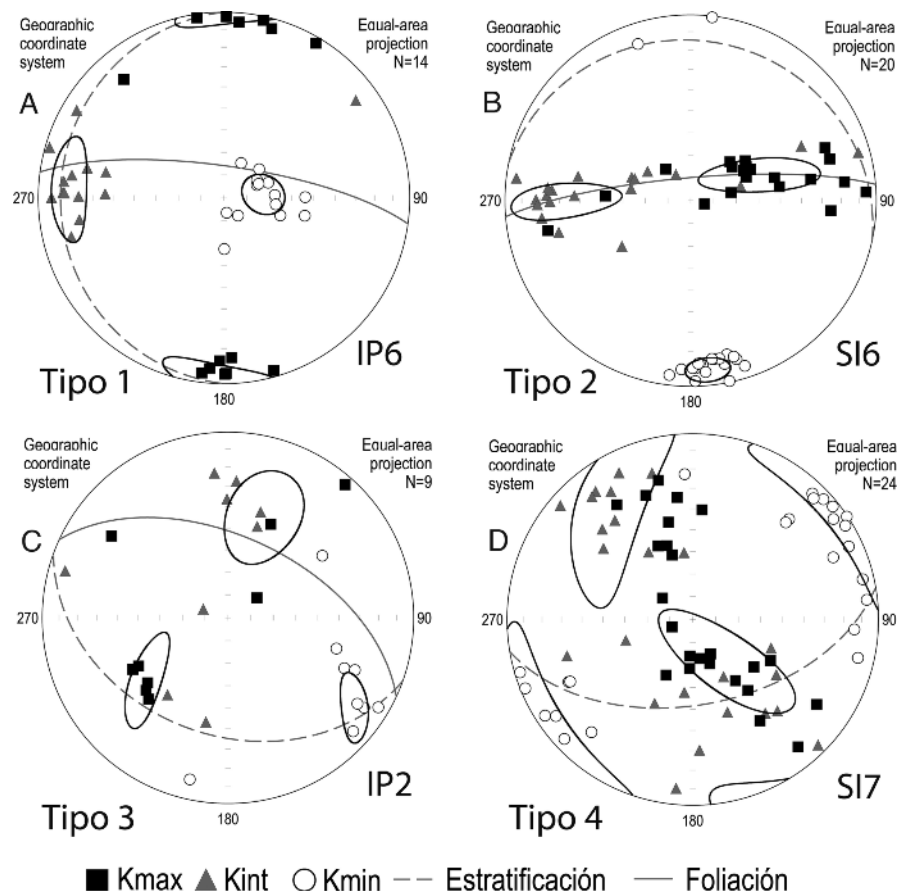
La observación conjunta del total de muestras (en coordenadas geográficas) pone de manifiesto que, a pesar de que existe una dispersión considerable de los datos, dominan los ejes  $k_{max}$  verticales o subverticales (Fig. 4). En el caso de  $k_{min}$ , existen dos subpoblaciones diferenciadas: (1) ejes  $k_{min}$  subhorizontales, con un máximo en la dirección NE-SW y (2) ejes  $k_{min}$  distribuidos en una guirnalda de dirección N-S que es subperpendicular a la orientación WNW-ESE de los ejes de los pliegues que afectan a las Sierras Interiores.

**Discusión**

A pesar de que en varias estaciones el elipsoide de la susceptibilidad magnética está vinculado al plano de la estratificación, existe una clara influencia de la compresión

alpina sobre las fábricas magnéticas registradas en las Sierras Interiores: son abundantes los elipsoides en los que la foliación magnética es paralela al plano de foliación y la lineación magnética está contenida en dicho plano o es paralela a los ejes de pliegues, la dirección de transporte tectónico o la lineación de intersección entre estratificación y foliación.

En el sector más occidental de la zona muestreada (valle del Aragón) destaca la presencia de varias estaciones en las que  $k_{max}$  es subhorizontal o presenta una suave inclinación hacia el Norte, con direcciones N-S a NNE-SSW (Fig. 3A). Pueden interpretarse como lineaciones magnéticas asociadas al desarrollo del sistema de cabalgamientos de Larra-Monte Perdido. Se trataría de fábricas relativamente tempranas en la historia deformacional de las Sierras Interiores, que rotarían de forma pasiva durante el emplazamiento de la lámina de Gavarnie y el basculamiento hacia el Sur de la serie cretácica. La orientación de los ejes  $k_{max}$  es similar a la registrada de forma re-



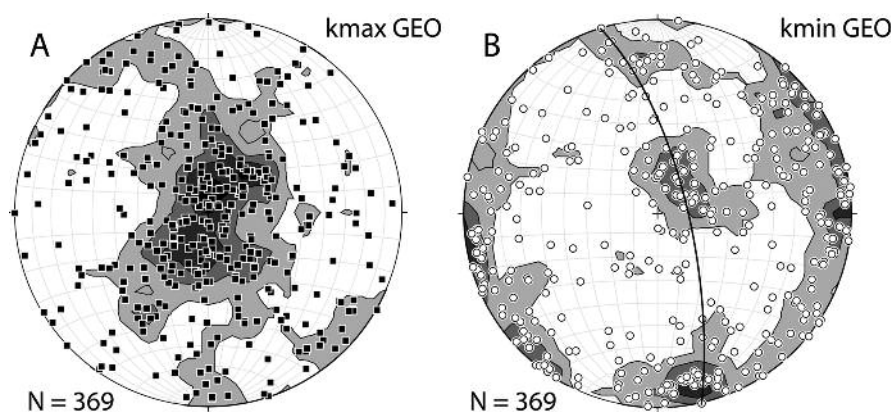


Fig. 4.- Estereograma (en coordenadas geográficas) y diagrama de densidad (intervalo de contornos = 2%) para el conjunto de ejes A) kmax y B) kmin obtenidos en las muestras procedentes de Sierras Interiores. En el caso de kmax existe un máximo subvertical; para kmin se observa una mayor dispersión de los datos, con dos subgrupos: (1) ejes kmin distribuidos en un plano subvertical de dirección N-S, que es subperpendicular a los ejes de pliegues afectando a las Sierras Interiores y (2) ejes kmin subhorizontales con un máximo de dirección E-W a NE-SW.

Fig. 4.- Equal-area plot and density diagram (contour interval = 2%) for the whole dataset of in situ A) kmax and B) kmin axes in the samples from the Internal Sierras. For kmax we observe a subvertical maximum; for kmin there is a higher dispersion but two groups could be distinguished: (1) kmin axes along a N-S, subvertical plane that is subperpendicular to fold axes affecting the Internal Sierras and (2) subhorizontal kmin axes with an E-W to NE-SW-oriented maximum.

gional (Oliva-Urcia *et al.*, 2009) o más localmente (Pueyo-Anchuela *et al.*, 2010) en estudios previos.

Otro aspecto interesante en las fábricas magnéticas obtenidas en las Sierras Interiores es la presencia de ejes kmin subhorizontales. En algunos casos, estos ejes kmin son paralelos a la lineación de intersección entre estratificación y foliación (Fig. 3C) y podrían ser consecuencia de complicaciones mineralógicas debidas a la presencia de fábricas inversas en la magnetita (Rochette *et al.*, 1992). Por el contrario, la existencia ocasional de ejes kmin subhorizontales de dirección NE-SW (Fig. 3D), no asociados a los planos de estratificación ni foliación, podría reflejar la influencia tardía sobre la fábrica magnética de estructuras NW-SE del basamento que deforman a la lámina de Gavarnie (Bielsa y Guara-Gedrè; Izquierdo-Llavall *et al.*, 2015). En este último caso, se trataría de una deformación post-foliación, con entidad suficiente para modificar la fábrica magnética, pero no para generar una segunda foliación tectónica oblicua respecto a la foliación general. No obstante, teniendo en cuenta los resultados obtenidos por Oliva-Urcia *et al.* (2009), sería necesario la realización de análisis de subfábricas magnéticas asociadas a minerales paramagnéticos y ferromagnéticos con ob-

jeto de descartar posibles fábricas superpuestas.

## Conclusiones

El análisis de la fábrica magnética en las unidades cretácicas (Areniscas de Marboré y Margas de Zuriza) de las Sierras Interiores permite reconocer orientaciones variables para la foliación y la lineación magnética. En el caso de la foliación magnética, pueden reconocerse dos grupos de ejes kmin: (1) ejes distribuidos en un plano subvertical, de dirección N-S, que están plegados según la dirección dominante en las Sierras Interiores (ESE-WNW) y (2) ejes subhorizontales, con un máximo de dirección E-W a NE-SW que podría estar relacionado con una mezcla de fábricas magnéticas inversas (elipsoides de tipo 3, Fig. 3C) y de elipsoides asociados a un evento tectónico tardío, posterior al desarrollo de la foliación (elipsoides de tipo 4, Fig. 3D). En cuanto a la lineación magnética, destacan (1) lineaciones tempranas, paralelas a la dirección de transporte de los cabalgamientos del sistema de Larra, hacia el Oeste de la zona estudiada, y (2) lineaciones subverticales o con alta inmersión, dominantes en el sector muestreado en el presente estudio. Estas lineaciones están

en algunas estaciones relacionadas con el desarrollo de la foliación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda durante el muestreo de Elisa Sánchez, Cristina García, Pablo Calvín, Pablo Santolaria, Roi Silva y Miguel Gallego. El trabajo ha sido financiado con los proyectos CGL2009-08969 y CGL2006-05817 (Ministerio de Educación). Agradecemos también las constructivas revisiones de Néstor Vegas y Ruth Soto.

## Referencias

- Izquierdo-Llavall, E., Casas-Sainz, A., Oliva-Urcia, B., Burmester, R., Pueyo, E.L. y Housen, B. (2015). *Geophysical Journal International*, 10.1093/gji/ggv042
- Labaume, P., Séguret, M. y Seyve, C. (1985). *Tectonics* 4, 661-685.
- Larrasoaña, J.C., Gómez-Paccard, M., Giral, S. y Roberts, A.P. (2011). *Tectonophysics* 507, 16-25.
- Millán-Garrido, H., Oliva-Urcia, B. y Pocoví-Juan, A. (2006). *Geogaceta* 40, 35-38.
- Oliva-Urcia, B., Larrasoaña, J.C., Pueyo, E.L., Gil, A., Mata, P., Parés, J.M. y Pueyo, O. (2009). *Journal of Structural Geology* 31, 163-176.
- Parés, J.M., van der Pluijm, B.A. y Dinarès-Turell, J. (1999). *Tectonophysics* 307, 1-14.
- Pocoví, A., Pueyo-Anchuela, Ó., Pueyo, E.L., Casas-Sainz, A., Román-Berdiel, T., Gil Imaz, A., Ramajo Cordero, J., Mochales, T., García-Lasanta, C., Izquierdo-Llavall, E., Parés, J.M., Sánchez, E., Soto, R., Oliván, C., Rodríguez-Pintó, A., Oliva-Urcia, B. y Villalaín, J. (2014). *Tectonophysics* 629, 303-318.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Pocoví-Juan, A. y Gil-Imaz, A. (2010). *Tectonophysics* 492, 150-163.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Casas-Sainz, A., Pueyo, E.L., Pocoví-Juan, A. y Gil-Imaz, A. (2013). *Terra Nova* 25, 307-314.
- Rochette, P., Jackson, M. y Aubourg, C. (1992). *Reviews of Geophysics* 30, 209-226.
- Román-Berdiel, T., Casas, A.M., Oliva-Urcia, B., Pueyo, E.L. y Rillo, C. (2004). *Journal of Structural Geology* 26, 659-677.
- Soto, R., Larrasoaña, J.C., Arlegui, L. E., Beamud, E., Oliva-Urcia, B. y Simón, J.L. (2009). *Journal of Structural Geology* 31, 512-522.
- Teixell, A. (1992). *Estructura alpina en la transversal de la terminación occidental de la Zona Axial pirenaica*. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 252 p.
- Teixell, A. (1996). *Journal of the Geological Society, London* 153, 301-310.