

# Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética y direcciones de flujo en diques recientes. Complejos volcánicos de las Islas Corvo y Flores (Azores Occidentales, Placa Norteamericana)

*Anisotropy of Magnetic Susceptibility and flow directions in recent dykes. Volcanic complex of Corvo and Flores Islands (Western Azores, North-American plate)*

Óscar Pueyo Anchuela <sup>(1)</sup>, Andrés Gil Imaz, Marceliano Lago San José <sup>(1)</sup> Zilda França <sup>(2)</sup> y Victor Hugo Forjaz <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Investigación Geotransfer. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza (España)

<sup>(2)</sup> Universidade dos Açores & Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores, São Miguel (Azores, Portugal)

## ABSTRACT

Different models of relation between flow and Anisotropy of Magnetic Susceptibility axis have been postulated. The main models link the magnetic foliation with the dyke wall, where the magnetic lineation is parallel to the flow direction or where the magnetic foliation develops an imbrications disposition respect the dyke wall. At a first approximation the main differences resides in the turbulence caused by the dyke walls during the flow. In this work is presented a systematic sampling along different Quaternary dykes (Western Azores) that show both models within the same dykes, differing in the position on it: imbrication models developed in the borders and magnetic lineation parallel to the flow direction in the center of the dyke. However, some dykes only show magnetic lineation parallel to the flow without any imbrication pattern. In these cases the magnetic parameters show the same trends, at different scale, between dykes with only one or two kind of fabrics. The magmatic flow direction, in some cases, can be better defined if the dyke is sampled just at the center of it, in contrast with the expected results in the borders which can be influenced by the local irregularities of the flow and the dyke wall.

**Key words:** AMS, dykes, flow models, Western Azores.

Geogaceta, 47 (2009), 149-152  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La aplicación de la ASM en intrusiones tabulares muestra distintos modelos de relación entre los ejes de susceptibilidad, el flujo y las condiciones de emplazamiento.

Las relaciones geométricas entre elementos del elipsoide de susceptibilidad magnética y la petrofábrica, pueden presentar: a) relaciones de cizalla con desarrollo de imbricación de la foliación magnética con respecto a las paredes y sentido de flujo paralelo a la intersección de las foliaciones magnéticas en ambos márgenes, b) orientación de la foliación magnética paralela a las paredes del dique y lineación magnética paralela al flujo, c) orientación de la foliación variable en el caso de flujos turbulentos d) flujo paralelo al eje intermedio del elipsoide de susceptibilidad o relaciones complejas entre los distintos ejes de susceptibilidad y la dirección de flujo (ver Cañón-Tapia y Chávez-Álvarez, 2004 para una discusión de los distintos modelos). Estos modelos, lejos de representar casos concretos, se han identificado en distintos ambientes y tipos de rocas intrusivas, haciendo que la

identificación de la dirección y sentido de flujo puedan depender del modelo considerado.

En los últimos años, en trabajos realizados en diques recientes del complejo volcánico de Corvo-Flores (Fig. 1, Pueyo *et al.*, 2006, Gil Imaz *et al.*, 2008 y Pueyo *et al.*, 2009) se ha podido constatar que el modelo de imbricación esperado en los sectores próximos a las paredes no se desarrolla sistemáticamente. El muestreo de estos diques se realizó a través de distintos cortes borde-centro-borde, identificando en algunos casos la presencia de imbricación con respecto a las paredes de los diques (estaciones de muestreo Cor-03 y Flw-05) mientras que en otros casos esta imbricación no existía y la lineación magnética de estos diques era paralela a los indicadores de flujo a escala de afloramiento (por ejemplo, orientación de cristales de olivino o plagioclasa, orientación de vacuolas, lineaciones minerales o de estiramiento, sentido de apertura de los diques).

El estudio presentado proviene de estaciones de ASM realizadas en las islas de Corvo y Flores que se encuentran en el sec-

tor occidental del archipiélago de las Azores (ver Fig. 1). Ambas islas representan dos afloramientos separados del mismo complejo volcánico donde las mayores variaciones pueden relacionarse con la evolución de cámaras magmáticas someras (ver por ejemplo Pueyo *et al.*, 2009).

El patrón observado para ambas islas muestra la presencia de flujos subverticales en sectores con una mayor tasa de extensión (sector central de la caldera de Corvo o zonas de mayor densidad de diques y fracturación como en el caso de Flores). Al alejarse de estas zonas, la inmersión del flujo inferido disminuye progresivamente hasta posiciones subhorizontales. Los diques aparecen asociados a una dirección de fracturación regional de orientación paralela a la dorsal mesoatlántica (ver por ejemplo Pueyo *et al.*, 2009).

## Resultados obtenidos

El análisis mineralógico se ha basado principalmente en el análisis de la presencia de variaciones de las fases mineralógicas presentes a lo largo de per-

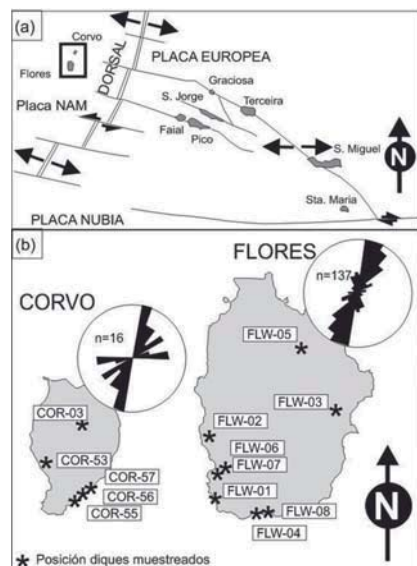


Fig. 1.- A: Contexto geológico de la zona de estudio. B: localización de las estaciones de muestreo analizadas y patrones direccionales de fracturación para cada una de las islas estudiadas.

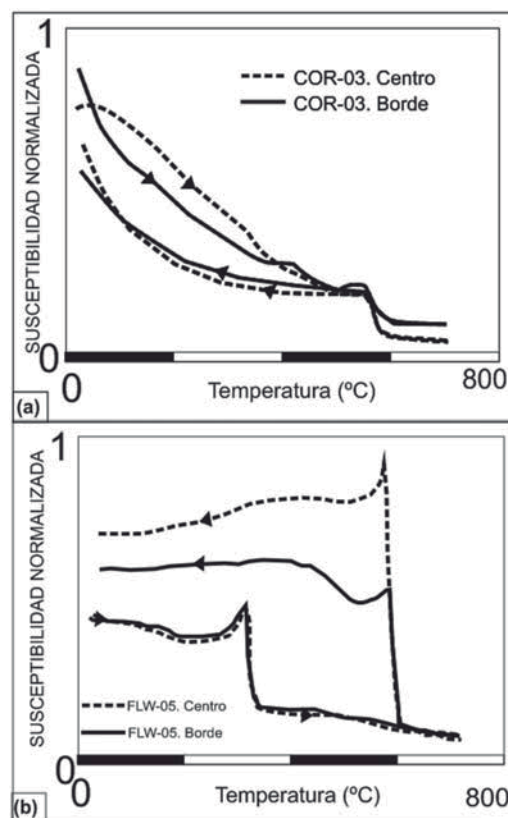
Fig. 1.- A: Geological context from the studied zone, B: studied sites localization and fracture nets for both studied islands.

files centro-borde. En el caso del dique COR-03 (Fig. 2A) la susceptibilidad de las muestras analizadas disminuye bruscamente a temperaturas en el entorno de los 580°C, observándose dos variaciones en la tendencia de decrecimiento, una en el entorno de los 350-400°C y otra en los 575°C. Las temperaturas de Curie asociadas a estas dos variaciones de la susceptibilidad son compatibles con sulfuros de hierro y magnetita (los trabajos geoquímicos realizados en muestras procedentes de este dique muestran la presencia de sulfuros de hierro (pirita) y magnetita rica en Ti, (véase França *et al.*, 2006). La comparación de las curvas de variación de la susceptibilidad con la temperatura (curvas K-T) de especímenes del centro y borde del dique analizado muestran tendencias similares a lo largo del dique (ver Fig. 2A). Por otro lado, las distintas muestras analizadas a lo largo de un perfil borde-centro-borde se caracterizan por mostrar la transición de Verwey a temperaturas próximas a 120K. Dichas muestras caen en el campo de las PSD en el diagrama de Day (Pueyo *et al.*, 2006).

En el caso del dique estudiado en detalle en la isla de Flores (FLW-05 de Gil *et al.*, 2008), las curvas K-T permiten identificar fases minerales similares a las del dique COR-03, con descensos de la susceptibilidad en los entornos de las temperaturas de 300 y 600°C. De igual forma que en el dique COR-03, los análisis geoquímicos realizados a estas muestras presentan contribu-

Fig. 2.- Ejemplos de curvas de variación de la susceptibilidad con la temperatura para muestras seleccionadas del centro y borde de los diques analizados COR-03 (A) y FLW-5 (B).

Fig. 2.- Examples of curves of susceptibility change with the temperature for selected samples from center and side of the analyzed dikes Cor-03 (A) and Flw-05 (B).



ciones importantes de sulfuros de hierro y magnetita rica en Ti, França *et al.*, 2008). En estas muestras, la susceptibilidad progresa hasta temperaturas próximas a los 700°C lo cual podría estar relacionado con la presencia de una mayor alteración y creación de hematites. La contribución a la susceptibilidad de estas fases de alta temperatura es similar a lo largo del dique.

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM), ha sido medida en el laboratorio de fábricas magnéticas de la Universidad de Zaragoza con un equipo KLY3-s, las curvas de variación de la susceptibilidad con la temperatura con un equipo CS-02.

Con independencia del reconocimiento exacto de las fases minerales responsables de la susceptibilidad magnética en cada uno de los diques, las curvas de variación de susceptibilidad magnética con la temperatura en muestras procedentes de distintas posiciones dentro de los diques y asociadas con variaciones de las relaciones geométricas entre la ASM y el encajante, no se relacionan con variaciones significativas de las características mineralógicas de las muestras analizadas.

**Patrones direccionales**

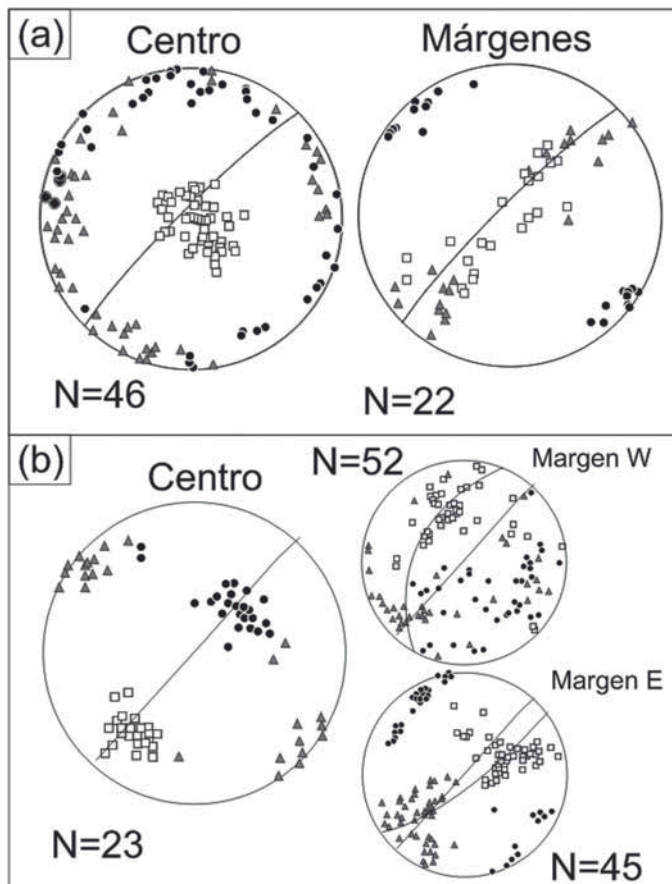
El análisis del patrón direccional de las fábricas se ha realizado a través de la proyección estereográfica de los ejes de susceptibilidad, siguiendo el convenio de

K1 (cuadrado), K2 (triángulo) y K3 (círculo).

El estudio del patrón direccional de las fábricas, en la mayoría de los casos, es homogéneo. La disposición del elipsoide magnético es igual para muestras localizadas en las proximidades de la pared y a lo largo de toda la sección del dique. En dos de los casos, el patrón direccional varía al comparar los resultados de las paredes y del centro del dique (FLW-05 y COR-03, Fig. 3). Ambos diques muestran una orientación similar, NNE-SSW, paralela a la dirección de fracturación regional. Se han extraído 61(COR-03) y 52 (FLW-05) testigos que representan 68 y 120 muestras respectivamente.

Para el dique COR-03, en las muestras obtenidas en las proximidades de las paredes, se observa una foliación magnética que tiende a ser paralela a la pared del dique (polo de la pared del dique paralelo a las agrupaciones de los polos de la foliación magnética), aunque presenta una ligera imbricación con respecto a ésta (dos agrupaciones de ejes K3 que se relacionan con los datos de cada una de las paredes). La lineación de intersección de las foliaciones magnéticas de ambas paredes del dique, presenta una inmersión subvertical.

El análisis de las muestras localizadas en el sector central del dique presenta una dispersión de los ejes K2 y K3 a lo largo de un plano horizontal, mientras que la lineación magnética muestra una disposición



**Fig. 3.-** Estereogramas de ejes de susceptibilidad magnética para las estaciones (A) COR-03 y (B) FLW-05 distribuidos por sectores (centro y márgenes).

*Fig. 3.- Stereoplots from the magnetic susceptibility axes for the (A) COR-03 and (B) FLW-05 sites with side and center samples in different stereoplots.*

subvertical y paralela a la lineación de intersección de las foliaciones magnéticas obtenidas en las paredes del dique. Es decir, en este caso los indicadores de flujo obtenidos en las paredes del dique y en el centro del mismo, son compatibles con un flujo subvertical. Los elementos de la petrofábrica (cristales de plagioclasa y olivino) tienen una orientación similar a la de la lineación magnética en el sector central del dique.

En el caso del dique FLW-05 (Fig. 3B), la oblicuidad de la foliación magnética con respecto a la pared del dique es mayor. Las muestras provenientes del sector central del dique presentan una fábrica triaxial ( $-0.5 < T < 0.5$ ), con la lineación magnética paralela a la lineación de intersección de las foliaciones magnéticas obtenidas en las muestras próximas a las paredes del dique.

En el caso de la estación COR-03, la dirección del flujo inferible a partir de la fábrica magnética es congruente tanto con los datos de las paredes como del centro del dique, si el modelo considerado es diferente en ambos casos: flujo paralelo a la lineación magnética o flujo paralelo a la intersección de imbricaciones en las paredes del dique.

#### Parámetros magnéticos

En los dos diques seleccionados, se ha realizado la representación de los valores de distintos parámetros magnéticos en cortes

borde-centro-borde. Las tendencias observadas presentan una disposición simétrica, por lo que para analizar en detalle estas variaciones se han representado únicamente perfiles borde-centro (Fig. 4).

En estas secciones se observan valores del parámetro de forma (T) más altos en las proximidades de las paredes de los diques y menores valores en el sector central del dique (en el caso del dique COR-03 esta variación pasa de un valor de T positivo – campo triaxial– a un elipsoide claramente prolato en el sector central dique)

En el caso del grado de anisotropía de los elipsoides magnéticos ( $P'$ ), en ambos casos, se observan valores mayores en el sector central del dique y en sus bordes. En lo que respecta a los factores de lineación y foliación magnética (L y F), se observa una relación inversa, con mejor definición de la foliación en los sectores marginales del dique y mejor definición de la lineación en el sector central del dique.

Estos cambios observados en las tendencias de parámetros magnéticos aparecen asociados al cambio de orientación del elipsoide de la ASM. Las fábricas de imbricación muestran los mayores valores del parámetro T, mayores valores del grado de anisotropía mientras que las fábricas con lineación magnética paralela al flujo, muestran menores valores del parámetro T y mayores valores del factor de lineación.

#### Discusión y Conclusiones

La comparación de los resultados obtenidos en el elipsoide de la ASM para un mismo dique, en las proximidades de la pared y en su sector central, muestra una variación del patrón de orientación: imbricaciones en las paredes del dique y lineación paralela al flujo en el sector central del mismo. Estas diferencias se producen sin una variación significativa de las fases minerales responsables de la susceptibilidad magnética.

Los modelos de relación entre indicadores de flujo a escala de afloramiento y la ASM son congruentes con el mismo sentido de flujo, pero el modelo empleado para su definición difiere. Por otro lado, los diques estudiados muestran una variación de los parámetros magnéticos analizados de forma paralela a la variación, en orientación, del elipsoide: fábricas oblatas imbricadas en las paredes y fábricas de lineación magnética mejor definida y paralela al flujo en elipsoides prolato en el centro. Estas características ponen de manifiesto el cambio del régimen de flujo a lo largo del mismo dique de forma paralela al cambio en orientación del elipsoide de la ASM.

Con el objetivo de analizar las variaciones en la orientación del elipsoide de ASM y en los parámetros magnéticos, se han seleccionado otros tres diques (dos de la isla de Corvo y uno de la de Flores), en los que no existía una variación significativa del patrón direccional del elipsoide de la ASM entre sectores de borde y centro (ver Fig. 4). En estos cortes se observan tendencias similares de variación de los parámetros magnéticos a las observadas en los casos COR-03 y FLW-05. De forma cualitativa se observan: mayores valores de los factores de foliación y elipsoides más oblatos en las proximidades de las paredes y elipsoides más prolato y mejor definición del factor de lineación en el sector central del dique.

Estos resultados muestran que los parámetros magnéticos siguen tendencias de variación similares, aunque a distinta escala, con independencia de la presencia de variación en orientación del elipsoide de la ASM.

Estos aspectos ponen de manifiesto la imposibilidad de la aplicación de un único modelo de relaciones entre la fábrica magnética y la petrofábrica y más aún la transcendencia del tipo de muestreo empleado a la hora de determinar la dirección y sentido de flujo ígneo en intrusiones tabulares.

Recientemente Cañón-Tapia y Herro Berbera (2009) planteaban en el mismo sentido, la importancia de la posición de las muestras a lo largo de un dique para



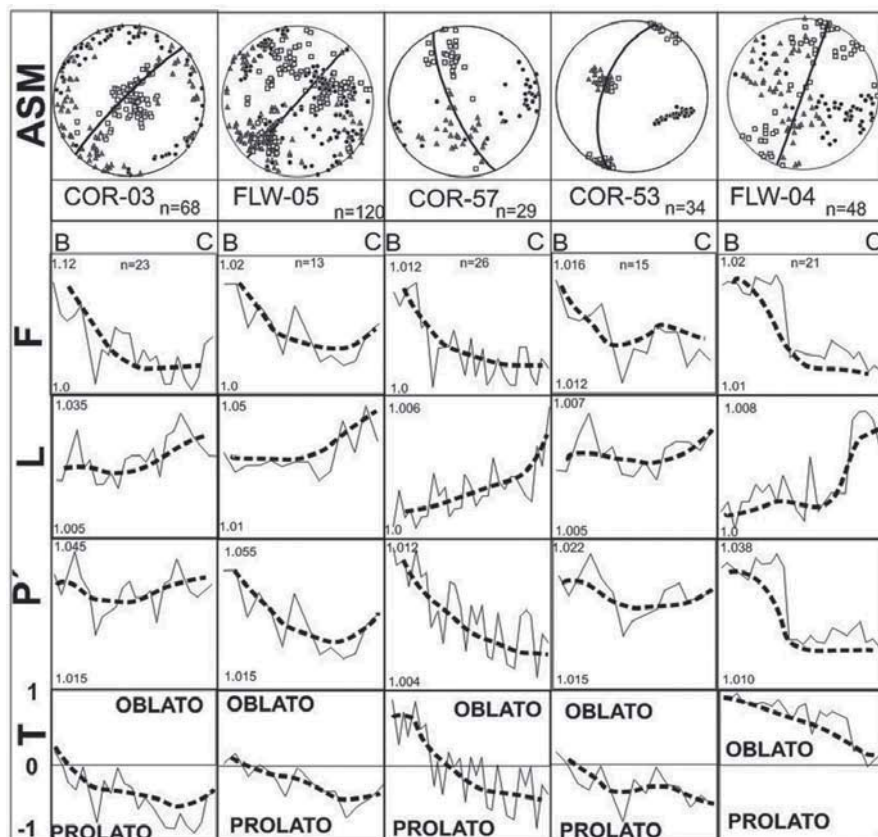


Fig. 4.- Cortes de parámetros magnéticos para 5 estaciones seleccionadas: pared del dique (B) y sector central (C). Se incluyen líneas de tendencia para los datos obtenidos en los distintos cortes de parámetros. Los estereogramas de cada una de las estaciones representan la totalidad de datos de la estación, mientras que los cortes de parámetros representan un perfil seleccionado de cada uno de los diques según un corte perpendicular a la pared. Ver Jelínek (1981) para la definición de los parámetros: F foliación, L lineación, P' grado de anisotropía, T parámetro de forma

Fig. 4.- Magnetic parameter sections for 5 chosen sites; dyke wall (B) and central zone (C). Trend lines for the different section have been also plotted. Stereoplots represent all the AMS data from the site while the plotted parameter graphs came from a selected section chosen along a normal section to the dyke wall. See Jelínek (1981) for the parameter definition: F foliation, L lineation, P' degree of anisotropy and T shape parameter.

analizar el significado de la ASM. En este caso, el muestreo en diques recientes sin deformación post-emplazamiento permite disminuir las incertidumbres sobre el origen de la ASM con otros procesos posteriores que pueden haber afectado a diques de edad más antigua.

La imbricación, cuando está presente, es un indicador de la fricción contra las paredes del dique (si las paredes son planas y paralelas informaría sobre la dirección y sentido del flujo). Sin embargo el muestreo únicamente de estos sectores de borde podría magnificar las irregularidades menores de los límites y presentar patrones direccionales no generalizables a escala de la unidad de intrusión.

La utilización única de muestras procedentes del sector central del dique en la determinación del flujo, para los casos presentados, muestra una mayor concentración de la lineación magnética paralela al flujo res-

pecto las muestras provenientes del borde del mismo dique.

Los resultados presentados muestran que la dirección (y/o sentido) de flujo puede establecerse a partir del muestreo tanto de las paredes como del sector central del dique. La aplicación de modelos sencillos en este caso es factible, aunque diferente entre los sectores de borde y centro. El muestreo en sistemas de diques con mayores complejidades (i.e.: procesos de deformación posteriores al emplazamiento o emplazamientos contemporáneos con la deformación), requiere de un muestreo sistemático a lo largo de todo el sistema y no únicamente en los sectores marginales del sistema de emplazamiento. Estas variaciones de parámetros magnéticos han sido interpretadas de diferentes formas: 1) ciclicidad de la intrusión, 2) cambios mineralógicos, de la proporción de una determinada fase o variaciones

granulométricas, 3) variación en el volumen de vacuolas, 4) variación del régimen de flujo según el distinto grado de enfriamiento o 5) el propio grado de cristalización, entre otros.

En estos casos, las variaciones de los parámetros magnéticos son interpretadas de forma paralela al cambio de orientación del elipsoide de la ASM, según el modelo propuesto por Correa Gomes *et al.* (2001), de variación del flujo y ordenación de las partículas magnéticas según la variación entre cohesión interna del flujo e influencia de la cizalla con el encajante. En este caso haciendo compatible en un mismo dique dos de los modelos de relación entre la ASM y el flujo a lo largo de un perfil borde-centro.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por una ayuda CAI-CONAI, el grupo Geotransfer de la Universidad de Zaragoza, la Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento-FLAD, PIC CHRONOS-OVGA y la Universidade de Aveiro. Los autores quieren agradecer la revisión realizada por E. Herrero Bervera y el trabajo desinteresado de los editores de Geogaceta.

**Referencias**

Cañon Tapia, E. y Chávez-Álvarez, M.J. (2004). En: *Magnetic Fabric: Methods and Applications* (F. Martín-Hernández, C.M. Lüneburg, C. Aubourg y M. Jackson. Eds.) Special Publications, Geological Society of London, 238, 227-249.

Canon Tapia E. y Herrero-Bervera, E.(2009). *Tectonophysics*, 466, 3-17.

Correa-Gomes, L.C., Souza Filho, C.R., Martins C.J.F.N. y Oliveira, E.P. (2001). *Journal of Structural Geology*, 23, 1415-1428

França, Z., Lago, M., Nunes, J.C., Galé, C., Forjaz, V.H., Pueyo, O. y Arranz, E. (2006). *Geogaceta*, 40, 87-90.

França, Z., Lago, M., Galé, C., Ubide, T., Widom, E., Arranz, E., Forjaz, V.H. (2008). *Macla*, 9, 103.

Gil Imaz, A., Pueyo Anchuela, Ó., Lago Sanjosé, M., França, Z. y Forjaz, V.H. (2008). *Geotemas*, 10, 1167-1170.

Jelínek, V. (1981). *Tectonophysics*, 79, 63-67.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil, A., Lago, M., França, Z. y Galé, C., (2006). *Geogaceta*, 40, 83-87.

Pueyo Anchuela, O., Gil Imaz, A., Lago San José, M., França, F., Widom, E. y Forjaz V.H. (2009). *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-5114.