



Correlación no lineal entre la susceptibilidad media, la contribución paramagnética a la susceptibilidad y la litología en el sector centro-occidental del Pirineo Central. Implicaciones para los estudios de ASM

Non linear correlation between the mean susceptibility, the paramagnetic contribution to the susceptibility and the lithology in the western Central-Pyrenees. Implications to the AMS studies

Óscar Pueyo Anchuela ⁽¹⁾, Andrés Gil Imaz, Andrés Pocoví Juan ⁽¹⁾, Ana Arauzo ⁽²⁾, Enrique Guerrero ⁽²⁾ y Conrado Rillo ⁽²⁾

⁽¹⁾ Grupo de investigación GEOTRANSFER. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. opueyo@gmail.com

⁽²⁾ Servicio de Instrumentación Científica. Área de medidas físicas. Universidad de Zaragoza.

ABSTRACT

The magnetic susceptibility studies and its application to the fabric studies depend on the mineralogical susceptibility sources. The mineralogical characterization of ferromagnetic phases has been developed parallel to the paleomagnetism techniques. While the ferromagnetic or paramagnetic particles cannot change along a cross-section of an orogen, because they are related with the same source area, similar diagenetic processes and fluid compositions. The different weight of them to the susceptibility can change in a significant manner in the same lithological unit or even at outcrop scale. The general assumption that clay rich levels can represent a higher paramagnetic contribution to the susceptibility is true in some cases, while in others the expected paramagnetic contribution can differ significantly respect the expected values: high paramagnetic contribution in detrital continental deposits or low values in clay rich levels as the e-levels of the Bouma sequence. With independence of the studied lithological unit, higher values of paramagnetic contribution to the susceptibility show more oblate fabrics or prolate fabrics and lower values of the degree of anisotropy in the most ferromagnetic samples. The relation between K_m and the paramagnetic contribution to the susceptibility shows that only in a K_m range this relation is direct. These results show that a special attention in the analysis of the paramagnetic contribution to the susceptibility must be made in the AMS studies. The utilization of magnetic parameters, as T or P' , as an indicator of intensity of deformation (clustering of particles) only can be used in sectors without changes in the paramagnetic contribution to the susceptibility, even when the external lithological aspect can be very similar and the samples comes from the same structural position.

Key words: Paramagnetic contribution, ferromagnetic contribution, susceptibility.

Geogaceta, 45 (2008), 83-86
ISSN: 0213683X

Introducción

La susceptibilidad magnética es la relación entre un campo magnético aplicado y el campo generado. La ASM se basa en la medida de la anisotropía de esta propiedad a través de la medida de su variación espacial a través de la medida en distintas posiciones.

Una de las características de los análisis de ASM concierne al diferente comportamiento magnético de las distintas partículas presentes. Por ejemplo, la deformación a escala de afloramiento es más penetrativa en rocas de menor granulometría y de alto contenido arcilloso, y estas partículas presentan un comportamiento dominante de tipo paramagnético. Es decir, que puede entenderse que la sensibilidad en la medida de esta fracción detrítica o de neoformación

arcillosa puede mostrar una mayor coaxialidad entre el elipsoide de la ASM y el de deformación.

Este aspecto litológico que puede influir enormemente en los resultados de la ASM ha producido la búsqueda de litologías adecuadas. En el caso de los análisis en rocas graníticas se buscan aquellas con mayor contribución paramagnética a la susceptibilidad (por ejemplo micas) en la búsqueda de un indicador más fiel. En el caso de rocas sedimentarias, por ejemplo, buscando aquellas con mayor fracción arcillosa por un lado como indicador de un control paramagnético de la susceptibilidad y por otro para evitar los potenciales ruidos relacionados con la presencia de imbricaciones sedimentarias compatibles con paleocorrientes. Por otro lado se tiene también en cuenta la mayor sensibilidad a la deformación en rocas arcillosas frente a

otras granulometrías a escala de afloramiento.

Desde esta óptica, se presenta en este trabajo un análisis desde el punto de vista litológico, de susceptibilidad media, de parámetros magnéticos frente a la contribución paramagnética a la susceptibilidad y la variación de ésta con la temperatura. Este análisis puede permitir por un lado la valoración de las litologías más adecuadas para los estudios de fábricas en otros ambientes y también la ponderación de hasta qué punto las variaciones litológicas pueden influir en los potenciales resultados que pueden obtenerse de dichas fábricas.

Contexto geológico

Las muestras analizadas provienen del estudio que forma parte de la tesis doctoral del primero de los firmantes y

Grupo litológico	% paramag		$\Delta\chi$ frecuencia		χ_{LF}/χ_{RT}	
	χ_{HF}/χ_{LF} Rango	χ_{HF}/χ_{LF} Media	$\Delta\chi$ Rango	$\Delta\chi$ Media	Total	Media
Paleozoico (facies Culm)	52.5 94.7	72.4	0.21 7.05	3.1		
Calizas cretácicas	12.2 88.1	59.6	0.7 29.2	6.8	0.71 4.26	2.13
Margas de Zuriza Tuca Blanca	3.4 94.7	51.8	0.42 13.9	6.4	1.8 3.14	2.57
Arenisca de Marboré	35.4 63.7	54.5	3.5 7.5	5.1	1.88 2.97	2.42
Paleoceno y Eoceno carbonatado	0.6 85.6	28.8		6.8	$\chi_{LF}/\chi_{RT} < 1$	
Flysch D	12.8 91	52	0.9 12.7	5.8	0.98 3.47	1.90
Flysch B	17.4 89.5	47.2	0.73 10.5	6.5	1.08 2.76	1.78
Megacapás	13.4 84.4	21	6.97 14.7	5.3		
Millaris, Arguis, Larrés	11.7 99.9	82.4	0.42 10.45	2.6	3.85 4.15	4.53
Detríticos continentales	37.8 87.8	73.4	0.20 5.16	2.46	3.11 3.75	3.45
Cuenca del Ebro	0 82	46.7	0.03 4.72	2.14	1.0 3.8	2.18

Tabla I.- Resumen de los principales resultados obtenidos de los parámetros de contribución paramagnética a la susceptibilidad (%paramag), variación de la susceptibilidad con la frecuencia y variación de la susceptibilidad con la temperatura.

Table I.- Resume of the main results obtained from the analysis of different magnetic parameters: paramagnetic contribution to the susceptibility (%paramag), change of the susceptibility with the frequency and variation of the susceptibility with the temperature.

representa un volumen de 4420 muestras distribuidas en 208 estaciones a lo largo de varias transversales pirenaicas. Los materiales analizados provienen de distintas unidades litoestratigráficas, contexto tectónico y litología. Las unidades muestreadas y agrupadas en este trabajo son Paleozoico (facies Culm), Cretácico Superior (calizas de los Cañones, Margas de Zuriza, Arenisca de Marboré), Paleoceno-Eoceno carbonatado, Facies flysch donde se han individualizado los materiales provenientes de los tramos a-d de Bouma (grupo D), el tramo e de Bouma (grupo B) y las megacapás, Grupo de margas eocenas (materiales de plataforma externa de las formaciones Arguis y Larrés) y Grupo detrítico continental (Fms. Campodarbe, Bernués, Uncastillo, Zaragoza).

Metodología

Los análisis han sido llevados a cabo en el laboratorio de Fábricas Magnéticas de la Universidad de Zaragoza con un equipo KLY3-s (AGICO) para la medida de la ASM y sus parámetros, laboratorio de Medidas de Propiedades Físicas de la Universidad de Zaragoza con un equipo PPMS (Quantum design) para la medida de la variación de la susceptibilidad con el campo magnético aplicado y contribución superparamagnética a la susceptibilidad y laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Michigan (Grupo PASTEL) para el estudio de la variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura con un equipo Barthington y un equipo Shapire. Por otro lado, se han completado la caracterización de la mineralogía ferromagnética a través de curvas de adquisición de remanencias artificiales (IRM, ARM y pARM) y desmagnetización térmica de la IRM (3d-IRM).

Técnicas de valoración de la contribución paramagnética a la susceptibilidad

La capacidad de aislar, incrementar o analizar un determinado comportamiento magnético de la susceptibilidad puede realizarse a partir de las diferentes respuestas de los distintos comportamientos magnéticos. En la mayor parte de las muestras la susceptibilidad media en condiciones ambiente oscila entre 10^{-5} y 10^{-6} (SI) por lo que la contribución diamagnética a la susceptibilidad puede ser desestimada. Por lo que la discriminación y cuantificación de comportamientos puede realizarse en contribución paramagnética vs. ferromagnética s.l.

El comportamiento paramagnético es dependiente de la temperatura según la ley de Curie-Weiss mientras que la susceptibilidad ferromagnética s.l. puede interpretarse como invariante. Esta valoración es sólo cierta en un rango de minerales y partículas, aunque en determinadas sustancias como las titanomagnetitas y las magnetitas superparamagnéticas esta relación no es completamente independiente (Richter y Van der Pluijm, 1984). En aquellos casos en que la contribución paramagnética controle prácticamente la totalidad de la susceptibilidad la variación de ésta será únicamente dependiente de la variación de la temperatura. En aquellos casos en que la constante de Weiss es 0 o próxima a este valor (como ocurre en la mayor parte de los minerales arcillosos) una relación de variación de la susceptibilidad entre temperatura de nitrógeno líquido y temperatura ambiente tendrá un valor próximo a $3.8 = 298/77$ (e.g. Richter y Van der Pluijm, 1984). Desde este punto de vista, valores inferiores a este valor muestran un desplazamiento del comportamiento teó-

rico compatible con influencia de fases ferromagnéticas s.l., mientras que valores mayores pueden correlacionarse con contribuciones antiferromagnéticas en las muestras (esta misma aproximación puede realizarse con el cálculo de la constante de Weiss, valores positivos indican contribución ferromagnética mientras que valores negativos muestran influencia antiferromagnética).

Por otro lado, el comportamiento paramagnético muestra una relación lineal con el campo aplicado, al menos dentro del rango de campo aplicado en los ensayos realizados. Por su parte, el comportamiento ferromagnético mantiene una linealidad con el campo aplicado hasta obtenerse la saturación ferromagnética. La saturación de cada una de las fases minerales ferromagnéticas no sólo depende de los minerales presentes sino también de su composición y granulometría. Los análisis de adquisición de la IRM (sIRM) muestra factores de saturación S altos, lo que implica una saturación de las fases ferromagnéticas a campos de 0.3 T. Las muestras donde no se había alcanzado el 98% la saturación a 1.1T se han desestimado del análisis que se presenta a continuación, puesto que presentan componentes de alta coercitividad y podría no haberse alcanzado la saturación a 2.5T en las medidas realizadas en el equipo PPMS. El campo de saturación aplicado en el PPMS fue de 2.5T, por lo que puede asumirse que se había obtenido la saturación de las fases ferromagnéticas de todas las muestras y de todas las fases ferromagnéticas presentes. Asumiendo, como se indicaba anteriormente, que la contribución diamagnética a la susceptibilidad es de varios órdenes de magnitud por debajo de la susceptibilidad media, la variación de la susceptibilidad con el campo indica contribución ferromagnética saturada durante el análisis. De igual forma, la invariabilidad entre bajo y alto campo de la susceptibilidad mostraría la contribución paramagnética a la susceptibilidad (%paramag= $(1 - (\chi_{LF} - \chi_{HF})/\chi_{LF}) \times 100$).

Resultados

Las determinaciones de la contribución paramagnética a la susceptibilidad muestran, en casi todos los casos, grados variables de competencia entre comportamientos paramagnéticos y ferromagnéticos s.l. La contribución paramagnética media por unidad litológica muestra en las margas eocenas valores promedio del 82.4% seguido de

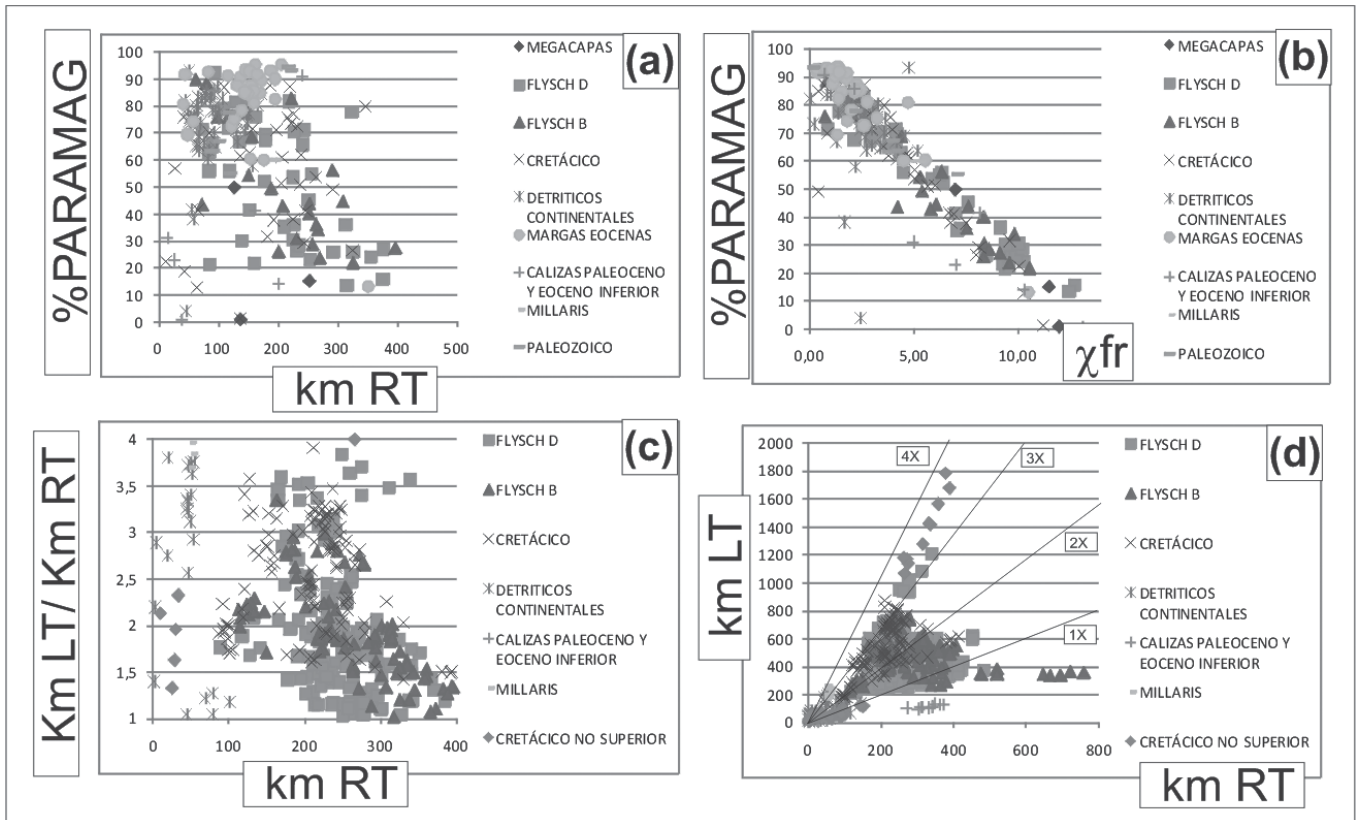


Fig. 1.- (a) Contribución paramagnética a la susceptibilidad frente a la susceptibilidad media, (b) contribución paramagnética a la susceptibilidad frente a la variación de la susceptibilidad con la frecuencia, (c) relación de variación de la susceptibilidad con la temperatura frente a la susceptibilidad media, (d) variación de la susceptibilidad con la temperatura. χ_{fr} : factor variación de la susceptibilidad con la frecuencia (876 y 10000Hz), valores de susceptibilidad en unidades SI ($\times 10^{-6}$), LT: baja temperatura 77K y RT temperatura ambiente.

Fig. 1.- (a) Paramagnetic contribution to the susceptibility facing to mean susceptibility, (b) paramagnetic contribution to the susceptibility facing to the change of the susceptibility with the frequency (χ_{fr}), (c) change of the susceptibility with the temperature facing to mean susceptibility, (d) susceptibility change relation with the temperature cfr: factor of change of the susceptibility with the frequency (876 y 10000 Hz), values of susceptibility are in SI unit ($\times 10^{-6}$), LT: low temperature 77K y RT room temperature.

las facies Culm (Tabla I). Esta primera aproximación sigue las pautas esperadas para los grupos litológicos muestreados, principalmente margas. Sin embargo los espectros de variación del %paramag dentro de cada una de las unidades puede ser importante. De esta forma, muestras provenientes de la misma unidad litológica, por ejemplo, el caso de unidades carbonatadas cretácicas (estaciones muestreadas en la Fm. Calizas de Larra) tiene un espectro de variación que oscila entre el 12.2 y 88.1%. Un aspecto similar se obtiene para el caso de las rocas carbonatadas provenientes de megacapas (13.4-84.4) y calizas eocenas (0.6-85.6). Por otro lado, materiales detríticos asociados a medios marinos y continentales no muestran las relaciones esperadas de su contribución paramagnética, presentando en el caso de los materiales detríticos continentales valores de media de 73.4% o valores indistintos entre muestras de los mismos afloramientos con distintas granulometrías de materiales turbidíticos. En el caso de los materiales turbidíticos la variación de la contribución

paramagnética a la susceptibilidad en cuanto a valores medios presentan comportamientos muy similares: 52 y 47.2% para tramos detríticos y margosos, y espectros de variación de 12.8 a 91% y 17.4 a 89.5% respectivamente.

La variación de la susceptibilidad con la temperatura y la variación de la contribución paramagnética, establecida a través de medida a alto y bajo campo, muestra una correlación de regresión casi lineal. Por otro lado, la variación de la susceptibilidad con la frecuencia de medida de la susceptibilidad AC no muestra una relación clara con el grupo litológico muestreado, aunque si existe una relación de regresión lineal entre la contribución ferromagnética y la variación de la susceptibilidad con la frecuencia (mayor variación con la frecuencia en muestras con alta contribución ferromagnética a la susceptibilidad: Figura 1) indicando que la distribución granulométrica ferromagnética tiene una distribución principalmente de tipo logarítmica.

En lo que concierne a la anisotropía de la susceptibilidad existe un amplio es-

pectro de variación de los parámetros analizados (foliación, lineación, grado de anisotropía o parámetro de forma) en función de la litología. No así en lo que concierne a la contribución paramagnética a la susceptibilidad. Muestras con una mayor contribución paramagnética presentan morfologías del elipsoide de anisotropía más oblatas y menores valores del factor de lineación. Por otro lado, las muestras de mayor contribución ferromagnética a la susceptibilidad presentan grados de anisotropía mayores y mejor definición del factor de lineación. De esta forma, muestras con un alto grado de contribución ferromagnética a la susceptibilidad tienen valores del parámetro de forma compatibles con el grado de anisotropía mineral de la magnetita, por ejemplo ($-0.3 < T < -0.7$ y $1.10 < P_j < 1.20$; Tarling y Hrouda, 1993) o geometrías oblatas y mayores valores del grado de anisotropía para minerales como la biotita y la moscovita o valores intermedios para los casos de mezcla mineral o bajo valores de concentración.

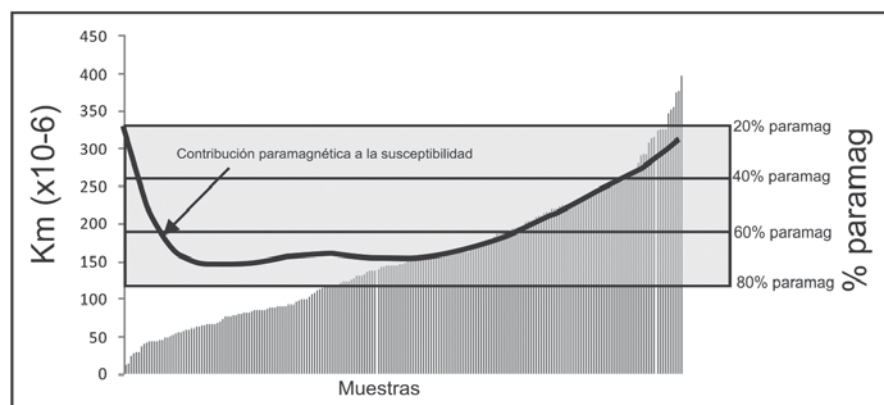


Fig. 2.- Valores de K_m ordenados por magnitud frente a la curva de tendencia para la variación de la contribución paramagnética a la susceptibilidad .

Fig. 2.- Ordered values of K_m and fitted trend curve of variation of the paramagnetic contribution to the susceptibility.

Discusión y conclusiones

Una de las problemáticas en la interpretación de las fábricas magnéticas es la caracterización mineralógica de las fases portantes de la susceptibilidad y de su anisotropía. Con independencia de las fases minerales presentes en las rocas estudiadas, el factor principal a considerar es la influencia de los comportamientos magnéticos en la susceptibilidad y a la ASM. El análisis de la variación de la susceptibilidad con la temperatura o entre bajo y alto campo, muestra una regresión lineal entre ambos parámetros lo que apoya ambos métodos como técnicas de cuantificación de la contribución paramagnética a la susceptibilidad.

Por otro lado, la utilización de análisis puntuales agrupados por tipos litológicos que desde el punto de vista de identificación de fases minerales puede diferir en bajo grado dentro del mismo contexto geológico (misma área fuente, similares procesos diagenéticos y de composición de fluidos), puede presentar importantes variaciones de la contribución paramagnética a la susceptibilidad en afloramientos próximos y de la misma unidad litológica. Este mismo aspecto influye también en la interpretación de las fases minerales portantes de la susceptibilidad y en la utilización de distintos parámetros magnéticos como indicadores de intensidad de la deformación (parámetro de forma, grado de anisotropía, gráficos de Flinn: foliación vs. lineación).

En el caso de las formaciones margosas eocenas o en tramos arcillosos de la facies Culm la asignación de una ASM controlada por minerales paramagnéticos es correcta. Sin embargo, en tramos detríticos del Terciario conti-

ental (Fm. Campodarbe y Uncastillo) esta aseveración puede guardar sorpresas, como en los casos analizados donde la contribución paramagnética a la susceptibilidad controla en un 73.4% la susceptibilidad total. Por otro lado, el análisis en las facies turbidíticas, donde la intensidad de la deformación a escala de afloramiento es diferente y el contenido arcilloso de los niveles puede ser a priori diferente, los resultados de la contribución paramagnética a la susceptibilidad muestran variaciones que no se corresponden con la litología, mientras que las variaciones de los parámetros magnéticos de anisotropía siguen la variación esperada en función de la anisotropía de los minerales y de su contribución a la susceptibilidad total.

La caracterización mineralógica de las muestras estudiadas desde el punto de vista de la mineralogía ferromagnética, indican que son la (titano)-magnetitas y algunos sulfuros de hierro los que controlan la remanencia de las muestras. En algunos casos, fases de alta coercitividad se han identificado en algunas de las muestras. Sin embargo, la mayor variación se observa en la contribución de estas fases a la susceptibilidad. Desde esta relativa homogeneidad mineralógica, y observando la variación entre la susceptibilidad media y la contribución paramagnética a la susceptibilidad se observa que no existe una correlación entre ambos parámetros. Aunque a nivel general para el intervalo de K_m entre 150 y 275 $\times 10^{-6}$ (Figura 2) existe una correlación general entre K_m y el %ferromag (contribución ferromagnética saturada entre 0 y 2.5 T). Fuera de este rango, para valores de K_m mayores, la susceptibilidad media aumenta de forma más rápida con el incremento de la contribución ferromagnética a la susceptibili-

dad y, para valores menores, existe una zona donde la variación de K_m frente a % paramag no es significativa. Para valores menores de 10^{-6} se observa una variación inversa de los valores de K_m . La aplicación habitual de la media de K_m como potencial indicador de la contribución paramagnética a la susceptibilidad en este caso no es cierta para un amplio rango de K_m y sólo compatible a nivel de tendencia para el resto de valores.

Los resultados presentados en este trabajo muestran que desde el punto de vista de las fases minerales ferromagnéticas presentes hay una relativa homogeneidad a lo largo de las distintas transversales analizadas. Sin embargo, en el caso de las variaciones de las fases y comportamientos que contribuyen a la susceptibilidad, las aseveraciones relacionadas con la tipología litológica no son del todo correctas. En varios grupos litológicos ha podido observarse una relación directa entre las propiedades esperadas y las analizadas (grupos de margas eocenas y facies Culm), mientras que otros grupos muestran resultados no esperados de la contribución paramagnética a la susceptibilidad como en el caso de los materiales detríticos continentales donde cabría esperar una mayor contribución ferromagnética. Sin embargo, el aspecto más llamativo es el amplio intervalo de variación dentro de unidades con una relativa homogeneidad litológica a escala regional, y en algunos casos con variaciones significativas a escala de afloramiento. Estos aspectos ponen de manifiesto la necesidad de un control exhaustivo de la contribución paramagnética a la susceptibilidad en los estudios de ASM, sin la cual la valoración de la representatividad de los distintos parámetros magnéticos, y en algunos casos, incluso de las fábricas magnéticas puede ser controvertida.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación CGL-2006-05817, el grupo de investigación GEOTRANSFER y una beca FPU del primero de los firmantes.

Referencias bibliográficas

- Jelinek, V. (1981). *Tectonophysics*, 79, 63-70.
- Richter, C., y van der Pluijm, B.A. (1994) *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82, 113-123.
- Tarling, D. y Hrouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman and Hall, 217 p.