Revista de la Sociedad Geológica de España 26 (1)

ISSN (versión impresa): 0214-2708
ISSN (Internet): 2255-1379

ANÁLISIS DE FÁBRICAS MAGNÉTICAS Y SU RELACIÓN CON LA DEFORMACIÓN EN EL SECTOR OCCIDENTAL DEL PIRINEO CENTRAL (ARAGÓN Y NAVARRA)

Magnetic fabric analysis and its relation with the tectonic deformation at the western sector of Central Pyrenees (Aragón and Navarra, NE Spain)

Óscar Pueyo Anchuela, Andrés Pocoví Juan y Andrés Gil Imaz

Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.
opueyo@unizar.es; apocovi@unizar.es; agil@unizar.es

***Abstract**: The record of tectonic processes by means of magnetic fabrics show a different development at the Central-Southern Pyrenees and Ebro Basin. At foreland basin conditions and low deformed environments (without macroscopic strain evidences) magnetic fabric patterns linked to tectonic shortening can be identified. At more inner zones from the chain and at sectors with cleavage development, there is an apparent low record of deformation related to cleavage at the AMS. This low imprint is analyzed though different magnetic fabric techniques that permit to isolate different magnetic fabric components and where it is possible to value the influence of the mineralogy, the lithology, the heterogeneous deformation progression and the competence between different tectonic processes at the magnetic fabrics. The magnetic fabrics, at regional scale, show general trends attending: i) definition changes within the foreland basin, ii) steeped punctuated progressions linked to thrusts, iii) superposition of different tectonic processes in a coaxial manner and the cleavage affection to a previous well developed magnetic fabric. These aspects reduce the availability of cleaved magnetic fabrics to be developed in the AMS. Nevertheless, the cleavage imprint at the magnetic fabrics can be identified at a well developed intersection lineation domain, the identification of data girdles between sedimentary and tectonic foliation planes, changes at the ellipsoid shape and the magnetic anisotropy parameters.*

***Key-words:** magnetic fabric, ASM, Pyrenees*

***Resumen**: La sensibilidad de las fábricas magnéticas en el registro de procesos tectónicos a escala del Pirineo centro-meridional y Cuenca del Ebro es aparentemente desigual. En condiciones de cuenca de antepaís, con muy bajo desarrollo de la deformación (sin evidencias a escala macroscópica), se identifican patrones compatibles con procesos de acortamiento tectónico. En condiciones más internas y en sectores asociados a la esquistosidad, las fábricas presentan una baja impronta aparente de la deformación asociada a la esquistosidad. Este escaso efecto se analiza con distintas técnicas de fábricas magnéticas que permiten discriminar distintas componentes magnéticas y donde se valora la influencia de la mineralogía, la litología, la heterogeneidad de la deformación y la competencia de distintas componentes tectónicas en la fábrica magnética. La pauta evolutiva de las fábricas de ASM muestra un incremento de la definición de las fábricas hacia el cabalgamiento frontal surpirenaico, secuencias escalonadas de cambios de la definición de las fábricas en relación con cabalgamientos, la presencia de una superposición de distintos eventos de deformación bajo un régimen coaxial y la impronta de la deformación asociada a la esquistosidad sobre materiales con fábricas previas bien definidas. Estos aspectos reducen la capacidad del desarrollo de fábricas magnéticas asociadas a la esquistosidad dentro del dominio esquistoso pirenaico. No obstante, la impronta de la deformación esquistosa puede identificarse a través de la presencia de un dominio de fábricas de lineación de intersección, guirnaldas de datos entre los planos de foliación sedimentaria y tectónica, cambios de la forma del elipsoide y de los parámetros de anisotropía magnética.*

***Palabras clave:** fábricas magnéticas, ASM, Pirineo.*

Pueyo Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A. y Gil Imaz, A. (2013): Análisis de fábricas magnéticas y su relación con la deformación en el sector occidental del Pirineo Central (Aragón y Navarra). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 26 (1), 5-24.

Los trabajos sobre análisis de la deformación por medio del estudio de fábricas magnéticas ha sido un campo amplio de investigación. El Pirineo se encuentra dentro de los campos pioneros de aplicación tanto en el inicio de los estudios como en las discusiones del significado de las distintas tipologías de fábricas y de la sensibilidad de dichas fábricas en la identificación de procesos.

Un aspecto relevante en estos estudios es el relativo a la sensibilidad de las fábricas magnéticas ante distintos procesos de la deformación. Entre estos, se identifican patrones bien definidos y ordenados de fábricas asociados a un proceso de acortamiento paralelo a las capas a decenas de kilómetros del frente de cabalgamiento surpirenaico en la Cuenca del Ebro (Parés *et al.*, 1999; Pueyo-Anchuela *et al*., 2010b). Pero existe una aparente baja impronta de la esquistosidad macroscópica en los patrones de fábricas en entornos de mayor intensidad de la deformación (p. ej. Oliva *et al*., 2009).

Un desarrollo heterogéneo de la deformación podría explicar la existencia de patrones distintos de fábricas en contextos tectónicos similares (p. ej. Pueyo *et al*., 2004; Pueyo Anchuela *et al*., 2007). Sin embargo, en el caso analizado, existen otros factores a considerar que, dada la coaxialidad de la deformación compresiva alpina en el Pirineo, plantean un problema a la hora de discriminar distintas componentes a escala mesoestructural. Esta problemática no es resoluble tampoco a partir del análisis de relaciones geométricas sencillas entre elipsoides magnéticos y estructuras.

Con el objetivo de analizar los patrones de fábricas magnéticas identificadas a lo largo de varias transversales a escala de cadena y determinar los factores que influyen en el desarrollo y sensibilidad de dichas fábricas, se aborda un estudio integrado, a escala del Pirineo meridional y Cuenca del Ebro, basada en trabajos previos desarrollados a menor escala (Pueyo Anchuela *et al.*, 2010 a y b; 2011b; 2012a y b).

Este trabajo se basa en la medida de 4.380 muestras procedentes de 208 estaciones (Fig. 1). En 499 muestras se ha realizado la medida de la anisotropía de algunas técnicas de magnetización remanente (anisotropía de la magnetización remanente anhisterética total –AARM- o parcial –ApARM-; Jackson *et al*., 1988; de la magnetización remanente isoterma- AIRM- o de la anisotropía de partículas con magnetización giro-remanente AGRM; ver Potter, 2004). En 595 muestras se ha medido la ASM a baja temperatura (LTAMS, Parés y Van der Pluijm 2002). Este análisis se ha acompañado de un estudio detallado de las fases ferromagnéticas presentes y su contribución a la susceptibilidad media.

El análisis de fábricas magnéticas se acompaña del análisis estructural a través del estudio de indicadores de la deformación a escala de afloramiento (esquistosidad, elementos de fisilidad; Durney y Kirsch, 1994; o diaclasado a escala de punto de muestreo) y a escala cartográfica para estudiar su relación con la megaestructura. Las estaciones analizadas se centran principalmente en los materiales alpinos (desde las unidades rojas en facies post-Saxoniense y Triásico Inferior de la Zona Axial pirenaica a rocas miocenas de la Cuenca del Ebro). Además se han analizado también varias estaciones en materiales hercínicos (Devónico-Carbonífero) de la zona Axial para un análisis comparado.

Marco geológico y muestreo

El Pirineo representa la cadena de colisión resultado de la inversión de la cuenca mesozoica desarrollada entre el margen septentrional de la placa Ibérica y el continente Europeo (Muñoz *et al*., 1983; 2002). La compresión se desarrolló a través de una convergencia N-S a NNW-SSE, iniciada durante, aproximadamente, el Santoniense-Maastrichtiense y extendiéndose hasta el Mioceno medio (Rosenbaum *et al*., 2000). La convergencia produjo la inversión de aquellas cuencas desarrolladas en distensión/transtensión (Mattauer y Seguret, 1971; Arthaud y Matte, 1975) y el desarrollo de láminas de cabalgamiento asociadas originalmente con las fallas distensivas. Estas láminas afectaron al basamento y desarrollaron un apilamiento antiformal en el sector interno de la cadena (Zona Axial; Williams y Fischer, 1984).

La evolución de la deformación se desarrolló principalmente en una progresión temporal y espacial con desplazamiento hacia el S simultáneamente a la evolución de la cadena. En el sector centro-occidental del Pirineo, la compresión se inicia con la actividad de la falla de Licq y de Lakora posiblemente durante el Santoniense (Teixell, 1992). Estas estructuras representan la parte caudal del sistema de Larra con una deformación de tectónica de despegue de piel fina hacia el sector meridional. El despegue se desarrolla principalmente en las margas del Cretácico Superior. El emplazamiento del cabalgamiento de Gavarnie, post-data el depósito de la turbiditas eocenas (Labaume *et al*., 1985; Cámara y Klimowitz, 1985; Teixell y García Sansegundo, 1995; Teixell, 1992; Teixell, 1996) y bascula el sistema de Larra especialmente en las Sierras Interiores. La deformación progresa hacia el S a través de distintas láminas que también afectan al basamento en el sector septentrional y que se propagaron hacia el S a través de la lámina intermedia (Teixell, 1992), la láminas de Jaca (Teixell y Sansegundo, 1995), de Ordesa (Oliva-Urcia, 2004) o Guara-Gèdre (Millán *et al*., 2006). El frente de las Sierras Exteriores estaría asociado con la más meridional de las láminas pirenaicas (lámina del Guarga; Cámara y Klimowitz, 1985) canalizándose en las facies evaporíticas del Triásico Superior como nivel de despegue.

La progresión de la deformación produjo un patrón cartográfico de estructuras de orientación similar a escala de cadena, con variaciones menores que se desarrollan normalmente de forma paralela (cambios que afectan tanto a pliegues, esquistosidad y cabalgamientos y respetando orientaciones similares). El único sector con un desarrollo significativo de estructuras de orientación oblicua dentro del área estudiada se localiza en el entorno de las Sierras Exteriores (estructura asociada al cabalgamiento frontal surpirenaico). En este sector existen grupos de estructuras con orientación pirenaica original (o próxima a ésta) y que desarrollaron rotaciones de eje vertical según una propagación de E a W tanto areal como temporal (Millán, 1996; Pueyo-Morer; 2000).

Los materiales aflorantes y muestreados en el sector analizado presentan, en general, un carácter sintectónico. Este aspecto es más relevante en lo que respecta a las series terciarias de la zona. Los materiales muestreados, anteriores a la compresión alpina, incluyen depósitos afectados por la orogenia hercínica (Devónicos y Carboníferos), Pérmicos (sedimentados en condiciones de creación de espacios sedimentarios en cuencas transtensivas), la serie del Cretácico Superior (Cenomaniense-Santoniense) y con evidencias del inicio del levantamiento de la cadena para el Campaniense-Maastrichtiense (ver Puigdefabregas y Souquet, 1986; Teixell, 1992, 1996). El Paleoceno y Eoceno inferior afloran tanto en el sector septentrional como en el meridional, aunque no se ha realizado un muestreo detallado. El sistema turbidítico del Grupo Hecho (turbiditas y plataformas carbonatadas; Mutti *et al*., 1972; Labaume *et al*., 1985) son los materiales que representan el mayor control tectónico en su sedimentación considerando su carácter de tectofacies y por el desplazamiento progresivo del depocentro de la cuenca hacia el S. Los materiales del grupo Hecho presentan evidencias de deformación sin-sedimentaria y progresión de estructuras de deslizamiento de plataformas hacia la cuenca, progresivamente más modernas hacia el N (megacapas; Barnolas *et al*., 1991). El Grupo Hecho ha sido la unidad más muestreada en este estudio. El sistema de margas eocenas (Arguis, Larrés), margas de prodelta y plataforma externa, colmata la sedimentación marina de la zona con una progresión deltaica (Sabiñánigo) y medios transicionales (Belsué-Atarés; Puigdefábregas, 1975). La sedimentación molásica continental, que puede representar más de 4000 metros de espesor, presenta evidencias de deformación con abanicos de capas y patrones geométricos en discordancia progresiva (Soler y Puigdefábregas, 1970; Puigdefábregas, 1975). Los materiales continentales basales tienen equivalentes marinos al N, mientras que la parte superior de la serie es únicamente continental.

La emersión de la estructura frontal surpirenaica produce abanicos de capas en los materiales de las unidades continentales de tamaño de grano más grueso de la Fm. Uncastillo hacia la cuenca de antepaís y la Fm. Bernués hacia la cuenca de *piggy-back*. Estos materiales están claramente relacionados con el levantamiento del frente y pierden buzamiento y tamaño de grano al distanciarse de éste dentro de la cuenca de antepaís. La Fm. Uncastillo progresa lateralmente a la Fm. Sariñena y distalmente a la Fm. Zaragoza en el sector central de la Cuenca del Ebro (Soler y Puigdefábregas, 1970; Quirantes, 1978; Arenas *et al*., 2001; Luzón, 2005).

La distribución de las estaciones de muestreo (Fig. 1) se ha realizado considerando la accesibilidad de afloramiento y la exigencia de cubrir los siguientes objetivos: i) obtener una distribución areal significativa de la estructura alpina del Pirineo meridional y de la parte de la cuenca de antepaís implicada en la tectónica pirenaica, ii) obtener un número significativo de muestras de todas las litologías representadas y iii) llegar a determinar con el mayor rigor posible la relación entre la fábrica magnética y las estructuras observadas a cualquier escala. Para alcanzar este último objetivo

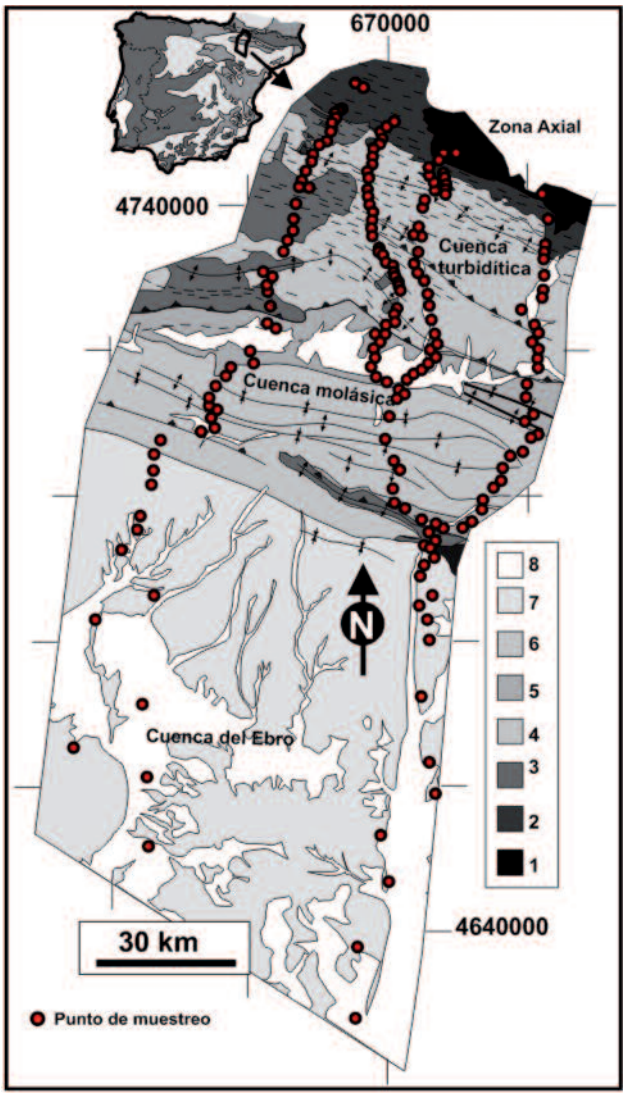


Fig. 1.- Localización de la zona de estudio y puntos de muestreo. Leyenda: 1) Paleozoico, 2) Mesozoico, 3) Rocas carbonatadas paleocenas y eocena, 4 flysch eoceno, 5) Margas eocena, 6) Formaciones Campodarbe y Bernués, 7) Formaciones Sariñena y Uncastillo, 8) Cuaternario.

ha sido preciso realizar muestreos muy densos en estaciones especialmente representativas. Por esta razón el número total de muestras obtenidas y procesadas (4380) es muy superior a la media prevista por estación.

El muestreo se ha realizado con una perforadora portátil refrigerada por agua y las muestras se han orientado con un dispositivo equipado de una brújula magnética. Los testigos se han cortado a dimensiones estándar para el análisis en laboratorio con una distribución de entre 9 y 12 testigos y 16-20 muestras por estación (punto de muestreo). El total de 208 estaciones tiene la siguiente distribución por grupo litológico: 9 estaciones en rocas paleozoicas (190 muestras); 36 en Cretácico Superior (en su mayoría en las unidades de Zuriza y Marboré; 688 muestras); 6 estaciones en Paleoceno y Eoceno Carbonatado (96 muestras), 78 estaciones complejas, atendiendo a los cambios litológicos en el flysch eoceno (1661 muestras), 27 estaciones en las margas eocenas de Larrés, Arguis, Pamplona (612 muestras); 28 estaciones en las formaciones continentales de

Campodarbe y Bernués (549 muestras) y 24 estaciones (486 muestras) en las formaciones Uncastillo, Sariñena y Zaragoza en la Cuenca del Ebro.

La distribución superficial se hizo siguiendo transversales según valles y zonas accesibles a lo largo de 4 secciones en el sector septentrional (Aragón, Aragón Subordán-Hecho, Ansó-Veral y Esca-Roncal), 3 en el sector central (Yesa-Sos, Santa Bárbara-Riglos, Oroel-La Peña) y 2 en el sector meridional (Sos-Tauste y Riglos-Zuera-San Juan de Mozarrifar). La densidad de muestreo en cada una de las transversales también fue variable dependiendo de los cambios litológicos y de estructuras: 1 km entre estaciones en el sector septentrional, entre 2 y 3 km en el sector de surco turbidítico eoceno, entre 3 y 5 km en la cuenca molásica y entre 5 y 10 km en la Cuenca del Ebro.

Equipamientos y técnicas de análisis

Las técnicas de fábricas magnéticas se han centrado en el análisis de la ASM, ya que, dada su versatilidad, velocidad y precisión puede abordarse de una forma sistemática a todo el volumen de muestras implicado en este estudio. Este análisis se ha llevado a cabo en el laboratorio de fábricas magnéticas de la Universidad de Zaragoza con un equipo KLY3-s (AGICO).

El uso de otras técnicas de fábricas magnéticas representa un incremento significativo de las labores de laboratorio, por lo que se han utilizado como técnicas de contraste y de discriminación. Con ellas se puede analizar la anisotropía asociada a distintas fases minerales y que integran el tensor de la ASM, como también, la posibilidad de establecer correspondencias entre componentes magnéticas, anisotropía de grano u otros elementos de fábrica tectónica. Las técnicas utilizadas se han centrado en i) la determinación de la anisotropía de susceptibilidad magnética a baja temperatura (LTAMS) y ii) la medida de anisotropías magnéticas de magnetizaciones artificiales (magnetización remanente isoterma AIRM, anhisterética total AARM o parcial ApARM y rotacional AGRM). La medida de la ASM de muestras sumergidas en nitrógeno líquido (LTAMS; Parés y Van der Pluijm; 2002a) permite el incremento de la susceptibilidad paramagnética al analizar las muestras a baja temperatura (incremento siguiendo la ley de Curie-Weiss). Esta medida representa el análisis de una fábrica de ASM donde la componente paramagnética ha sido incrementada. El análisis comparado de la ASM y la LTAMS permite determinar el comportamiento esperado principal de la contribución paramagnética a la ASM. La medida de la LTAMS se ha realizado con un equipo Shappire y una rutina de medida doble de 6 posiciones en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Michigan (metodología de Parés y Van der Pluijm, 2002).

La medida de anisotropías magnéticas de magnetizaciones remanentes artificiales se ha realizado también en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Michigan, analizadas con un magnetómetro criogénico 2G y magnetizaciones impartidas con magnetómetros de pulso Shappire y ASC. El análisis direccional y cálculo de los valores principales de la magnetización artificial se ha realizado con el programa ARMA (McCabe *et al*., 1985; Jackson *et al*., 1998) y un patrón de medida según 9 posiciones.

Como técnicas de valoración de la contribución paramagnética a la susceptibilidad se han realizado dos aproximaciones diferentes. La primera de ellas dependiente de la variación de la susceptibilidad con la temperatura siguiendo la ley de Curie-Weiss (Richter y Van der Pluijm, 1994) y la segunda a través de la comparación de la susceptibilidad bajo condiciones de bajo campo magnético aplicado (condiciones similares a las de la medida del kly3-s) y a alto campo (2.5 T). Con estos resultados se ha realizado el análisis de la fracción de la susceptibilidad saturada en dicho intervalo de campo aplicado y la contribución paramagnética a la susceptibilidad (susceptibilidad independiente del campo aplicado). Estas medidas se han realizado con un equipo PPMS (*Quantum Design* del laboratorio de Medida de Propiedades Físicas de la Universidad de Zaragoza).

Estos análisis han sido completados con distintas técnicas habituales en el campo del paleomagnetismo para el análisis de la coercividad de la remanencia de las muestras (natural y artificial), adquisición progresiva de remanencias artificiales (IRM, ARM) o parciales (pARM), desmagnetización por campos alternos (AF) o térmica según 3 ejes sometidos a campos de activación diferente (Lowrie, 1990).

Patrones direccionales de fábricas

El análisis direccional de las fábricas magnéticas, tanto para la ASM como de otras técnicas, se ha realizado a través de la proyección estereográfica de los ejes principales del elipsoide. La estadística utilizada en el tratamiento de los datos ha sido la de Jelinek (1978) y la de la distribución de Montecarlo para grupos de muestras según metodología de Constable y Tauxe (1990; *bootstrap naîve* y paramétrico; Tauxe, 1992).

El análisis del patrón de fábrica a escala de estación puede permitir su adscripción a una tipología a partir de: i) su simetría y distribución (Fig. 2), ii) las relaciones axiales de los elipsoides particulares que la definen (p. ej. parámetro de forma, T; Jelinek, 1981) o iii) a partir de la distribución acumulativa de los valores modulares de los ejes del elipsoide obtenidos del modelo del *bootstrap* (Tauxe, 1992). Estas 3 aproximaciones (Fig. 2) hacen referencia al carácter de simetría a escala de estación: i) fábricas planares para dispersión de los ejes mayor e intermedio a lo largo de un plano; prolatas para una definición del eje máximo del elipsoide frente a dispersión de los otros 2; triaxiales para una buena definición de los 3 ejes y diferentes entre ellos; ii) parámetro de forma de los elipsoides particulares ($T> 0$ para fábricas oblatas; $T<0$ para fábricas prolatas y un campo mixto triaxial para $0.5<T<-0.5$) o iii) a partir del solapamiento de la distribución acumulativa de módulos de ejes (*eigen* módulos) a escala de estación (oblatas para el solapamiento o baja diferenciación entre los ejes mayor e intermedio; prolatas para solapamiento de los ejes intermedio y menor; triaxiales cuando existe una individualización de los 3 ejes en el rango analizado o isótropas para el solapamiento de los 3 ejes; Tauxe, 1998).

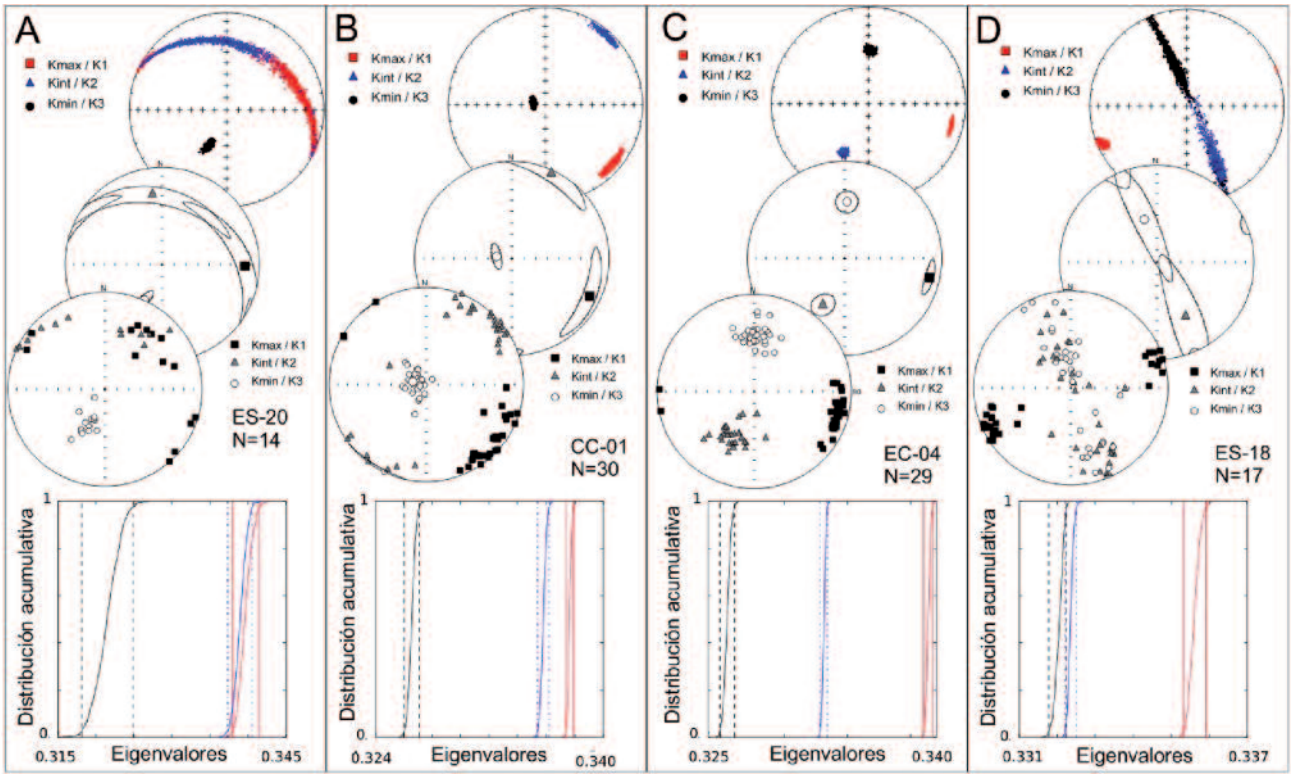


Fig. 2.- Patrones geométricos de fábricas identificados a través de la representación estereográfica de los ejes de susceptibilidad para cada una de las muestras para distintas estaciones; elipses de dispersión α95 (Jelinek, 1978); *bootstrap naîve* (Constable y Tauxe, 1990); distribución acumulada de módulos de ejes del elipsoide para los modelos de bootstrap para (a y b) fábricas oblata; (c) fábrica triaxial y (d) fábrica prolata.

El análisis de las fábricas magnéticas y su relación con elementos petroestructurales ha permitido definir una clasificación mixta de fábricas atendiendo a la forma de los elipsoides y su relación con los elementos de petrofábrica a escala de afloramiento. Esta clasificación permite definir 8 tipologías de fábricas principales que pueden integrarse en tres grupos en función de la relación entre la foliación magnética, la estratificación y la esquistosidad. Las fábricas descritas se han identificado tanto en el análisis de la ASM como también a través de otras técnicas de fábricas magnéticas.

Los tipos de fábricas están claramente asociados al contexto estructural en el que se encuentran. En la cuenca de antepaís y sectores meridionales de la cadena, pueden definirse dos tipos de fábricas (Fig. 3): tipo 1 con foliación magnética paralela al plano de estratificación, lineación magnética con amplia dispersión y una fábrica claramente oblata y tipo 2 con foliación magnética paralela al plano de estratificación y lineación magnética paralela a la dirección de capa. La distribución de estos 2 tipos de fábricas muestra una tendencia general de tipo 1 a 2 al aproximarnos al frente del cabalgamiento frontal surpirenaico. Además de la posición de las estaciones con respecto al frente, la posición estratigráfica (edad) de las estaciones analizadas influye también en la definición de las fábricas. Estos dos tipos de fábricas se identifican también en entornos más internos de la cadena; compárese en la figura 3 las estaciones s0-05 (localizada en la continuidad occidental del frente de cabalgamiento surpirenaico en la transversal de Ansó) y la estación Ca-06 (localizada en la cuenca eocena de Jaca).

Intercaladas con las estaciones anteriores, se identifica un tercer tipo de fábricas. Este tipo 3 se caracteriza por una foliación magnética paralela a la laminación, pero donde la lineación magnética no es paralela a la dirección de capa, no es horizontal, pero recobra una orientación similar a la de la macroestructura de la zona tras abatir la capa (Fig. 4). Los elipsoides de estas estaciones son principalmente oblatos y triaxiales. Estas fábricas sólo pueden identificarse si existe una variación de la coaxialidad entre el proceso responsable de la fábrica magnética y el plegamiento o basculamiento posterior de las capas. La diferenciación entre los tipos 1-2 y 3, responde entonces a un cambio local de las direcciones estructurales (en la fábrica o en la estructura) por lo que en condiciones de coaxialidad o en estaciones con estratificación horizontal, todas ellas formarían un solo grupo genético.

Dentro de este tipo 3 se pueden diferenciar 2 subtipos (Fig. 4); 3a donde la dirección de la capa no presenta una orientación dentro del rango habitual para la dirección de la cadena pero la lineación magnética sí tras abatir la capa, y un subtipo 3b donde la dirección de la capa presenta una orientación de tipo pirenaico pero la lineación no es horizontal y no está próxima a la dirección de la capa. En el caso del tipo 3a, abatir la capa a la horizontal produce que la lineación magnética pase a posición subhorizontal y presente dirección pirenaica (aspecto similar a las fábricas de tipo 2). Es decir, en estos casos la operación de abatir las capas reduce los tipos de fábrica y pone de manifiesto su basculamiento.

En el caso del tipo 3b, el abatimiento de la capa mues-

tra una lineación magnética de orientación norteada, no pirenaica.

Con independencia del proceso responsable en ambos subtipos, las fábricas se concentran más si se comparan tras ser abatidas a la horizontal. Los cambios locales de orientación de la estructura hacen perder la coaxialidad que se identifica en los tipos 1 y 2 y permite identificar un basculamiento aparente pasivo de las fábricas según estructuras de orientación no pirenaicas. Estos aspectos suponen que las fábricas de tipo 3a podrían clasificarse dentro de los dos tipos anteriores si se analizan abatidas o si la estratificación fuera horizontal.

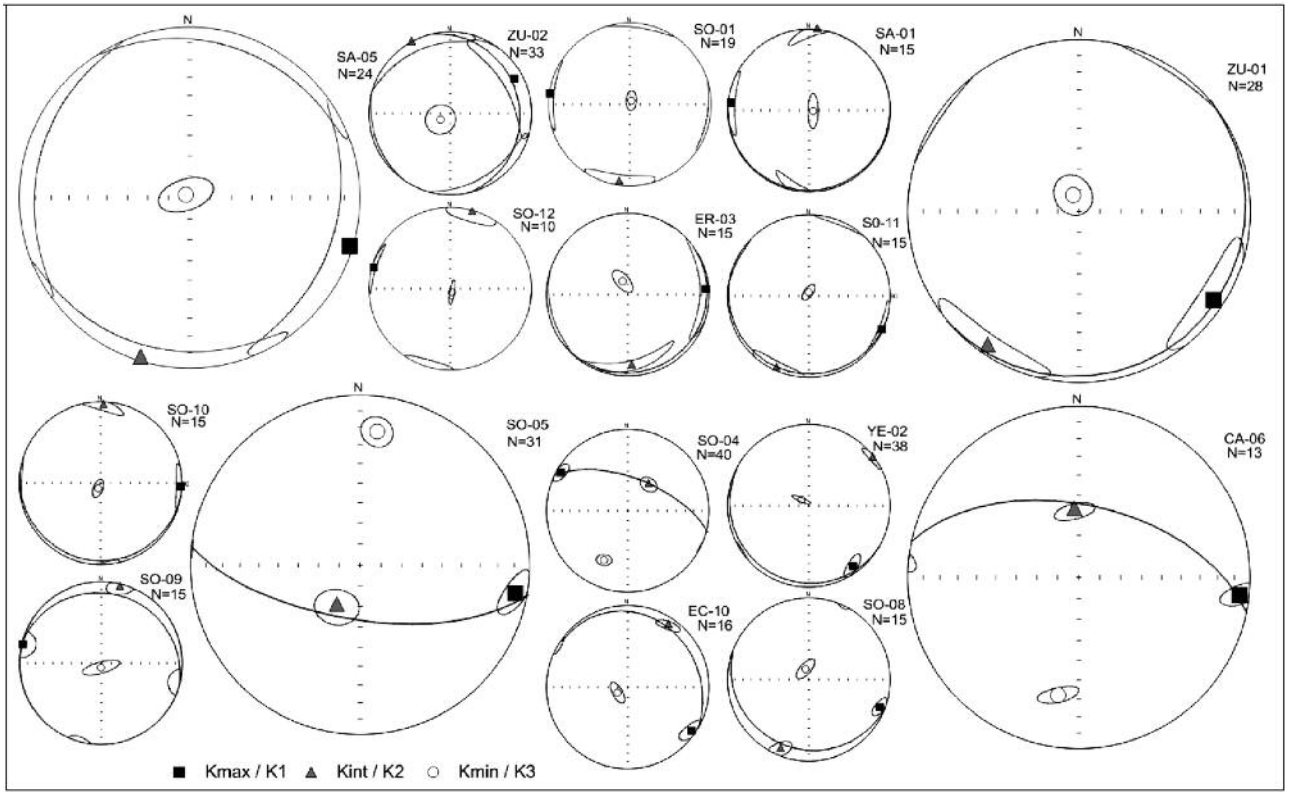


Fig. 3- Ejemplos de fábricas magnéticas asociables a los tipos 1 y 2 descritos. Los estereogramas de mayor tamaño son los casos más representativos. Se incluye en los estereogramas la representación de la estratificación media medida en campo. Las zonas de confianza en los estereogramas provienen del análisis estadístico de los datos mediante la estadística de Jelinek (1978).

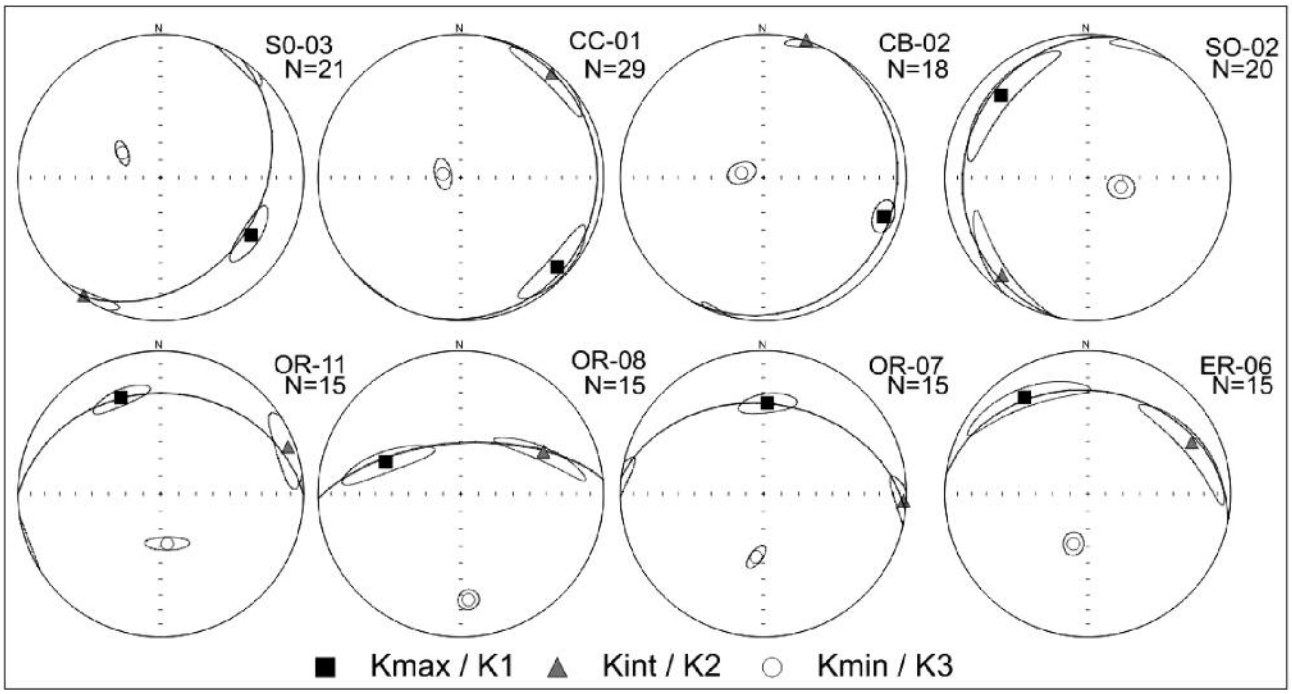


Fig. 4- Ejemplos de fábricas del tipo 3. Se incluye en los estereogramas la representación de la estratificación media medida en campo. Las zonas de confianza en los estereogramas provienen del análisis estadístico de los datos mediante la estadística de Jelinek (1978).

El segundo grupo de fábricas se desarrolla en sectores donde la esquistosidad macroscópica puede identificarse a escala de afloramiento. Los tipos de fábricas se definen en función de la relación entre la esquistosidad, la estratificación y la fábrica magnética (lineación y foliación magnética). El paralelismo entre pliegues, cabalgamientos y la esquistosidad que puede desarrollar abanicos con respecto a los pliegues, presenta una distribución subparalela tanto a escala regional como frente a las variaciones locales. En este sector, la lineación de intersección entre la estratificación y la esquistosidad suele presentar una orientación pirenaica y, en la mayoría de los casos, subhorizontal y paralela a la lineación magnética. En estos sectores se pueden definir una serie de tipos de fábricas atendiendo a la capacidad de adscripción de la lineación a la dirección de la capa, a la esquistosidad o a la lineación de intersección (Fig. 5).

En el tipo 4 se incluyen fábricas magnéticas con foliación magnética paralela a la laminación sedimentaria y lineación magnética paralela a la lineación de intersección entre la estratificación y la esquistosidad. Estas fábricas presentan geometrías triaxiales a prolatas. Este tipo es más fácilmente observable cuando estratificación y esquistosidad no presentan direcciones paralelas, ya que la lineación de intersección no presenta dirección pirenaica y permite identificar que la lineación magnética sigue la intersección entre estratificación y esquistosidad (Fig. 5). En otras estaciones, aunque de forma poco generalizada, además de lineación magnética paralela a la lineación de intersección se pueden identificar también pequeñas dispersiones de datos. Estas dispersiones pueden asociarse a la lineación magnética (dispersión de la lineación entre los planos de estratificación y esquistosidad) o para el polo de la foliación magnética entre los polos de la estratificación y esquistosidad. Estas dispersiones presentan pequeño desarrollo y muestran normalmente un mayor control (paralelismo) por parte del plano de foliación sedimentaria.

El tipo 5 presenta fábricas magnéticas con foliación magnética paralela a la esquistosidad (Fig. 6) y la lineación magnética se mantiene como en el tipo 4, paralela a la lineación de intersección. La morfología de estas fábricas es fundamentalmente triaxial, aunque se identifican también fábricas tanto prolatas como oblatas. El tipo 6 se caracteriza por una foliación magnética paralela al plano de la esquistosidad, y la lineación magnética no es paralela a la lineación de intersección. La lineación magnética puede ser paralela al buzamiento de la esquistosidad (máxima pendiente) o paralela a la dirección de amplificación de la estructura (Fig. 6). Los

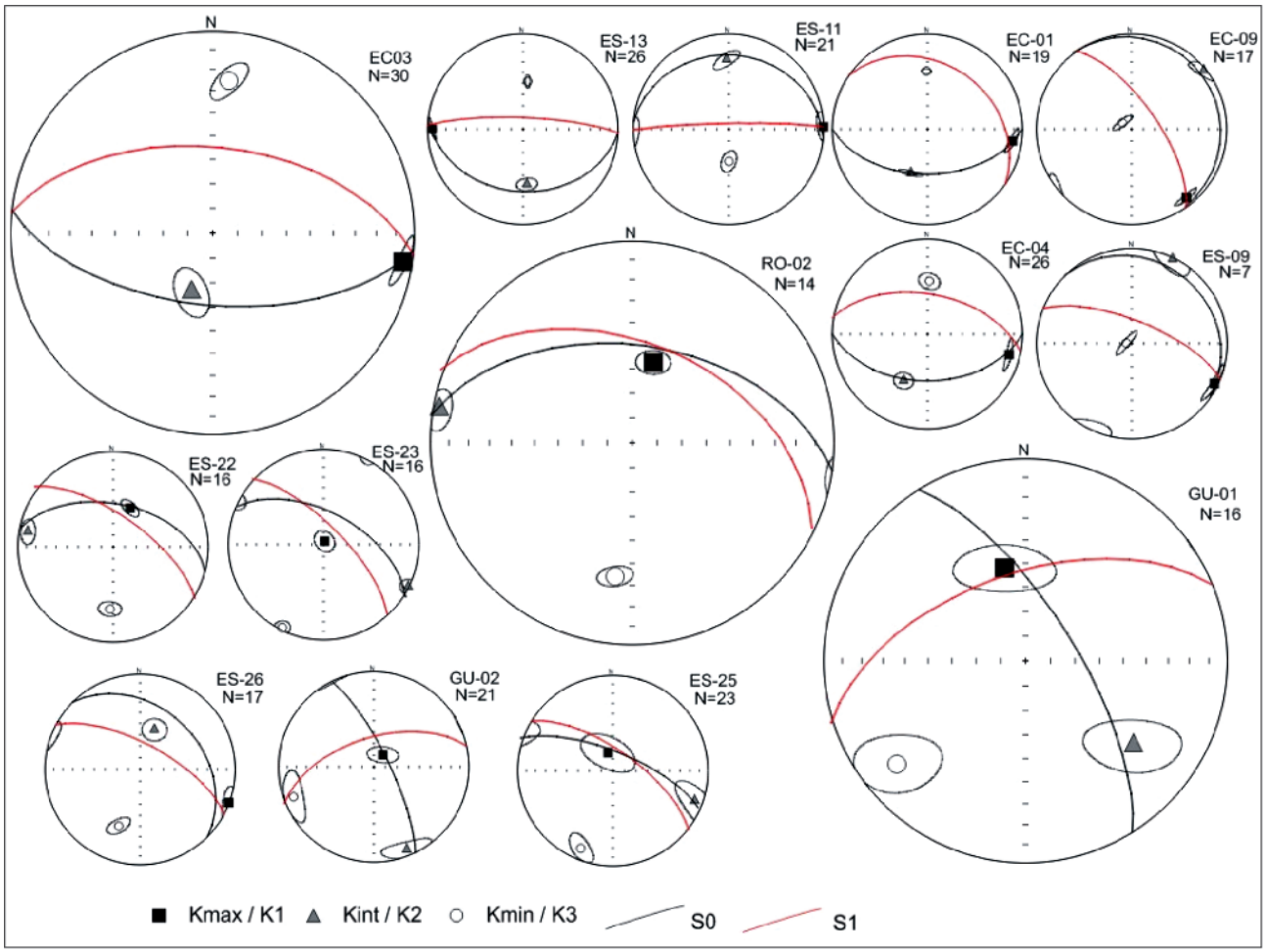


Fig. 5- Ejemplos de fábricas magnéticas donde la lineación magnética presenta una orientación paralela a la lineación de intersección. Se incluyen distintos casos identificados y a mayor tamaño aquellas más representativas. Se incluye en los estereogramas la representación de la estratificación y esquistosidad media medida en campo. Las zonas de confianza en los estereogramas provienen del análisis estadístico de los datos mediante la estadística de Jelinek (1978).

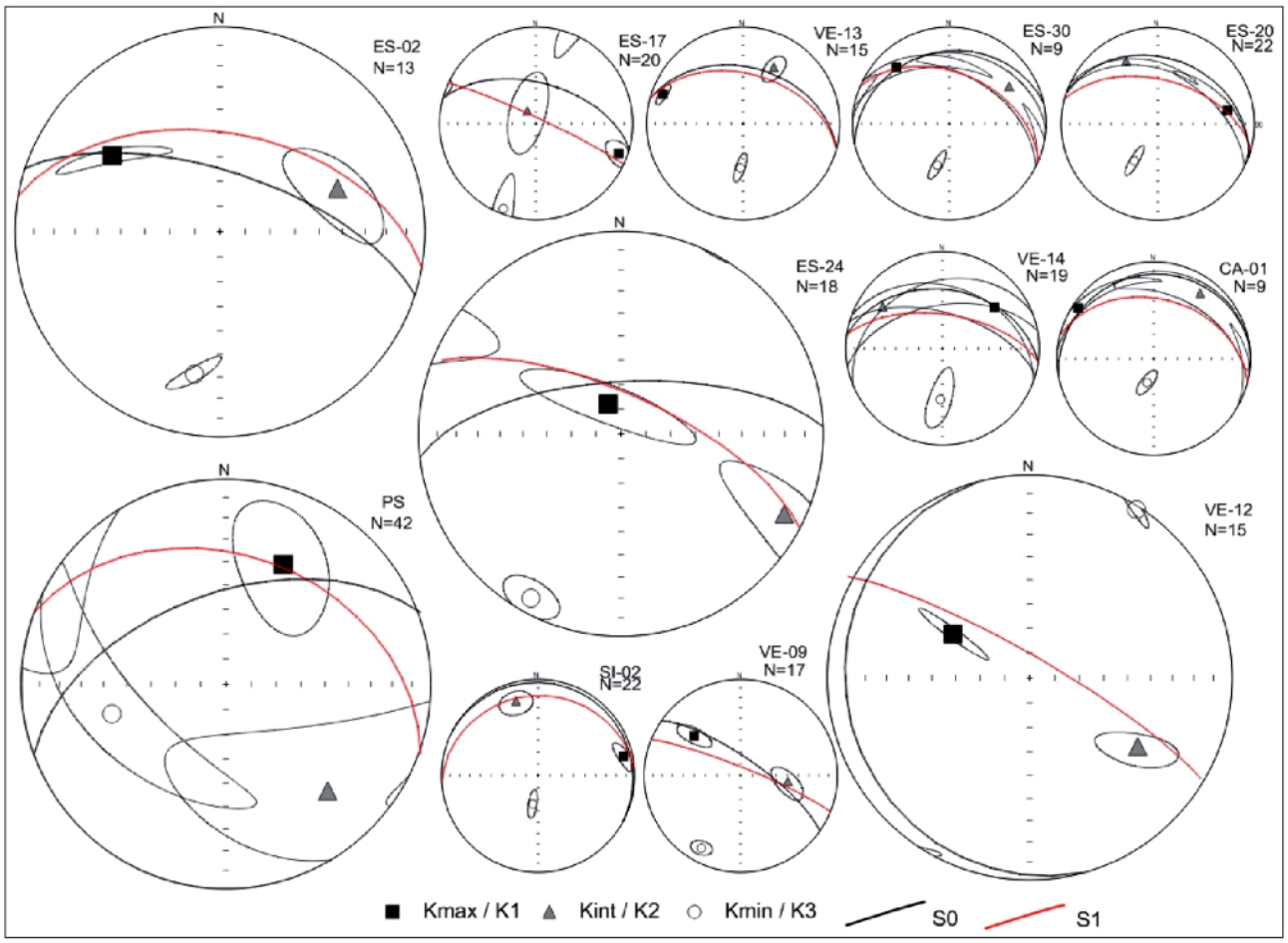


Fig. 6- Ejemplo de fábricas de los tipos 5 y 6 y variabilidad existente entre los mismos y patrones de guirnaldas de datos a lo largo de los distintos tipos analizados. A mayor tamaño se incluyen aquellas más representativas. Las zona de confianza en los estereogramas provienen del análisis estadístico de los datos mediante la estadística de Jelinek (1978). En los estereogramas se incluyen los planos medios de S0 y S1 medidos en campo.

elipsoides presentan morfologías variables pero dominando principalmente aquellos oblatos y triaxiales.

Los 2 grupos de fábricas descritos (grupo 1: fábricas 1, 2, y 3; grupo 2: fábricas 4,5 y 6) presentan una relación general con su distribución areal. Los tipos de fábricas 1, 2 y 3 son los únicos identificados a lo largo del borde septentrional de la cuenca de antepaís, a lo largo de la cuenca molásica continental y cuenca eocena marina de Jaca. Por otro lado, estas fábricas también se identifican en sectores más internos de la cadena intercaladas con las fábricas del grupo 2 y otros tipos de fábricas. Las fábricas de tipo 3B se identifican principalmente a lo largo de la vertiente septentrional de las Sierras Exteriores donde se han reconocido rotaciones de eje vertical. Las fábricas del grupo 2 se identifican tanto en el surco turbídítico, Sierras Interiores y Zona Axial, donde existen evidencias de esquistosidad macroscópica, o en sectores con esquistosidad incipiente, fuera del dominio propiamente esquistoso (por ejemplo al S del cabalgamiento de la Sierra de Leyre).

Además de los tipos anteriores, en relación con la dirección de capa y esquistosidad, existe un tercer grupo de fábricas donde no hay una relación directa con dichos elementos. Este tercer grupo de fábricas se caracteriza por presentar lineación magnética perpendicular a la macroestructura (es decir orientación perpendicular a la traza de los cabalgamientos y pliegues a nivel regional). La lineación magnética presenta una orientación perpendicular a la estratificación y esquistosidad (si éstas presentan dirección pirenaica) o mantiene una orientación N-S a NNE-SSW con independencia de la orientación de la estratificación y la esquistosidad a escala de estación (Fig. 7). El tipo 7 presenta fábricas oblatas-triaxiales y foliación magnética paralela a la estratificación. El tipo 8 presenta fábricas tanto prolatas como triaxiales y la lineación magnética es horizontal con independencia de la orientación de la estratificación o la esquistosidad (foliación magnética vertical, polo de la foliación magnética paralelo a la lineación de intersección o guirnaldas de los ejes mínimo e intermedio. K2 y K3; Fig. 7).

El análisis con otras técnicas de fábricas magnéticas diferentes a la ASM muestra los mismos tipos de fábricas definidos anteriormente. El objetivo de las técnicas aplicadas ha sido identificar la presencia de más de un patrón de partículas magnéticas en las muestras analizadas, la relación entre ellas y la ASM y establecer algunas consideraciones sobre las características mineralógicas de los distintos tipos de fábricas. En la figura 8 se incluye un análisis a escala de estación a través de distintas técnicas de fábricas (un estudio más detallado puede verse en Pueyo Anchuela *et al*., 2010a; 2011a y 2012a).

En el caso del pliegue analizado en la figura 8, la ASM muestra distintos patrones de fábricas dependientes de la posición estructural y del comportamiento magnético principal de la ASM. Se identifican fábricas en la ASM asocia-

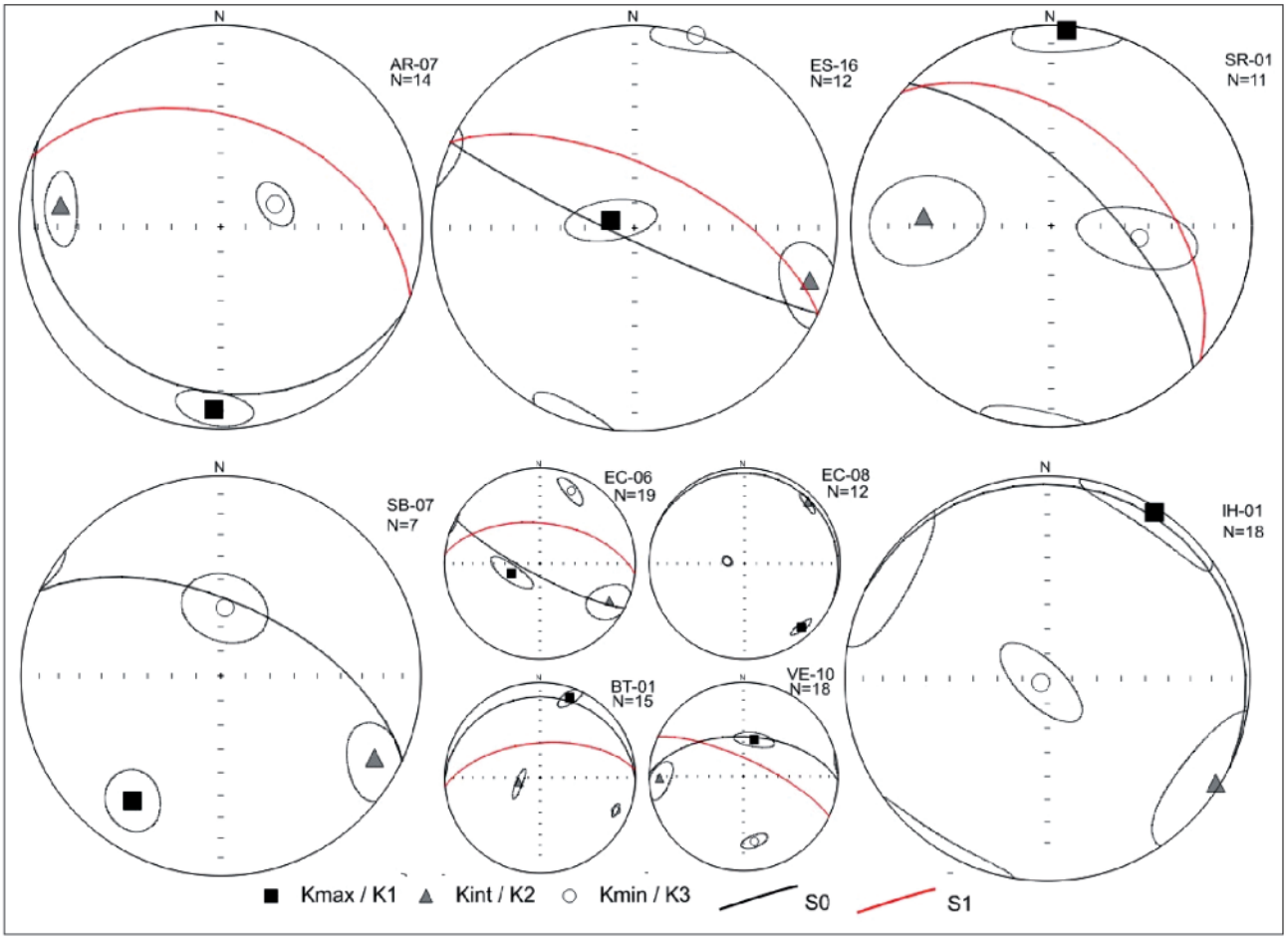


Fig. 7- Ejemplo de fábricas de los tipo 7 y 8 y variabilidad existente entre los mismos y patrones de guirnaldas de datos a lo largo de los distintos tipos analizados. A mayor tamaño se incluyen aquellas más representativas. Las zona de confianza en los estereogramas provienen del análisis estadístico de los datos mediante la estadística de Jelinek (1978). En los estereogramas se incluyen los planos medios de S0 y S1 medidos en campo.

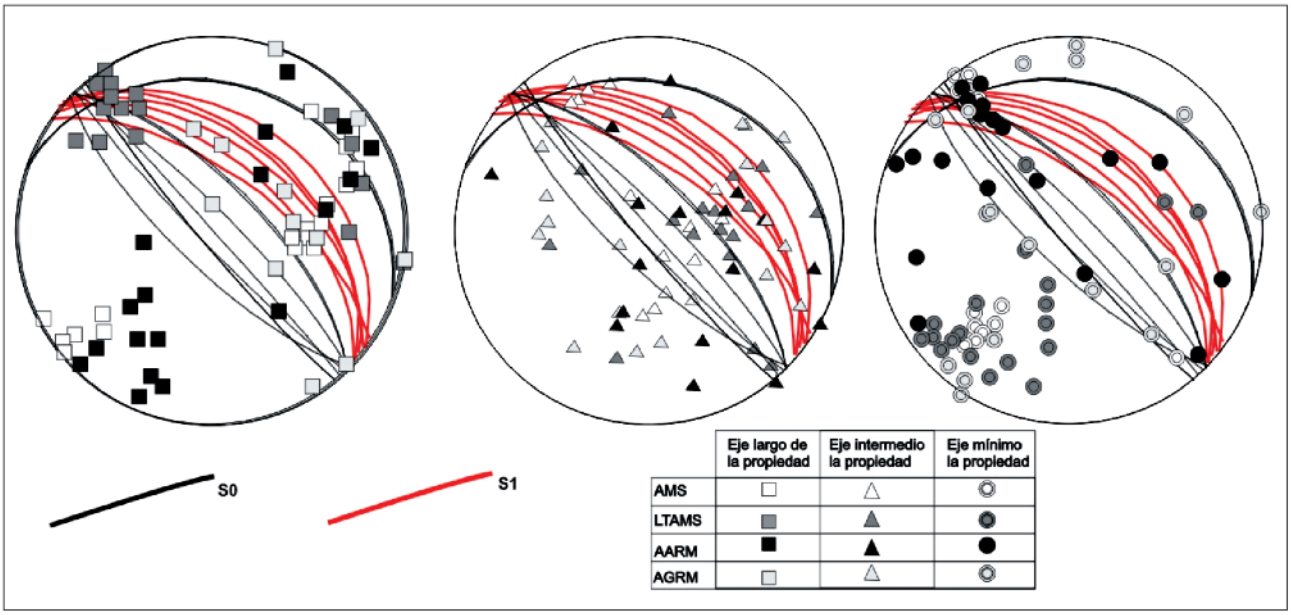


Fig. 8.- Análisis integrado de distintas técnicas de fábricas para una misma estación desarrollada sobre un pliegue (modificado de Pueyo *et al*., 2010a) y para distintas técnicas de fábricas magnéticas. Se incluye en los estereogramas la estratificación y esquistosidad medida en campo.

das al plano de la esquistosidad con lineación magnética próxima al buzamiento de la misma, lineación magnética horizontal y perpendicular a la estructura (con eje mínimo paralelo a la lineación de intersección), lineación magnética contenida en la estratificación y perpendicular a la dirección de capa y lineación magnética paralela a la lineación de intersección. Estas variaciones del elipsoide representan casi todos los tipos de fábricas descritos. Los análisis con otras técnicas de fábricas magnéticas muestran las mismas tipologías de fábricas pero presentan tendencias entre la técnica/propiedad analizada y la tipología de fábrica identificada. Las fábricas asociadas a la esquistosidad o a la lineación de intersección son más habituales en LTAMS, AGRM o ApARM de partículas de alta coercividad mientras que las fábricas de tipo 7 y 8 son más habituales en las fábricas de ARM y ApARM de partículas de baja coercividad. El tipo de fábricas identificado no se mantiene entre las distintas técnicas, apareciendo fábricas diferentes dependiendo de la técnica de análisis, pero dentro del espectro de variación identificado para todas las muestras en la ASM. Por otro lado, las fábricas donde se identificaba el polo de la foliación magnética paralelo a la lineación de intersección se obtiene también en fábricas de remanencia por lo que esta tipología, no esperada, no es debida a un cambio entre la anisotropía de grano y de la susceptibilidad.

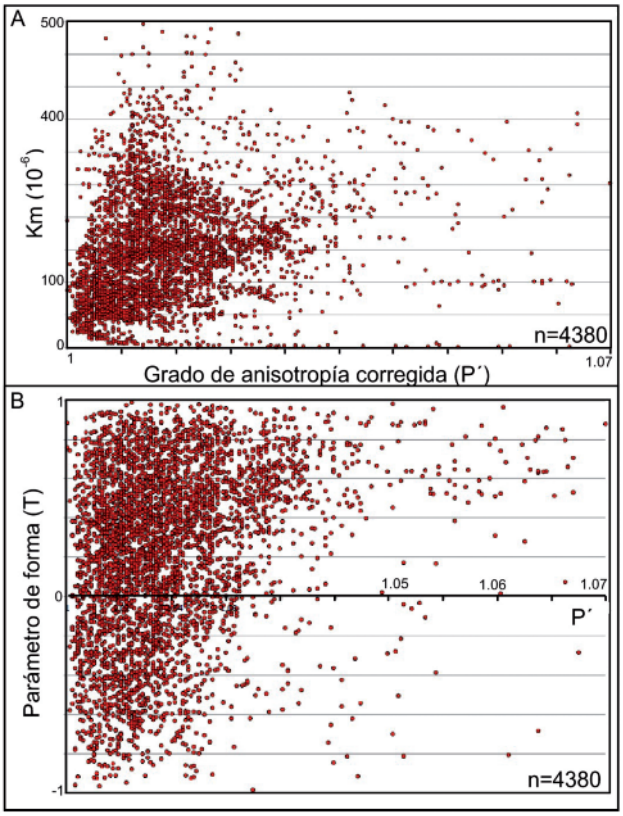


Fig. 9.- Diagrama de parámetros magnéticos de la ASM. A. Susceptibilidad media frente al grado de anisotropía corregida (Km vs. P´) y B. Grado de anisotropía frente al parámetro de forma (P´vs. T; parámetros tras la definición de Jelinek,1981).

Aspectos mineralógicos de las fábricas analizadas

A nivel de grupos de muestras se identifican algunas tendencias generales de incremento de la susceptibilidad media paralela al incremento del grado de anisotropía. Este aspecto puede deberse a la influencia de fases ferromagnéticas en la susceptibilidad (Fig. 9A) aunque estas tendencias no son únicas y algunos grupos de muestras no presentan una relación clara entre ambos parámetros. Además, las muestras con mayores valores del grado de anisotropía (por tanto, con mayor contenido en minerales ferromagnéticos) se encuentran dentro del campo oblato y no dentro del campo triaxial o prolato (Fig. 9B).

La fase portante principal de la susceptibilidad ferromagnética a lo largo de las litologías analizadas es una fase de baja coercividad (<60mT) y con temperaturas de desbloqueo en el rango de los 500-550ºC, que puede asociarse a magnetita. Dados los valores habituales de coercividad (10-30 mT) y la distribución paralela de la ASM y la AARM, estas magnetitas se encuentran dentro del rango de magnetitas multidominio (Fig. 10). Con menor desarrollo se identifican también en algunos de los grupos litológicos analizados, sulfuros de Fe (descenso de los ejes X e Y de la desmagnetización térmica de tres ejes en el rango de los 300-350ºC). Algunas litologías muestran también caídas en eje de alta coercividad de la IRM a temperaturas bajas (250ºC; goethita) como para temperaturas por encima de la temperatura de desbloqueo de la magnetita (>650ºC; hematites; Pueyo-Anchuela *et al*. 2011a, 2012b; Pueyo Anchuela, 2012).

Los resultados de estas técnicas revelan una baja variabilidad de la mineralogía ferromagnética. Las fases minerales presentes se encuentran asociadas principalmente a magnetita, localmente con influencias de sulfuros de hierro y fases de alta coercividad (goethita o hematites) sólo identificadas de forma significativa en las litologías carbonatadas y en ausencia de otras fases ferromagnéticas. Sin embargo, la correlación esperable de los cambios de la contribución paramagnética a la susceptibilidad con respecto a la susceptibilidad media, no es directa. El análisis de la susceptibilidad media frente a la contribución para- o ferromagnética a la susceptibilidad, presenta una tendencia general para valores entre los 150 y 275 x 10^{-6} (Pueyo *et al*., 2008) que no se ajusta a una correlación directa.

La comparación entre el grado de anisotropía y la susceptibilidad media en muestras donde se controla la contribución paramagnética a la susceptibilidad, indica que no existe una correlación entre la susceptibilidad ferromagnética y el grado de anisotropía corregida (Fig. 11 A y B). El análisis del grado de anisotropía y la definición de la lineación magnética para grupos de muestras (Fig. 11D) tampoco presenta una correlación directa (aunque sí que los mayores valores de P´ se desarrollan en estaciones donde la lineación magnética está mejor definida a escala de estación). En el caso del parámetro de forma, predominan los elipsoides oblatos (Fig. 11E). Las muestras que presentan mayores valores del parámetro de forma (T) se corresponden con aquellas donde se identifica también una mayor definición de la foliación magnética tanto a escala de muestra (parámetro F) como a escala de estación (estadística de

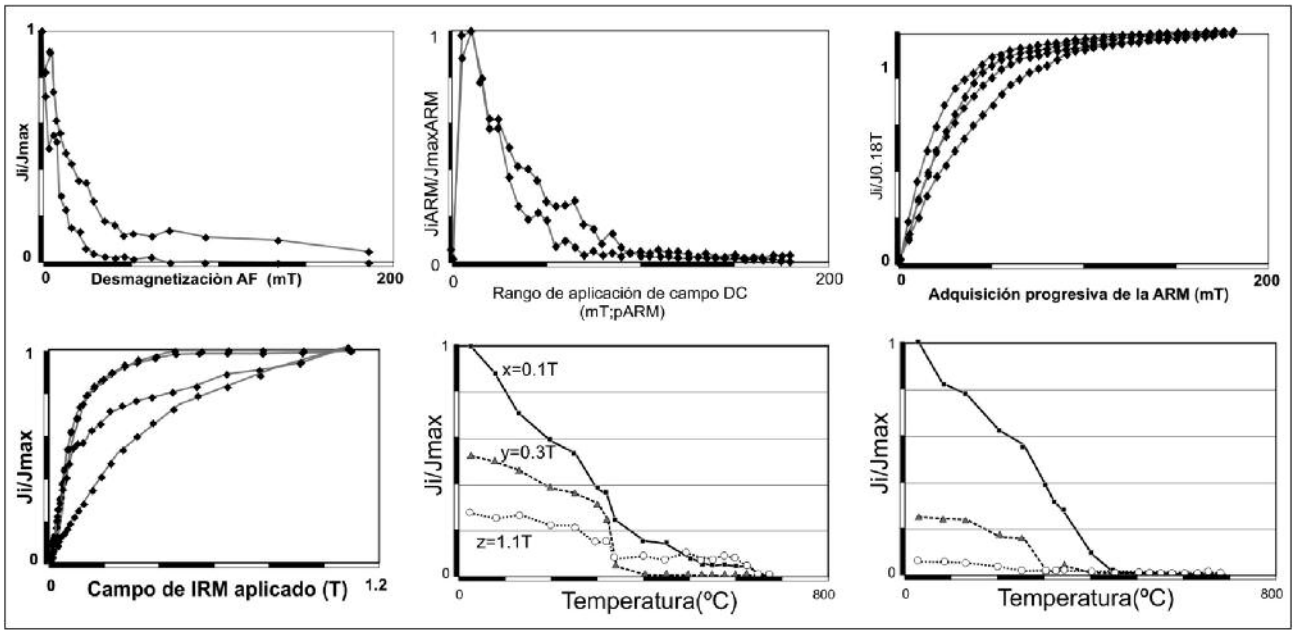


Fig. 10.- Principales resultados obtenidos para distintas técnicas de identificación ferromagnética a partir de la desmagnetización AF, adquisición parcial de la remanencia magnética anhisterética, adquisición progresiva de la ARM, adquisición progresiva de IRM y desmagnetización térmica de la IRM de 3 ejes (Lowrie, 1990; X=0.1T; Y= 0.3 T; Z=1.1T).

Jelinek, 1978). El análisis comparado de distintos parámetros magnéticos (Fig. 11) muestra que no sólo la susceptibilidad está influenciada por las fases ferromagnéticas presentes sino que también afectan a la anisotropía del elipsoide de la ASM. Sin embargo, no presenta una relación directa y por lo tanto no es el factor determinante del tipo de fábrica magnética identificado.

Discusión.

El análisis de la relación entre la deformación y las fábricas magnéticas muestra, en posiciones meridionales de la cadena, una ASM asociable a la deformación en posiciones de decenas de kilómetros al S del frente pirenaico. Este patrón se caracteriza por un incremento de la definición de la lineación magnética, de orientación perpendicular al acortamiento inferido, al aproximarse al frente de cabalgamiento. Esta progresión se produce con morfologías oblatas e incrementos de la definición de la lineación magnética en el plano de la estratificación, incremento de la anisotropía a escala de muestra (> P´ y T) e incremento de las diferencias acumulativas de las dimensiones de los ejes del elipsoide (paso de las fábricas de tipo 1 a 2). Los elipsoides de la ASM pasan de morfologías oblatas a triaxiales en la progresión de tipos 1 a 2. El tipo 3 no presenta cambios de la morfología del elipsoide con respecto a las fábricas del tipo 1 o 2 o de la definición de las mismas a escala de estación (Fig. 12). La principal diferencia entre fábricas de tipo 1 a 3 es la cronología relativa que puede inferirse de las mismas. Las fábricas de tipo 3 presentan un basculamiento y, dada la orientación de la estructura que bascula la fábrica, permite identificar que la lineación magnética tenía orientación pirenaica antes del plegamiento. Este basculamiento no coaxial permite identificar que tanto los casos 1, 2 y 3, representan fábricas pre-plegamiento asociables a un proceso de acortamiento paralelo a las capas y basculado coaxialmente (1 y 2) o basculadas por estructuras de orientación diferente a la pirenaica (3A). El segundo subtipo de las fábricas 3 (3B), donde la dirección de la capa es de orientación pirenaica pero la ASM registra un proceso pre-plegamiento, puede interpretarse como adquirida antes de la rotación de eje vertical de la zona. Esta circunstancia prueba el registro de un acortamiento pre-plegamiento y pre-rotación tectónica (Pueyo Anchuela *et al*., 2012b). En sectores más septentrionales, como ocurre en el caso de las fábricas de tipo 3, también se pueden identificar estaciones donde se ha producido un basculamiento de las mismas. Este aspecto es identificable en aquellos casos en que la capa no es coaxial con el proceso responsable de la adquisición de la fábrica (normalmente cuando la capa no tiene dirección pirenaica). En estos casos se puede identificar el basculamiento de la ASM y discriminar su origen respecto a un proceso pre-plegamiento, sin-plegamiento o siguiendo la lineación de intersección entre S0 y S1. En otros casos, la lineación magnética sigue la lineación de intersección cuando la estratificación y la esquistosidad no son exactamente paralelas. En el caso de estaciones con direcciones paralelas para S0 y S1 y lineación de intersección paralela a ambos planos, las fábricas no permiten identificar de forma inequívoca si se trata de estaciones de los tipos 2 o 4. El estudio en detalle de estas estaciones en los dominios con esquistosidad y sin posibilidad de discriminar entre la dirección de la capa, de la esquistosidad o con el azimut de la lineación de intersección permite identificar algunas características que pueden ayudar en la adscripción de dichas fábricas. Éstas no presentan desarrollos significativos de guirnaldas de datos de los polos de la foliación magnética entre los polos de la estratificación y de la esquistosidad.

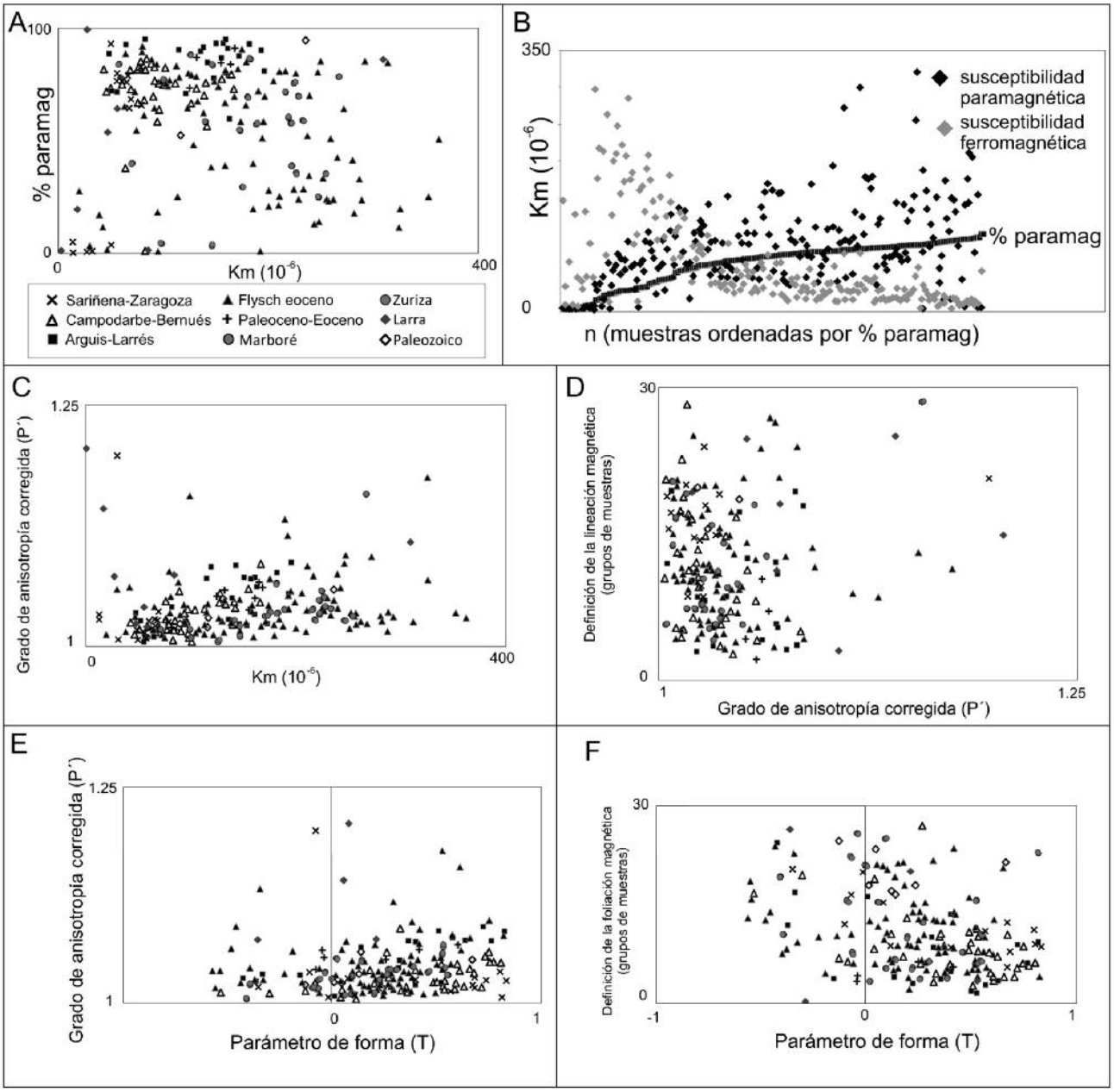


Fig. 11.- Análisis de parámetros magnéticos dependiendo de las características mineralógicas de las muestras, la litología y los parámetros de anisotropía de los elipsoides de la ASM. A. Diagrama comparado de la contribución paramagnética a la susceptibilidad frente a la susceptibilidad media. B. Comparación de la contribución paramagnética a la susceptibilidad (%) frente a la susceptibilidad media equivalente (para volúmenes de análisis de ASM estándar) ferromagnética y paramagnética. C. Diagrama de susceptibilidad media frente al grado de anisotropía corregida. D. Comparación del grado de anisotropía corregida (P´) frente a la definición de la lineación magnética para grupos de muestras (E12 de Jelinek, 1978). E. Parámetro de forma (T) frente al grado de anisotropía corregida (diagrama de Jelinek, 1978). F. Gráfico comparado del parámetro de forma frente a la definición de la foliación magnética (E32 de Jelinek, 1978).

Sin embargo, sí se pueden identificar cambios en la simetría de las zonas de confianza de la estadística de Jelinek (1978) o en la distribución de los datos obtenidos del modelo de *bootstrap* de los distintos ejes magnéticos a escala de estación. La lineación magnética suele distribuirse dentro del plano de foliación donde el ángulo mayor de su zona de confianza se dispersa sobre el plano macroscópico principal (estratificación o esquistosidad, Fig.12A). En el caso de las estaciones de tipo 1 a 3, este aspecto pone de manifiesto su relación con la estratificación y no con la dirección de la capa. Sin embargo en sectores más internos de la zona de estudio y donde la lineación magnética no es fácilmente asignable a la dirección de la capa, a la esquistosidad o a la lineación de intersección, el eje mayor de la elipse de dispersión de los datos no sigue ninguno de los planos. Esta dispersión se produce entre ambos planos y siguiendo la dirección que une los polos de la estratificación y la esquistosidad; Fig. 12B). En el caso de los polos de la foliación se identifica una distribución elíptica cuyo eje mayor se dispersa en la dirección entre los polos de S0 y S1. Esta dispersión, en general baja, marca una anisotropía de la dispersión de los polos de la foliación magnética aunque su

media suele aparecer concentrada sobre uno de los polos de los planos macroscópicos analizados (Fig. 13C).

Esta anisotropía de la distribución de ejes, Kmin y Kmax, y el desarrollo de fábricas triaxiales en sectores con esquistosidad, son en ocasiones la única evidencia de la influencia de la deformación esquistosa en las fábricas de ASM. La identificación de fábricas asociadas a dicho plano en otras técnicas de fábricas magnéticas indica la presencia

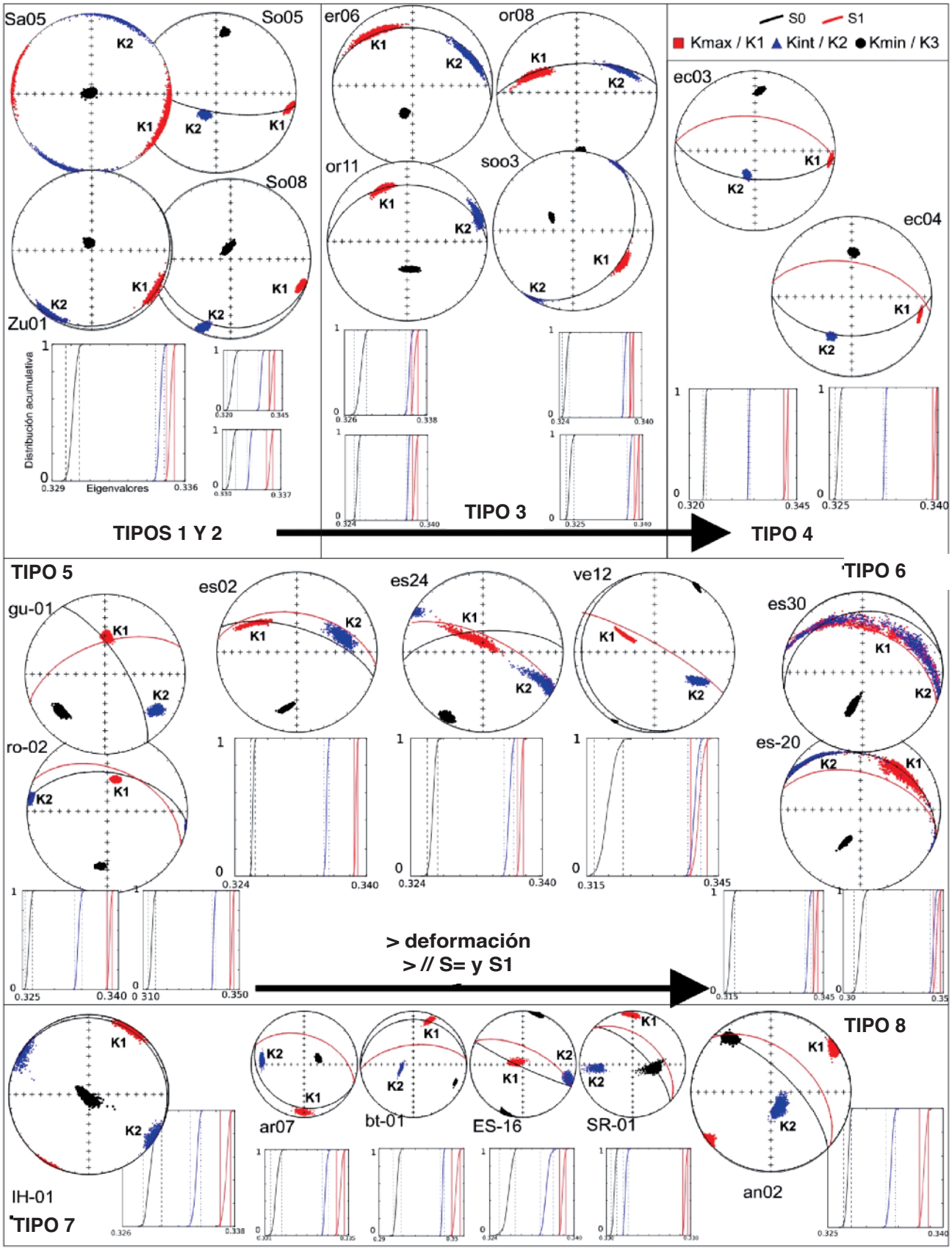


Fig. 12.-Modelos de *bootstrap* y distribución acumulativa de *eigen*-módulos para los distintos tipos de fábricas analizados.

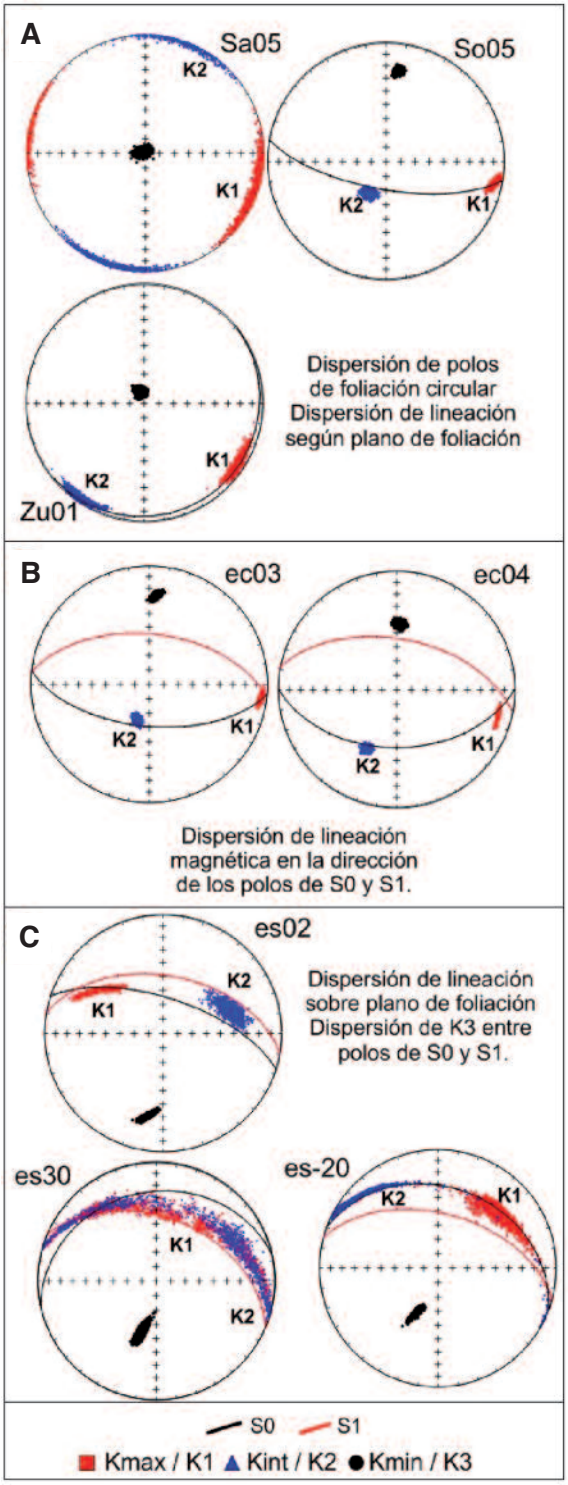


Fig. 13.- Ejemplos de cambios en la anisotropía de la distribución de ejes a escala de estación a través de modelos de *bootstrap* para A. Dispersión de la lineación según en plano de foliación sedimentaria. B. Dispersión de la lineación magnética independientemente de los planos de foliación macroscópica. C. Dispersión de los polos de foliación magnética entre los polos de estratificación y esquistosidad.

de partículas que registran la deformación esquistosa aunque la ASM no muestre una relación directa.

Este modelo de competencia de fábricas se identifica cuando siguiendo la progresión de la deformación se pasa de fábricas oblatas asociadas a S0, a fábricas triaxiales asociadas a la lineación de intersección, manteniendo la lineación magnética paralela a la lineación de intersección y foliación magnética paralela a la estratificación. Estas variaciones se producen dentro del campo triaxial. Hacia dominios más internos se identifican fábricas con foliación magnética paralela al plano de la esquistosidad y lineación magnética paralela a la dirección de amplificación de la estructura o buzamiento de la esquistosidad (Fig. 12).

Sin embargo, el modelo anterior no presenta una progresión lineal a lo largo de la cadena como tampoco una relación independiente de la estructura local o de las relaciones geométricas entre los planos de referencia analizados. De esta forma, se identifican fábricas planares con foliación magnética paralela a la esquistosidad en condiciones meridionales, intercaladas con fábricas asociadas al acortamiento paralelo a las capas y de lineación de intersección. Localmente el tipo de fábrica identificado en la ASM puede presentar una relación directa con la estructura local. En el surco turbidítico las fábricas de tipo 6 son más habituales en flancos inversos de pliegues o al S del cabalgamiento de la Sierra de Leyre. Este aspecto es significativo para identificar este tipo de fábricas en condiciones externas del dominio de la esquistosidad regional pirenaica. Por otro lado, la relación angular entre S0 y S1 influye en la definición de las fábricas, adquiriendo las distribuciones más oblatas cuando ambos planos forman bajos ángulos en condiciones internas de la cadena (Fig. 12).

Al igual que los tipos de fábricas, las variaciones de los parámetros magnéticos también muestran una distribución heterogénea. La variación litológica, sobre todo en los grupos litológicos carbonatados, influye en las partículas magnéticas presentes en las rocas analizadas. Esta variación modifica los rangos de anisotropía máxima que pueden desarrollarse en función de las partículas magnéticas presentes, pero condicionadas por la tectónica y la distribución estructural de las estaciones. Por otro lado, el análisis de subfábricas permite identificar varios tipos en las mismas muestras aunque no sean evidentes en la ASM, lo que determina que la ASM presente una distribución acorde con la competencia de distintas partículas con orientaciones variadas.

Los tipos 7 y 8 (Grupo de fábricas 3; Fig. 7) no parecen responder al modelo planteado para las fábricas 1 a 6 descritas anteriormente. La distribución de ejes a escala de estación, la anisotropía de las zonas de confianza (Fig. 12) así como la variación de los parámetros magnéticos, presenta también indicios de competencia en la ASM. Estos indicios se manifiestan por: i) la identificación de fábricas magnéticas diferentes a la ASM; ii) un mayor desarrollo de los tipos 7 y 8 cuando las fábricas de ASM son principalmente ferromagnéticas y iii) la presencia de patrones poco definidos en el ASM y distribuciones tanto oblatas-triaxiales o incluso prolatas, dependiendo de la contribución paramagnética a la susceptibilidad. El origen de una lineación magnética perpendicular a la dirección de acortamiento regional se ha descrito en distintos contextos como asociada a la cizalla paralela al desplazamiento de los cabalgamientos. La distribución de ejes de ASM puede

presentar tanto foliación magnética contenida en el plano vertical de desplazamiento (conteniendo a los ejes Kmax y Kint) o fábricas mixtas con influencia de la fábrica resultante de la compactación previa donde el plano de movimiento contiene a los ejes Kmax y Kmin (Tarling y Hrouda, 1993, entre otros). En el caso estudiado, las fábricas de tipo 7 y 8 presentan además una correlación con los incrementos de la susceptibilidad media y de la contribución ferromagnética a la susceptibilidad. En las estaciones más ferromagnéticas las fábricas de tipo 7 y 8 controlan la ASM y suelen estar mucho más desarrolladas en ambientes próximos a cabalgamientos. Sin embargo, las mismas tipologías se pueden identificar en fábricas de remanencia aunque no se identifiquen en la ASM. Ambos tipos presentan relaciones variables con respecto a la estratificación. En algunos casos, la lineación magnética está contenida en la estratificación y presenta inmersiones variables, mientras que en otros la lineación magnética es horizontal, con independencia del buzamiento de la estratificación. La distribución de estos tipos, tanto en la ASM como en otras técnicas, parece mostrar un mayor desarrollo de aquellas asociadas a la estratificación en ambientes septentrionales y localmente basculadas por la estructura en el dominio de las Sierras Interiores. Esta distribución podría ser un reflejo de un proceso de cizalla regional que afectó a determinados niveles en posición subhorizontal y a otros plegados. El mayor desarrollo de estas fábricas en el sector septentrional podría estar registrando los procesos asociados al emplazamiento de la lámina de Gavarnie, que afectó a estructuras previas del sistema de Larra.

Distribución de los patrones de fábricas. Modelo evolutivo.

El análisis de los parámetros magnéticos a lo largo de la zona estudiada muestra, para los tipos 1 a 6, la tendencia esperable a partir del incremento de la deformación (paso de fábricas oblatas a triaxiales, prolatas y oblatas de nuevo en la zona más interna de la cadena; Fig. 14). Sin embargo, su reflejo en el patrón direccional de las fábricas no presenta un paralelismo directo con el elipsoide de deformación que debiera resultar. Mientras que en el entorno meridional, al S del frente de esquistosidad, hay una correlación clara entre el desarrollo de fábricas y el incremento de la deformación (paso de fábricas oblatas a más triaxiales y luego a prolatas), en las zonas con esquistosidad las fábricas magnéticas no presentan, de forma generalizada, una foliación magnética paralela al plano de la esquistosidad. Esta variación muestra un cambio de la sensibilidad aparente de las fábricas magnéticas al registro de la deformación. Éstas, presentan una fábrica de acortamiento tectónico en la ASM en condiciones de baja deformación (en ocasiones sin evidencias externas), pero, aparentemente, la esquistosidad no afecta a la ASM en dominios esquistosos. En las fábricas sin esquistosidad macroscópica, se identifica un incremento progresivo de la definición de las fábricas hacia dominios de mayor deformación. Esta pauta es compatible con distintos episodios de acortamiento paralelo a las capas con mejor definición de las fábricas asociadas a determinadas estructuras (Fig. 14A y B). Esta progresión presentaría la misma tendencia que la deformación pirenaica. En estas condiciones, la deformación interna estuvo principalmente concentrada en el bloque inferior con respecto a los cabalgamientos. Por otro lado, el carácter sin-sedimentario de algunas de estas estructuras produjo el desarrollo de fábricas magnéticas muy tempranas, en estados de reología muy plástica. Estos aspectos pueden comprobarse en el campo cuando se identifican estructuras de plegamiento afectando al flysch eoceno con *mullions* que requieren de estados poco litificados y con contraste de ductilidad para su desarrollo (ver Gil *et al*., 2006).

La progresión de fábricas asociada a procesos de acortamiento paralelo a la capas pudo afectar de forma diferencial y en distintos momentos a las rocas analizadas. La distribución de los tipos de fábricas y de los parámetros magnéticos muestra anomalías de la tendencia general asociada a cabalgamientos. Estas variaciones se relacionan, con incrementos progresivos de la deformación inferida hacia los cabalgamientos y reducción de la misma al pasar a su bloque superior (Fig. 14 A y B). Esta pauta final está más controlada por la última estructura que sometió a un acortamiento paralelo a las capas a las rocas analizadas, más que a la identificación de distintas fases de deformación aditiva a escala de estación. Este dispositivo geométrico puede responder tanto a: i) un acortamiento regional coaxial a través de distintos episodios de acortamiento paralelo a las capas o ii) estar asociado a distintas estructuras, pero donde su diferenciación no es posible a escala de punto de análisis.

Estos factores producen que la configuración y patrón final registre principalmente la última estructura local desarrollada. La identificación de fábricas en la ASM asociadas a la esquistosidad (foliación magnética paralela al plano de la esquistosidad) se produce de forma paralela a la aparición de la esquistosidad macroscópica (Fig. 14C). Sin embargo, este patrón no se desarrolla de forma sistemática hacia sectores con persistencia de esquistosidad macroscópica y sólo se identifica localmente en sectores con alta deformación a escala de afloramiento (flancos inversos de pliegues anticlinales, alta penetratividad de la esquistosidad).

La aparición de fábricas asociadas a la lineación de intersección se identifica también en paralelo a la aparición de la esquistosidad, aunque haya otras que siguen la dirección de la capa y no la lineación de intersección en dominios internos de las transversales analizadas (Fig. 14C).

El análisis detallado de las fábricas de ASM en los casos donde se encuentra paralelismo entre la dirección de la capa, de la esquistosidad, de la lineación de intersección y de la lineación magnética muestra pequeñas guirnaldas de datos. Estas guirnaldas aparecen también asociadas a anisotropías de las zonas de confianza de la lineación magnética (según un plano ortogonal a la estratificación y a la esquistosidad) o afectando a los polos de la foliación magnética según la misma orientación. Discusiones similares han sido puestas de manifiesto en trabajos previos en el Pirineo a través del desarrollo de guirnaldas de datos (Parés

y Dinàres-Turell, 1993) o a través del análisis de la deformación en fábricas magnéticas (Parés *et al*., 1999; Parés y Van der Pluijm, 2002b; Parés, 2004).

La competencia entre dos fábricas planares ha sido también analizada matemáticamente (Housen *et al*., 1993) y en función del ángulo entre fábricas asociadas a la estratificación y esquistosidad (Debacker *et al*., 2004 y 2009). Estos trabajos presentan resultados comparables a los aquí obtenidos para el desarrollo de fábricas de lineación de intersección, aunque en este caso existen otros factores sobreimpuestos además de la relación angular entre los planos de S0 y S1. Estas diferencias hacen que éste no sea el

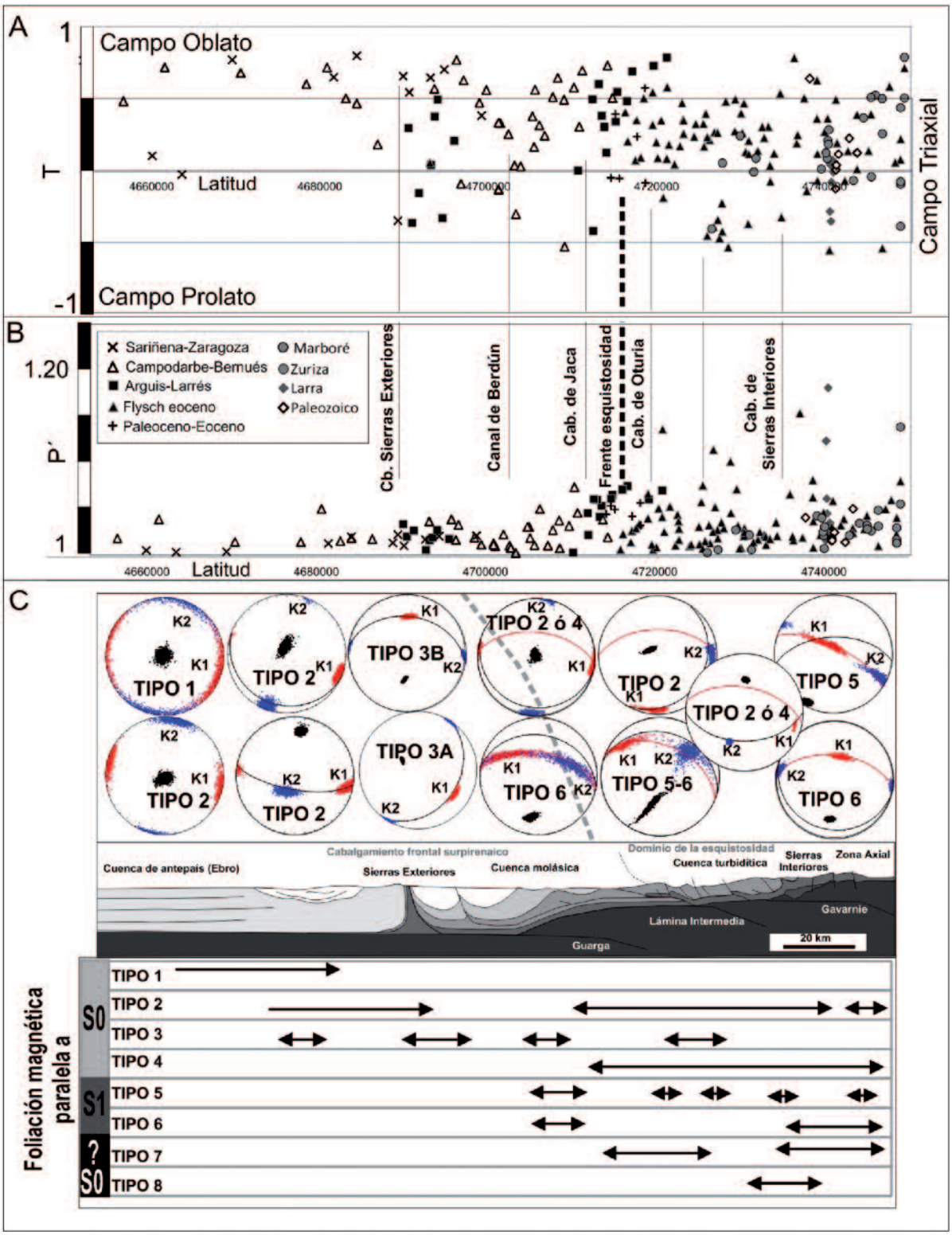


Fig. 14.- Análisis regional de parámetros y distribución de fábricas (representadas las medias de parámetros para cada estación analizada) a lo largo de la zona de estudio. A. Variación latitudinal del parámetro de forma, B. del grado de anisotropía y C. de los tipos de fábricas y su distribución regional. Se incluye referencia en las figuras de algunas de las estructuras tectónicas de mayor desarrollo y la localización del frente de esquistosidad.

único factor que modifica los tipos de fábricas y los parámetros magnéticos. Entre estos factores se encuentra la presencia de una fábrica pre-esquistosa bien desarrollada (de acortamiento paralelo a las capas), las variaciones mineralógicas (fábricas asociadas a partículas paramagnéticas y ferromagnéticas) y la impronta de una fábrica ferromagnética asociada a la cizalla paralela a los cabalgamientos.

Los factores anteriores provocan la ausencia de paralelismo entre las fábricas de ASM y la deformación asociada a la esquistosidad. Sin embargo, se identifica la persistencia de una fábrica de acortamiento paralelo a las capas a escala de la cadena. Por otro lado, la relación entre ambos procesos, no es progresiva ya que la esquistosidad es de plano axial y no proviene de un desarrollo asociado a un acortamiento paralelo a las capas.

Esta variación en el registro de la ASM podría responder a un proceso de pérdida de sensibilidad aparente en las fábricas tanto por saturación de orientación de partículas como por presencia de un patrón previo ordenado (Borradaille y Alford, 1987; Pares y Van der Plujim, 2002; Robion *et al*., 2007). La distribución inhomogénea de fábricas en el dominio esquistoso (Pueyo-Anchuela *et al.*, 2012a) parece indicar la presencia de una competencia entre ambos registros en la definición de la ASM. La presencia de una petrofábrica pobremente definida o isótropa (al menos en el plano de la foliación sedimentaria) representó un medio en el que la deformación dejó fácilmente su impronta (caso de entornos de cuenca de antepaís). Sin embargo, cuando existe un patrón asociado a la deformación, su modificación o la impronta de nuevos procesos fue más complicada si no existieron cambios mineralógicos. Por otro lado, el momento resultante de la orientación de partículas magnéticas durante la deformación también pudo tener un papel importante en el registro de los procesos, sobre todo cuando algunas de las unidades de naturaleza sintectónica adquirieron una fábrica magnética asociada a la deformación en condiciones reológicas muy dúctiles (condiciones próximas a la litificación).

Conclusiones y consideraciones.

El análisis de fábricas magnéticas, y especialmente la ASM, muestra un claro cambio de la sensibilidad aparente en el registro de distintos procesos de deformación. Resulta llamativa la alta sensibilidad ante el acortamiento paralelo a las capas al Sur de cualquier otra evidencia de deformación y la ausencia de un patrón generalizado de fábricas asociadas a la esquistosidad en el dominio esquistoso pirenaico.

Aunque todas las fábricas analizadas presentan una relación con procesos tectónicos en la zona y, además, se registra la impronta de la esquistosidad en la ASM, su interpretación no es directa. La progresión general muestra fábricas asociadas a la esquistosidad a través de un dominio de lineación de intersección con pequeñas guirnaldas de datos afectando tanto a la lineación magnética como al polo de la foliación magnética. La progresión regional evoluciona desde fábricas oblatas bien definidas, asociadas a la estratificación, a patrones triaxiales en el dominio de aparición de la esquistosidad. Dentro de los patrones triaxiales se identifica primero una foliación magnética paralela a S0 y luego a S1. El domino más interno muestra fábricas de nuevo oblatas asociadas al plano de la esquistosidad

Esta tendencia se produce sin un cambio del patrón de ejes de la ASM, paralelos al elipsoide de deformación esperable en un entorno esquistoso. Entre los factores postulados como responsables de este cambio de sensibilidad, se encuentran la presencia de patrones ordenados de partículas magnéticas asociadas a un proceso de acortamiento paralelo a las capas, identificado a escala de cadena, y el desarrollo de fábricas en momentos de alta ductilidad (prelitificación), que no pudieron alcanzarse de forma generalizada durante el desarrollo de la esquistosidad.

Sin embargo, la impronta de la esquistosidad está presente, en algunas subfábricas o en condiciones puntuales de alta deformación interna o débil registro de otros procesos previos.

Los resultados obtenidos plantean la necesidad del cambio de metodología de análisis de datos en condiciones de desarrollo de la deformación de tipo coaxial y con sedimentación sin-tectónica. En este contexto, mientras que existe un claro paralelismo en condiciones de baja deformación o sometidas a procesos de acortamiento paralelo a las capas, los procesos asociados a la esquistosidad no parecen presentar la misma interpretación directa. Por otro lado, la progresión inhomogénea de las fábricas magnéticas está también controlada por el propio carácter inhomogéneo de la deformación.

El análisis desarrollado ha permitido determinar, sin marcadores externos, la identificación de distintos procesos de acortamiento paralelo a las capas según progresiones asociadas a estructuras locales, y deformación de bloque inferior sobre el que se superpone una deformación esquistosa asociada al desarrollo de pliegues y cabalgamientos. Localmente y asociada a mineralogías ferromagnéticas el modelo puede complicarse con el desarrollo de fábricas asociadas a la cizalla de emplazamiento de determinadas estructuras/cabalgamientos de los que tampoco existían evidencias previas en el análisis de campo, pero donde su impronta es previsible a escala regional.

El modelo de competencia entre distintas fábricas magnéticas que se plantea, sigue la pauta tradicional de cambios en la morfología del elipsoide a través de incrementos de la deformación (Fig. 15; Tarling y Hrouda, 1993; Parés y Van der Pluijm, 2002; 2004). Esta pauta se desarrolla desde fábricas oblatas, asociadas a la estratificación, a fábricas oblatas asociadas a la esquistosidad, pero con un dominio triaxial de la lineación de intersección de gran desarrollo. Este último dominio representa la práctica totalidad de las zonas medias-internas del Pirineo. El tipo de deformación en la zona analizada comparte similitudes geométricas y de contemporaneidad con la sedimentación sintectónica. Este aspecto supondría que este dominio de lineación de intersección pueda ser considerado como habitual en otros orógenos y que represente una pauta habitual en la sensibilidad de las fábricas de ASM a los procesos de deformación.

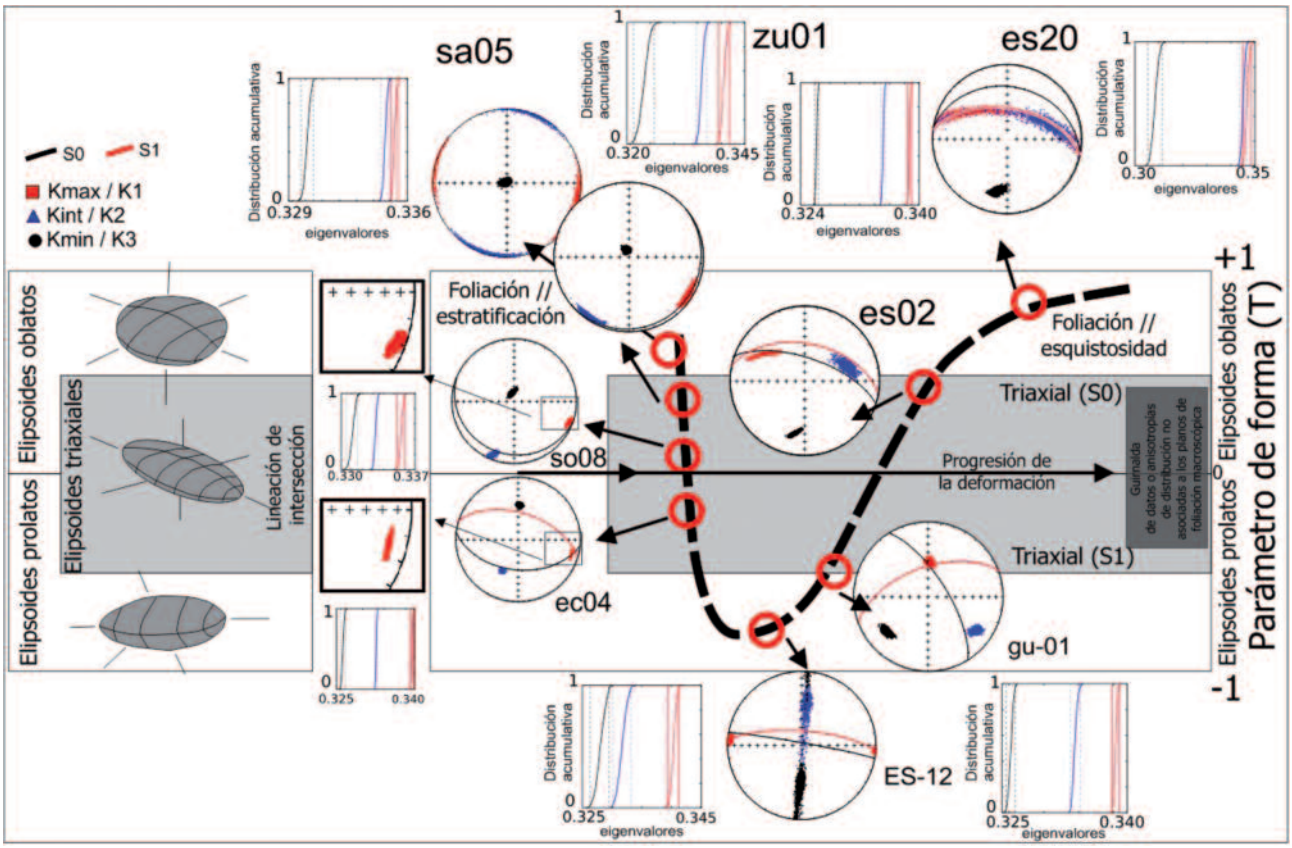


Fig. 15.- Modelo de desarrollo de fábricas magnéticas (ASM) para la zona de estudio en la vertiente meridional del Pirineo y borde septentrional de la Cuenca del Ebro.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por los proyectos BTE2002-04168-C03-01, CGL-2006-05817 y CGL2009-08969; el grupo de investigación GEOTRANSFER del Gobierno de Aragón y una beca FPU del primero de los firmantes. Los autores agradecen la labor desarrollada por los editores Luis M. Nieto y Juan A, Morales que junto a las sugerencias, comentarios y correcciones de Miguel Garcés y un revisor anónimo han mejorado significativamente las primeras versiones del manuscrito.

Material suplementario: una tabla con las coordenadas de cada una de las estaciones, la edad y litología de las muestras analizadas, los principales parámetros de anisotropía del elipsoide de la ASM y sus desviaciones, la información sobre la contribución paramagnética, ferromagnética y superparamagnética a la susceptibilidad está disponible en la web del grupo de investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza http://wzar.unizar.es/perso/geotransfer027/personal/Material_suplementario.pdf

Referencias

Arenas, C., Millán, H., Pardo, G. y Pocoví, A. (2001): Ebro Basin continental sedimentation associated with late compressional Pyrenean tectonic (north-eastern Iberia): control son basin margin fans and fluvial systems. *Basin Research*, 13: 65-89.

Arthaud, F. y Matte, P. (1975): Les decrochements tardi-hercyniens du sud-ouest de l'europe. Geometrie et essai de reconstitution des conditions de la deformation. *Tectonophysics*, 25: 139-141.

Barnolas, A. Samsó, J.M., Teixell, A., Toquella, J. y Zamorano, M. (1991): Evolución sedimentaria entre la cuenca de Graus-Tremp y la cuenca de Jaca-Pamplona. En: *I Congreso Grupo Español del Terciario*, Libro-guía de la excursión 1, Vic, 123 p.

Borradaile, G.J. y Alford, C. (1987): Relationships between magnetic susceptibility and strain in laboratory experiments. *Tectonophysics*, 133: 121-135.

Cámara, P. y Klimowitz, J. (1985): Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica (Cuencas de Jaca y Tremp). *Estudios Geológicos*, 41: 391-404.

Constable, C.G. y Tauxe, L. (1990): The *bootstrap* for magnetic susceptibility tensors. *Journal Geophysical Research*, 95: 8383-8395.

Debacker, T.N., Hirt, A.M., Sintubin, M. y Robion, P. (2009): Differences between magnetic and mineral fabrics in low-grade, cleaved siliciclastic pelites: A case study from the Anglo-Brabant Deformation Belt (Belgium). *Tectonophysics*, 466: 32-46.

Debacker, T.N., Robion, P. y Sintubin, M. (2004): The anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in low-grade cleaved pelitic rocks: influence of cleavage/bedding angle and type and relative orientation of magnetic carriers. En: *Magnetic fabric: Methods and Applications*. (F. Martin-Hernandez; C. Luneburg; C. Aubourg y M. Jackson, Eds.) Geological Society of London. Special Publication, 238: 77-107.

Durney, D.W. y Kisch, H.J. (1994): A field classification and intensity scale for first-generation cleavages. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 15: 257– 295.

Gil, A., Simón, J.L., Pueyo, O., Millán, H., Pocoví, A., Andrés, J.A., Arantegui, A., Arlegui, L.E., Arranz, E., Liesa, C.L., Artieda, O., Corella, J.P., Edo, V., Galindo, G., Maestro, A., Sánchez, E., Rico, M.T., Simón, M. y Tyrrell, J. (2006): Desarrollo simultáneo de pliegues, esquistosidad y cabalgamientos en el Eoceno inferior de Isaba (Valle del Roncal, Pirineo navarro). *Geogaceta*, 40: 31-34.

Housen, B.A., Richter, C. y van der Pluijm B.A. (1993): Composite magnetic fabrics experiments: numerical models and implication for the quantification of rock fabrics. *Tectonophysics*, 220: 1-12.

Jackson, M., Gruber, W., Marvin, J. y Banerjee, K. (1988): Partial anhysteretic remanence and its anisotropy: applications and grainsize-dependance. *Geophysical Research Letters*, 15: 440–443.

Jelinek, V. (1981): Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79: 63-70.

Jelinek, V. (1978): Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geophysica,* 22: 50-62

Labaume, P., Séguret, M. y Seyve, C. (1985): Evolution of a turbiditic foreland basin and analogy with an accretionary prism: Example of the Eocene South-Pyrenean basin. *Tectonics*, 4: 661-685.

Lowrie W. (1990): Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperatures properties. *Geophysical Research Letters*, 17: 159-162.

Luzón, A. (2005): Oligocene–Miocene alluvial sedimentation in the northern Ebro Basin, NE Spain: Tectonic control and palaeogeographical evolution. *Sedimentary Geology*, 177: 19-39.

Mattauer, M., y Seguret, M. (1971): Les relations entre la chaîne des Pyrénées et le golfe de Gascogne. En: *Histoire struturale du golfe de Gascogne* (J. Debyser; X. Le Pichon y L. Montadert, Eds.) Ed. Technip, Paris IV: 1-24.

McCabe, C., Jackson, M. y Ellwood, B.B. (1985): Magnetic anisotropy in the Trenton limestone: results of a new technique, anisotropy of anhysteretic susceptibility. *Geophysical Research Letters*, 12: 333–336.

Millán, H., Oliva Urcia, B. y Pocoví Juan, A. (2006): La transversal de Gavarnie-Guara. Estructura y edad de los mantos de Gavarnie, Guara-Gèdre y Guarga (Pirineo centro-occidental). *Geogaceta*, 40: 35-38.

Millán, H.A. (1996): *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores Aragonesas*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 330 p.

Muñoz, J.A. (2002): Alpine Tectonics I, The Pyrenees. En: *Geology of Spain* (W. Gibbons y T. Moreno, Eds.). Geological Society London. 370-385.

Muñoz, J.A., Puigdefábregas, C. y Fontboté, J.M. (1983): Orógenos alpinos: El Pirineo. En: *Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo II*, (J. Comba, Ed.). IGME, Madrid, 161-168.

Mutti, E., Luterbacher, H., Ferrer, J. y Rosell, J. (1972): Schema stratigrafico e lineamenti di facies del Paleogeno Marino della zona central sudpirenaica tra Tremp (Catalogna) e Pamplona (Navarra). *Memorie della Società Geologica Italiana,* 11: 391-416.

Oliva, B., Larrasoaña, J.C., Pueyo, E.L., Gil-Imaz, A., Mata, P., Parés, J.M. y Schleicher, A. (2009): Disentangling magnetic subfabrics and their link to deformation processes in cleaved sedimentary rocks from the Internal Sierras (west central Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology*, 31: 163-176.

Oliva-Urcia, B. (2004): *Geometría y cinemática rotacional en las Sierras Interiores y Zona Axial (Sector de Bielsa) a partir del análisis estructural y paleomagnético*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza. 292 p.

Parés, J.M., (2004): How deformed are weakly deformed mudrocks? Insights from magnetic anisotropy. En: *Magnetic fabric: Methods and Applications*. (F. Martin-Hernandez; C. Luneburg; C. Aubourg y M. Jackson, Eds.). Geological Society of London. Special Publication, 238: 191-205.

Parés, J.M. y Dinarès-Turell, J. (1993): Magnetic fabrics in two sedimentary rock types from the Southern Pyrenees. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45: 193-205.

Parés, J.M. y van der Pluijm, B. (2002a): Phyllosilicate fabric characterization by Low-Temperature Anisotropy of Magnetic Susceptibility (LT-AMS). *Geophysical Research Letters*, 29: 68.1-68.4.

Parés, J.M. y van der Pluijm, B. (2002b): Evaluating magnetic lineations (AMS) in deformed rocks. *Tectonophysics*, 350: 283-298.

Parés, J.M., van der Pluijm, B. y Dinàres-Turell, J. (1999): Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain). *Tectonophysics*, 307: 1-14.

Parés, J.M. y van der Pluijm, V.A. (2004): Correlating magnetic fabrics with finite strain: comparing results from mudrocks in the Vasriscan and Appalachian orogens. *Geologica Acta*, 2: 213-220.

Potter, D.K. (2004): A comparison of anisotropy of magnetic remanence methods- a user´s guide for application to paleomagnetism and magnetic fabric studies. En: *Magnetic fabric: Methods and Applications*. (F. Martin-Hernandez; C. Luneburg; C. Aubourg y M. Jackson, Eds.). Geological Society of London. Special Publication, 238: 21-35.

Pueyo Anchuela, Ó. (2012): *Estudio de fábricas magnéticas y su relación con la deformación en el sector occidental del Pirineo Central (Aragón y Navarra)*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 366 p.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A. y Pocoví Juan, A. (2012a): Factors affecting the AMS record of strain fabrics at the West-Central South-Pyrenean cleavage domain (Southern Pyrenees; NE Spain). *Tectonophysics*, 554-557: 1-17

Pueyo Anchuela, Ó., Pueyo Morer, E.L., Pocoví Juan, A. y Gil Imaz, A. (2012b): Vertical axis rotations in fold and thrust belts: calibration of AMS and paleomagnetic data in the Western External Sierras (Southern Pyrenees). *Tectonophysics* 532-535: 119-133.

Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A.M., Pocoví Juan, A. y Gil Imaz, A. (2011a): Lithology-dependent reliability of AMS analysis: a case study in shales and sandstones of the Eocene turbidites in the Southern Pyrenees (Aragón, Spain). *Comptes rendus Geoscience*, 343: 11-19.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A., Pocoví Juan, A. e Ipas-Lloréns, J.F. (2011b): Acquisition and blocking of magnetic fabrics in synsedimentary structures. Eocene Pyrenees, Spain. *Geophysical Journal International*, 186: 1015-1028.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A. y Pocoví Juan, A. (2010a): Significance of AMS in multilayer systems in fold-and-thrust belts. A case study from the Eocene turbidites in the Southern Pyrenees (Spain). *Geological Journal*, 45: 544-561.

Pueyo Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A. y Gil Imaz, A. (2010b): Tectonic imprint in magnetic fabrics in foreland basins: A case study from the Ebro Basin, N Spain. *Tectonophysics*, 492: 150-163.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A., Pocoví Juan, A., Arauzo, A., Guerrero, E. y Rillo, C. (2008): 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. *Geogaceta*, 45: 83-86.

Pueyo, Ó., Gil, A., Pocoví, A., Mochales, T., Ansón, D., del Río, P. y Pueyo, E. (2007): Acortamiento paralelo a las capas y dirección de transporte tectónico deducido a partir del análisis de la fábrica magnética (ASM) de rocas post-hercínicas del Pirineo Central, valle del río Aragón-Subordán, Pirineo Oscense. *Geogaceta*, 42: 15-18.

Pueyo Anchuela, O., González, A., Ipas, J., Manuel, J., Orgaz, J.A., Rodés, A., Teixidó, F., Gil, A. y Millán, H. (2004): Análisis de la deformación a partir del estudio de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en una estructura de pliegues y cabalgamientos. Ejemplo de un corte del sector central del Pirineo Oscense. *GeoTemas*, 6: 327-331.

Pueyo Morer, E.L. (2000): *Rotaciones paleomagnéticas en sistemas de pliegues y cabalgamientos. Tipos, causas, significado y aplicaciones*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 296 p.

Puigdefábregas, C. (1975): La sedimentación molásica de la Cuenca de Jaca. Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos. *Revista Pirineos*, 104, 188 p.

Puigdefábregas, C. y Souquet, P. (1986): Tecto-sedimentary cycles and depositional sequences of the Mesozoic and tertiary from the Pyrenees. *Tectonophysics*, 129: 173-204.

Quirantes, J. (1978): *Estudio sedimentológico y estratigráfico del terciario continental de los Monegros*. Institución Fernando el Católico (CSIC). Serie Tesis Doctorales, 27, 207 p.

Richter, C. y Van der Pluijm B.A. (1994): Separation of paramagnetic and ferrimagnetic susceptibilities using low temperature magnetic susceptibilities and comparison with high field methods. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82: 111-121.

Robion, R., Grelaud, S. y Frizon de Lamotte, D. (2007): Pre-folding magnetic fabrics in fold-and-thrust belts: Why the apparent internal deformation of the sedimentary rocks from the Minervois basin (NE — Pyrenees, France) is so high compared to the Potwar basin (SW — Himalaya, Pakistan)? *Sedimentary Geology*, 196: 181-200.

Rosenbaum, J., Reynolds, R., Smoot, J. y Meyer, R. (2000): Anisotropy of magnetic susceptibility as a tool for recognizing core deformation: reevaluation of the paleomagnetic record of Pleistocene sediments from drill hole OL-92, Owens Lake, California. *Earth and Planetary Science Letters*, 178: 415-424.

Soler, M. y Puigdefábregas, C. (1970): Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 96: 5-19.

Tauxe, L, (2002): *Paleomagnetic principles and practice. Modern approaches in geophysics* 18. Kluwer academic publishers. 299 p.

Tauxe, L. (1998): *Paleomagnetic Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 283p.

Tarling D.H. y Hrouda, F. (1993): *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman, Hall, London, 217 p.

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): The Ansó transect of the southern Pyrenees: basement and cover thrust geometries. *Journal of the Geological Society of London*, 153: 301-310.

Teixell, A. y García Sansegundo, J. (1995): Estructura del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8: 215-228.

Williams, G.D. y Fischer, M.V. (1984): A balanced cross section across the Pyrenean orogenic belt. *Tectonics*, 3: 773-790.

Manuscrito recibido el 7 de mayo de 2012.
Aceptado el manuscrito revisado el 29 de enero de 2013.