

LA FÁBRICA MAGNÉTICA DE LOS MATERIALES CAMBROORDOVÍCICOS DE LA PARTE ORIENTAL DEL ANTICLINAL DE LA MASSANA (ANDORRA, PIRINEO CENTRAL)

J.M. Casas¹, J.M. Parés² y L. Megías¹

¹ Dpt. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

² Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, C.S.I.C., Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

Resumen: Se ha determinado la fábrica magnética de los materiales cambroordovícicos de la parte oriental del Anticlinal de la Massana (Pirineo Central) y se ha comparado con las mesoestructuras de deformación hercinianas reconocidas en estos materiales. Constituyen los primeros datos de este tipo recolectados en ésta zona y se trata de fábricas muy bien definidas y con los ejes de los elipsoides de la ASM con orientaciones muy constantes: K_{\max} tiene una elevada inclinación hacia el WNW, K_{int} lo hace hacia el ENE o ESE y K_{\min} tiene una dirección N-S con una suave inclinación o es subhorizontal. La foliación magnética es mayoritariamente paralela a la esquistosidad dominante y la lineación magnética es paralela a la lineación de estiramiento y oblicua respecto a los ejes de los pliegues sinfoliares. No se preservan restos de fábricas previas. Se interpreta que las fábricas magnéticas han sido adquiridas durante el episodio deformativo principal, que es el que ha dado lugar a la formación de las mesoestructuras dominantes. En este tipo de materiales y mesoestructuras la determinación de la ASM se ha mostrado como un método muy adecuado para obtener con rapidez y precisión datos cualitativos y semi-cuantitativos referentes a la deformación interna.

Palabras clave: Fábrica magnética, Pirineo, estructura herciniana.

Abstract: The magnetic fabric of the Cambro-Ordovician rocks forming the eastern part of the Massana Anticline (Central Pyrenees) has been determined along with the geometrical relationships with the main field mesostructures. This constitutes the first set of magnetic data collected in this area and are characterized by a well defined ASM ellipsoids with well defined axes orientation: K_{\max} plunges towards the WNW, K_{int} towards the ENE or ESE and K_{\min} is oriented N-S gently dipping or subhorizontal. Magnetic foliation generally coincides with the main cleavage plane and the magnetic lineation is parallel to the stretching lineation and oblique to the intersection lineation. These fabrics are interpreted as formed during the main deformational episode and do not reflect any remain of the sedimentary primary fabric. ASM appears to be an useful and powerful tool in qualitative and semiquantitative determination of strain or kinematic criteria in these rocks.

Key words: Magnetic fabric, Pyrenees, Hercynian structure.

Casas, J.M., Parés, J.M. y Megías, L. (1998): La fábrica magnética de los materiales cambroordovícicos de la parte oriental del anticlinal de La Massana (Andorra, Pirineo Central). *Rev. Soc. Geol. España*, 11:(3-4): 317-329

El objetivo de este trabajo es la determinación de la fábrica magnética de los materiales cambroordovícicos de la parte oriental del Anticlinal de la Massana y de su relación con las mesoestructuras de deformación, a lo largo de una sección con afloramiento prácticamente constante.

La fábrica magnética refleja la orientación preferente de la forma de los granos y/o la orientación cristalográfica preferente de todos aquellos minerales que contribuyen a la susceptibilidad magnética. Esto responde al hecho de que la susceptibilidad magnética, es decir, la capacidad de un cuerpo de ser magnetizado, es una propiedad anisótropa en la mayoría de los minerales. Así pues, para rocas con la misma mineralogía, las variaciones en la orientación e intensidad de su fábrica quedan reflejadas como variaciones en la

Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM). La determinación de la ASM es una técnica sencilla y rápida. Estas características la han popularizado como herramienta para la determinación de fábricas en situaciones en las que es poco apropiado aplicar otros métodos, como es el caso de las rocas homogéneas de grano fino o los granitoides con estructuras de flujo poco desarrolladas o con bajos grados de deformación. La sensibilidad del método permite detectar ligeras variaciones en la fábrica de rocas que de otro modo pasarían desapercibidas, ya que o son difíciles de detectar por otros métodos o bien no dan lugar al desarrollo de mesoestructuras de deformación.

Las fábricas magnéticas anisótropas se expresan gráficamente mediante un elipsoide y matemáticamente como un tensor de segundo orden. Los elipsoides

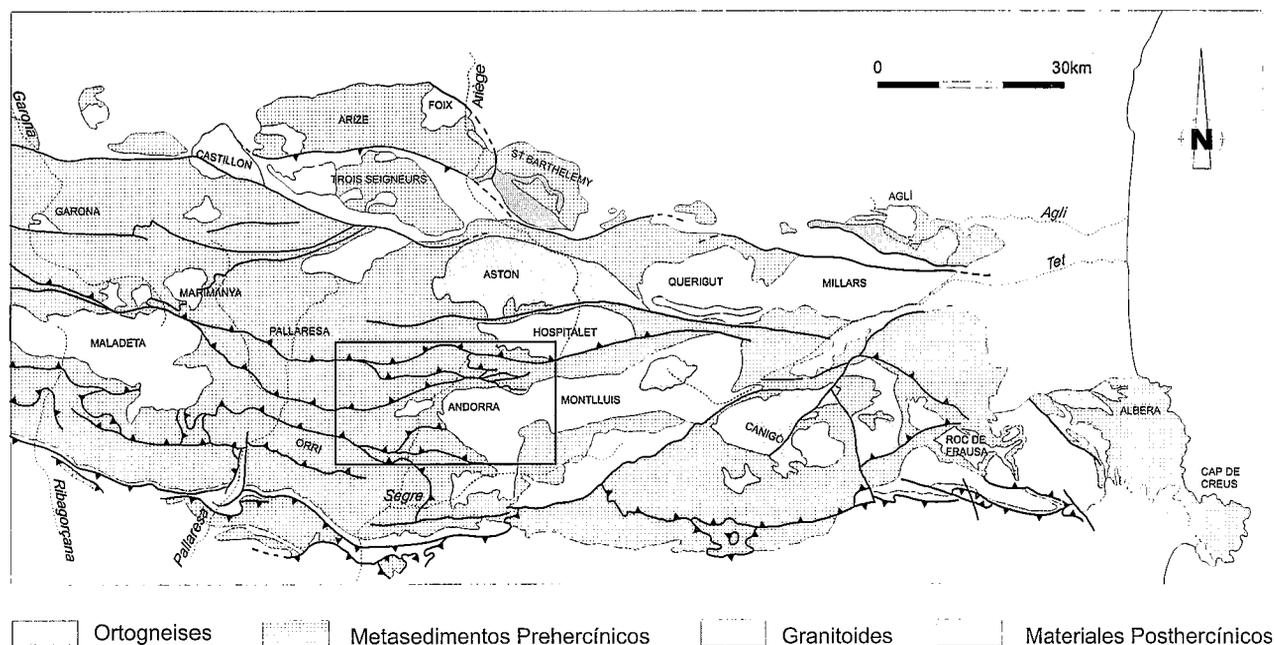


Figura 1.- Esquema geológico del Pirineo central y oriental, basado en Zwart (1965), con la situación de la zona estudiada señalada en el rectángulo.

magnéticos suelen presentar relaciones cualitativas con el elipsoide de la deformación interna (Kligfield *et al.*, 1982; Hrouda, 1982; Borradaile, 1988; Tarling y Hrouda, 1993). Así, la foliación magnética (definida por $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int}) suele coincidir con el plano de foliación tectónica, mientras que la lineación magnética ($K_{m\acute{a}x}$), si es distinguible, suele ser paralela con algún elemento lineal característico. Las relaciones cuantitativas con el grado de deformación ya son más particulares y tienen que ser determinadas para cada litología concreta (Borradaile, 1991). En general, y si no se produce recristalización durante la deformación, se puede afirmar que el grado de anisotropía aumenta con la deformación interna hasta un límite superior a partir del cual los incrementos de la deformación ya no quedan reflejados en la fábrica magnética. Esto indica que todos los granos que contribuyen a la ASM tienen sus ejes $K_{m\acute{a}x}$, K_{int} y $K_{m\acute{i}n}$ perfectamente paralelos entre sí y, en consecuencia, incrementos posteriores de la deformación, si no alteran su orientación, no aumentan el grado de anisotropía. Del mismo modo, existe un umbral inferior para deformaciones bajas, por debajo del cual las fábricas magnéticas reflejan las fábricas sedimentarias. A pesar de estas limitaciones, este método se ha popularizado como complemento de los estudios estructurales clásicos en contextos estructurales muy diversos (Heller *et al.*, 1989; Aubourg *et al.*, 1997).

Por lo que se refiere al Pirineo, se han realizado determinaciones de la ASM en los materiales alpinos de ambas vertientes y en una gran parte de los macizos de granitoides hercinianos, demostrando una vez más la sensibilidad y la aplicabilidad del método (Bouchez *et al.*, 1990; Averbuch *et al.*, 1992; Averbuch *et al.*, 1993; Leblanc *et al.*, 1994; Parés y Dinarés, 1993). Hasta la fecha, sin embargo, esta técnica no ha sido aplicada a

los materiales metasedimentarios hercínicos del Pirineo. El objetivo básico de este trabajo es pues establecer en primer lugar si estos materiales presentan registrada una fábrica magnética. Para ello hemos escogido los materiales atribuidos al Cambro-ordovícico, básicamente por dos motivos: en primer lugar, porque constituyen una parte muy importante de los afloramientos del zócalo hercínico del Pirineo, y, en segundo lugar, porque en conjunto son materiales muy homogéneos litológicamente. La homogeneidad litológica es una condición básica para establecer comparaciones entre resultados obtenidos en áreas diferentes. Se trata pues de un trabajo exploratorio que, en función de los resultados, puede extenderse a otras zonas del zócalo hercínico del Pirineo. En este tipo de materiales, como se discutirá más adelante, la caracterización de su fábrica y de su deformación interna por otros métodos es imprecisa o ha aportado en algunos casos resultados contradictorios.

Este trabajo se ha llevado a cabo en Andorra, a lo largo del valle del Valira d'Orient, entre las poblaciones de Encamp y Canillo. Se ha escogido esta zona por la calidad y continuidad de los afloramientos así como por el conocimiento regional previo disponible (Zwart, 1965; Hartevelt, 1970; Cirés *et al.*, 1990; Poblet, 1991).

El marco geológico

El Anticlinal de la Massana forma la terminación oriental de una unidad de mayores dimensiones conocida como Anticlinal de la Massana-Ribera de Cardós en el Pirineo Central (Zwart, 1965; Poblet, 1991). Dicha estructura presenta una geometría antiformal y anticlinal y se extiende a lo largo de 50 km con una

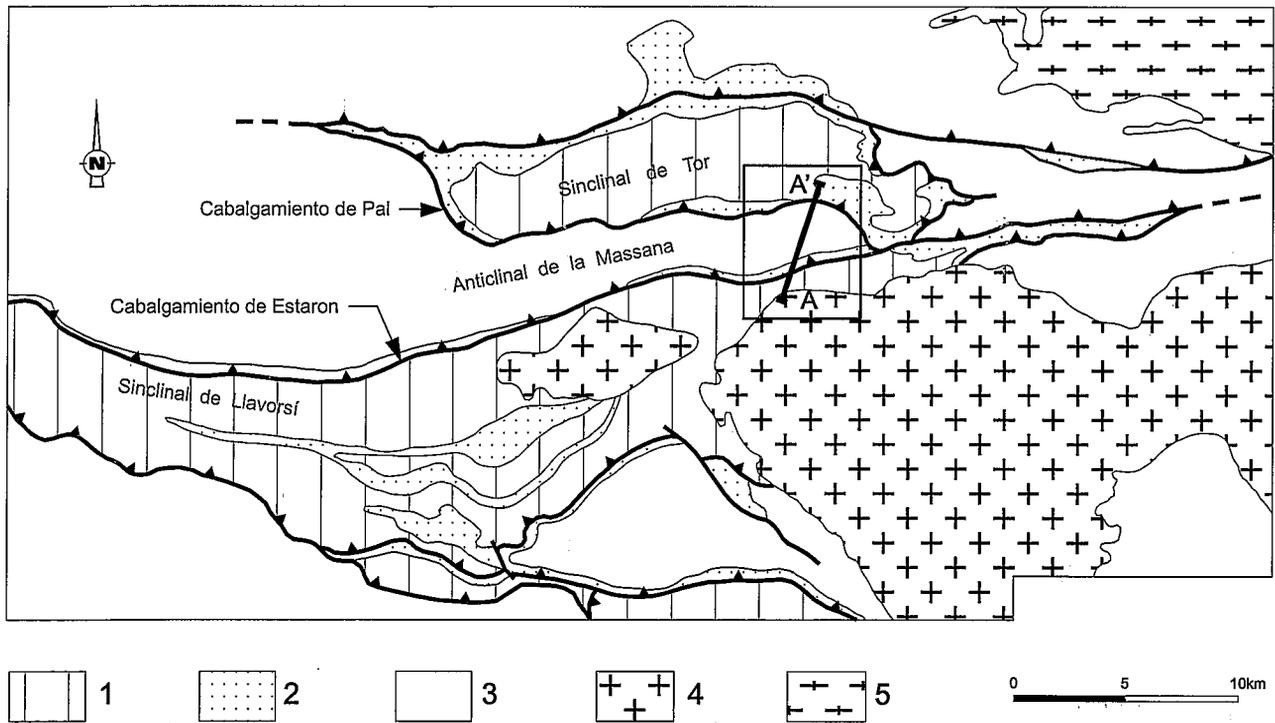


Figura 2.- Esquema estructural de la zona estudiada elaborado a partir de Zwart (1965), Poblet (1991) y datos propios: 1 Devónico; 2 Silúrico; 3 Cambroordovícico; 4 granitoides, 5 gneises. El trazo A-A' corresponde a la situación del corte geológico representado en la figura 3. La zona contenida en el rectángulo es la expuesta en la figura 5.

dirección aproximada E-W entre los macizos de Andorra-Mont Lluís y de la Maladeta (Figs. 1 y 2). El Anticlinal de la Massana está formado por materiales cambroordovícicos, ordovícico superiores y silúricos. Al sur y al norte queda limitado por sendos cabalgamientos con buzamiento hacia el norte y desplazamiento hacia el sur. Al sur, el cabalgamiento de Estaron sitúa a esta unidad en contacto con el Sinclinal de Llavorsí, mientras que al norte el cabalgamiento de Pal coloca los materiales siluro-devónicos del Sinclinal de Tor por encima de los del Anticlinal de la Massana (Figs. 2 y 3).

Los materiales cambroordovícicos, mayoritarios en la zona estudiada, están formados por una sucesión rítmica, generalmente milimétrica o hasta centimétrica, de pizarras, limolitas y areniscas de grano fino, con intercalaciones de cuarcitas o de areniscas. Todo el conjunto presenta un color gris característico, con tonalidades verdes, blancas o localmente marrones. Es una serie azoica a la que se le atribuye una edad cambroordovícica. Dada la ausencia de niveles marcadores claros, su potencia es difícil de establecer, pero las estimaciones mínimas la sitúan entre los 500 y los 1.000 m (Poblet, 1991). Corresponde a la Fm de la Seo de los autores holandeses (Hartevelt, 1970) y a la serie de Jujols en el Pirineo más oriental (Cavet, 1957). Por encima se sitúa una serie de aproximadamente 100 m de potencia, formada por conglomerados, areniscas, lutitas y cuarcitas del Ordovícico superior y, finalmente, los materiales más modernos corresponden a las pizarras ampelíticas con sulfuros del Silúrico, que afloran mayoritariamente en los límites del Anticlinal con un espesor aproximado de 110 m (Poblet, 1991).

La aparente simplicidad cartográfica de esta unidad contrasta con su estructura interna. Así, según Cirés *et al.* (1990) y Poblet (1991), la estructura del Anticlinal de la Massana es el resultado de la superposición de dos sistemas de pliegues. A un primer sistema de pliegues, de abiertos a apretados, con superficies axiales aproximadamente E-W y vergentes hacia el norte, se superpone un segundo sistema de pliegues, mucho mejor desarrollado a todas las escalas, con vergencia aparente hacia el sur. Mientras que el primer sistema no está asociado a la formación de mesoestructuras de deformación penetrativas, el segundo va ligado a la formación de una esquistosidad de crenulación (S_1), que es la mesoestructura deformativa dominante en toda la zona. Tanto las superficies axiales de los pliegues sinfoliares como la esquistosidad dominante tienen una orientación promedio E-W con elevados buzamientos hacia el norte (Figs. 3 y 4). Los ejes de los pliegues y de las lineaciones de intersección estratificación/esquistosidad muestran una dispersión elevada sobre los planos S_1 , con buzamientos a nivel de toda la unidad tanto hacia el este como hacia el oeste (Poblet, 1991). Localmente se reconocen lineaciones curvadas sobre S_1 . En la zona estudiada las lineaciones presentan una inclinación predominante hacia el oeste (Fig. 4). Más localmente, se reconoce también una lineación de estiramiento sobre los planos de la esquistosidad, definida por la orientación preferente de los granos en las rocas detríticas más groseras, y que presenta una orientación más constante con un elevada inclinación hacia el WNW (Capellà, 1997).

Los pliegues y la esquistosidad S_1 formados durante este episodio son las estructuras de deformación predo-

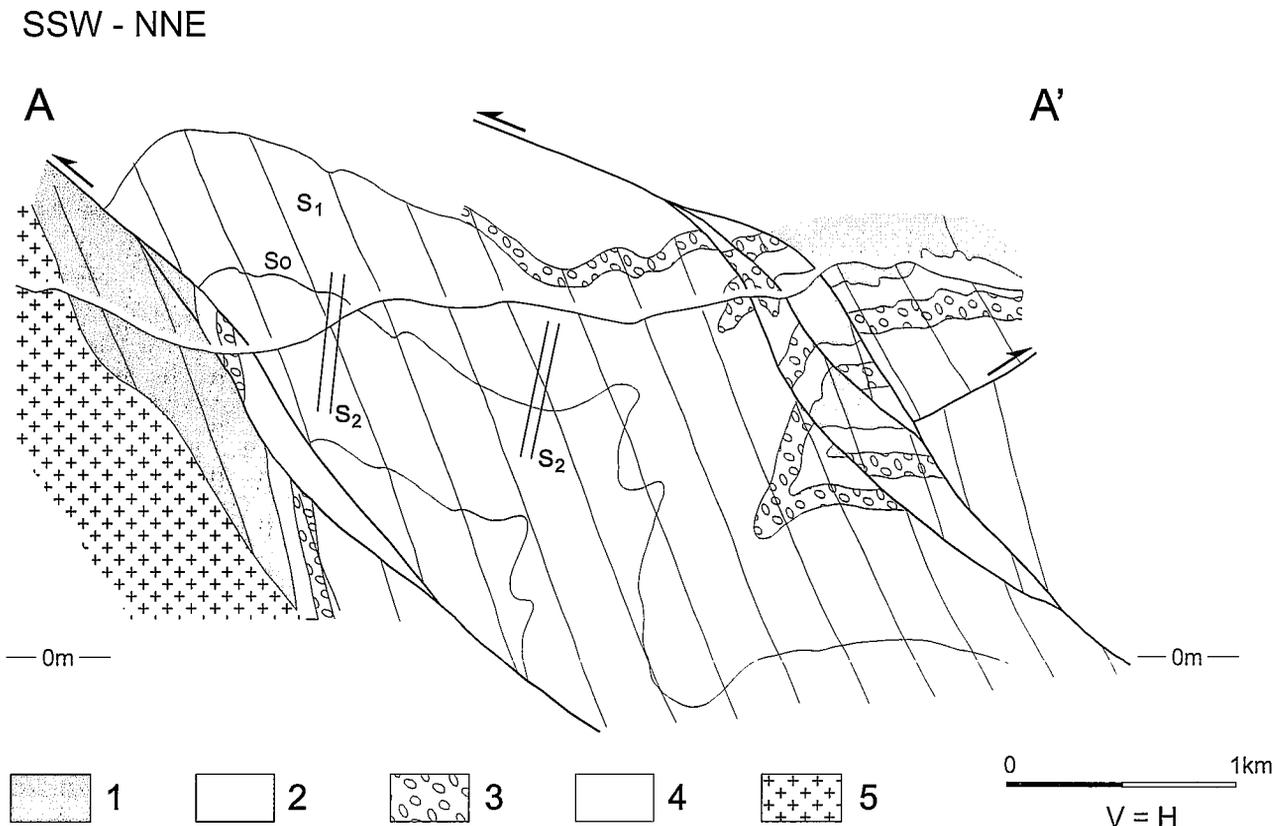


Figura 3. - Corte general del Anticlinal de La Massana (según Cirés *et al.*, 1990, ligeramente modificado): 1: Devónico; 2: Silúrico; 3: Ordovícico superior; 4: Cambroordovícico; 5: granodiorita de Andorra-Mont-Lluís; S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; S_2 , segunda esquistosidad.

minantes en esta zona. Esta última estructura, foliación dominante de Capellà (1991), clivaje principal de Poblet (1991), es la superficie más evidente sobre el terreno en todos los metasedimentos prehercínicos. Es, por tanto, la superficie de referencia para el estudio de las deformaciones posteriores que, en esta zona, están poco desarrolladas. Se limitan a un sistema de pliegues centimétricos orientados E-W, vergentes hacia el norte y asociados a la formación localizada de una S_2 de crenulación con fuertes buzamientos hacia el sur, y a pliegues *kink-band* con geometría normal y superficies axiales con suaves buzamientos hacia el sur.

Todos los autores que han trabajado en esta área coinciden en atribuir una edad hercínica al episodio deformativo principal. No cabe descartar que algunas de las deformaciones posteriores o "tardías" tenga una edad alpina, aunque la falta de materiales meso o cenozoicos próximos dificulta establecer con más precisión la edad de estas deformaciones más localizadas.

Durante la formación de las mesoestructuras dominantes el grado metamórfico es muy bajo, no alcanzándose la zona de la clorita-moscovita. Localmente se desarrolla metamorfismo de contacto cerca del granito de Andorra-Mont Lluís al sur de la zona estudiada.

Por otro lado, Corstanje *et al.* (1989) y Capellà (1991, 1997), en un sector un poco más al oeste y en esta misma área respectivamente, han determinado la deformación interna asociada a la esquistosidad dominante. Corstanje *et*

al. (1989) determinan elipsoides de deformación del tipo constricción aparente ($k=3,43$), con el eje X buzando 45° hacia el NE, Y orientado WNW y Z inclinado hacia el SSW. Cabe destacar la notable variación en los datos obtenidos por estos autores, tanto en la orientación axial como en la forma de los elipsoides. En materiales parecidos, Capellà (1991, 1997) obtiene resultados significativamente distintos. Los elipsoides son del tipo aplastamiento aparente ($k=0,36$), con el eje mayor (X) con una fuerte inclinación hacia el NNW y un eje menor (Z) próximo a N-S. Del análisis de estos datos destaca también la dispersión de los ejes X sobre un plano XY con una orientación promedio próxima a la de la esquistosidad dominante.

En resumen, como rasgos estructurales destacaríamos: 1) la presencia de una esquistosidad con fuerte buzamiento hacia el norte, 2) la estructura interna del Anticlinal resulta de la interferencia entre un flanco normal de un pliegue vergente hacia el norte y un pliegue del episodio principal vergente hacia el sur, y 3) la forma cartográfica del Anticlinal es función de la presencia de dos cabalgamientos ENE-WSW a ESE-WNW que cortan esta estructura de interferencia.

El método de muestreo y de análisis

Se han recolectado muestras en 10 afloramientos que para su descripción han sido agrupados en 8 esta-

ciones (Fig. 5). La técnica de muestreo es la misma utilizada en los trabajos de paleomagnetismo, es decir, por perforación mecánica a rotación se obtiene en cada estación un número variable, no inferior a cinco, de muestras cilíndricas de 2,54 cm de diámetro. Estas muestras, conveniente orientadas sobre el terreno, son posteriormente cortadas en especímenes de dimensiones entre 2,1 y 2,2 cm de longitud. En el mismo lugar del muestreo se han realizado las observaciones estructurales necesarias para la posterior comparación. Para la medida de la susceptibilidad se ha utilizado un aparato Kapabridge KLY-2 (Geofizyka, Brno) y se ha seguido la rutina propuesta por Jelinek (1978).

Se ha tratado el mismo número de especímenes (10) para cada afloramiento, con el fin de homogeneizar los resultados. Aparte de las orientaciones axiales de los elipsoides de la ASM, para cada espécimen se obtienen otros parámetros standard como son el grado de anisotropía ($P=K_{m\acute{a}x}/K_{m\acute{i}n}$), la lineación magnética ($L=K_{m\acute{a}x}/K_{int}$), la foliación magnética ($F=K_{int}/K_{m\acute{i}n}$) y la elipticidad ($T=[2 \cdot \ln(K_{int}/K_{m\acute{i}n}) / \ln(K_{m\acute{a}x}/K_{m\acute{i}n})] - 1$) que informan sobre la forma del elipsoide a partir de diversas relaciones axiales. Este último parámetro relaciona la foliación con la lineación magnética, de manera que para valores $-1 < T < 0$ la lineación domina sobre la foliación (elipsoides del tipo constricción aparente) y para $0 < T < 1$ la foliación lo hace sobre la lineación (elipsoides aplastados).

A continuación se exponen las características resumidas de cada estación, resultado de promediar los datos de cada una de ellas. Para una eventual consulta de todos los datos utilizados véase Casas *et al.* (en prensa). La descripción de los resultados sigue un orden de S a N, tal y como está expresado en la figura 5.

Las fábricas magnéticas obtenidas

Estación I

En esta estación hemos agrupado los dos afloramientos estudiados más meridionales, situados unos 250 m al norte del cabalgamiento de Estaron (Fig. 5).

En los dos afloramientos se reconoce la estratificación, con el típico aspecto rítmico milimétrico, plegada y afectada por la esquistosidad S_1 muy bien expresada. Esta, a su vez, se halla afectada por pliegues centimétricos asociados a la esquistosidad S_2 . Como resultado, S_1 muestra una disposición variable, buzando en general hacia el NW, mientras que la S_2 es subvertical.

Los elipsoides magnéticos obtenidos son del tipo aplastamiento aparente (Fig. 6), con valores promedio de T para cada estación de 0,448 y 0,233 y un grado de anisotropía que varía entre 1,4 y 1,9. Los ejes $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int} están contenidos en un plano paralelo a S_1 y $K_{m\acute{i}n}$ es paralelo a los polos de S_1 , es decir, $K_{m\acute{a}x}$ y K_{int} definen una foliación magnética paralela a S_1 . Disponemos de pocos datos para establecer la relación entre la lineación magnética y la lineación de intersección L_{01} ,

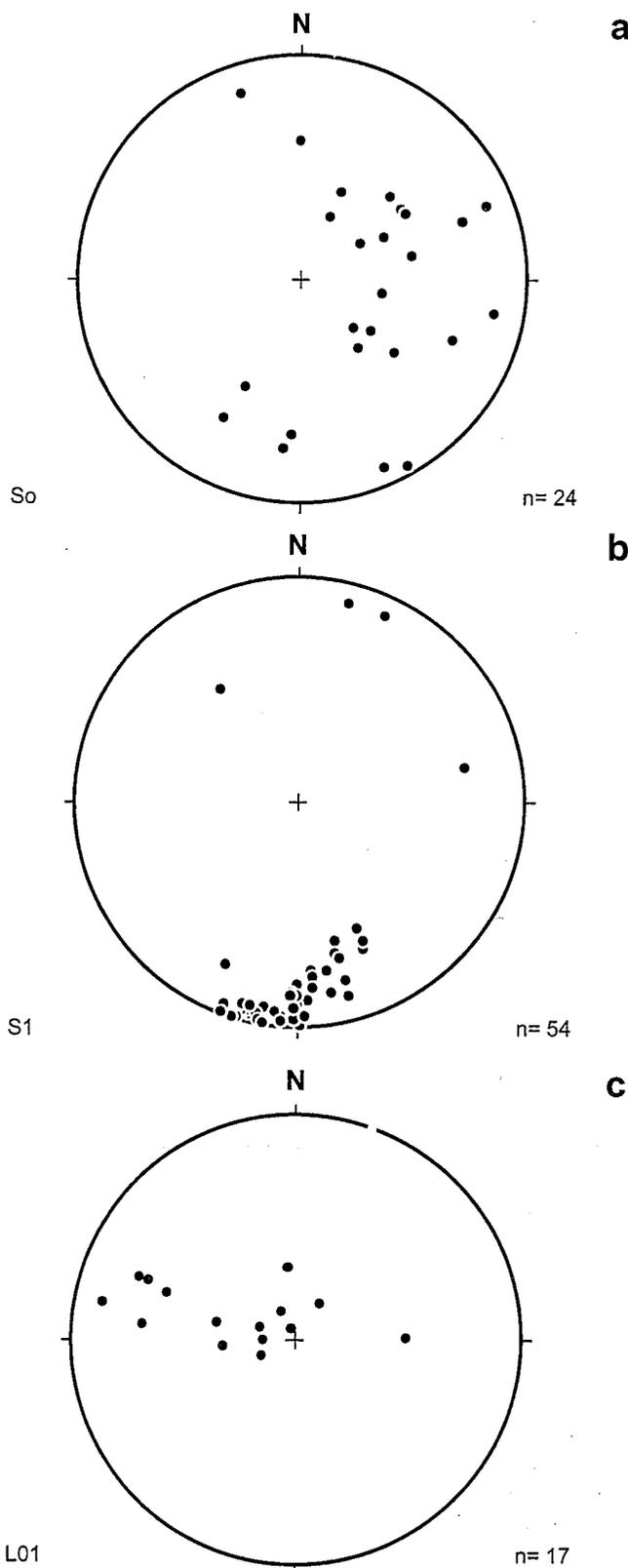


Figura 4.- Representación estereográfica (hemisferio inferior) de las mesoestructuras reconocidas, (a): S_0 , estratificación; (b): S_1 , esquistosidad dominante; (c): L_{01} , lineación de intersección entre la estratificación y la esquistosidad dominante; n, número de medidas.

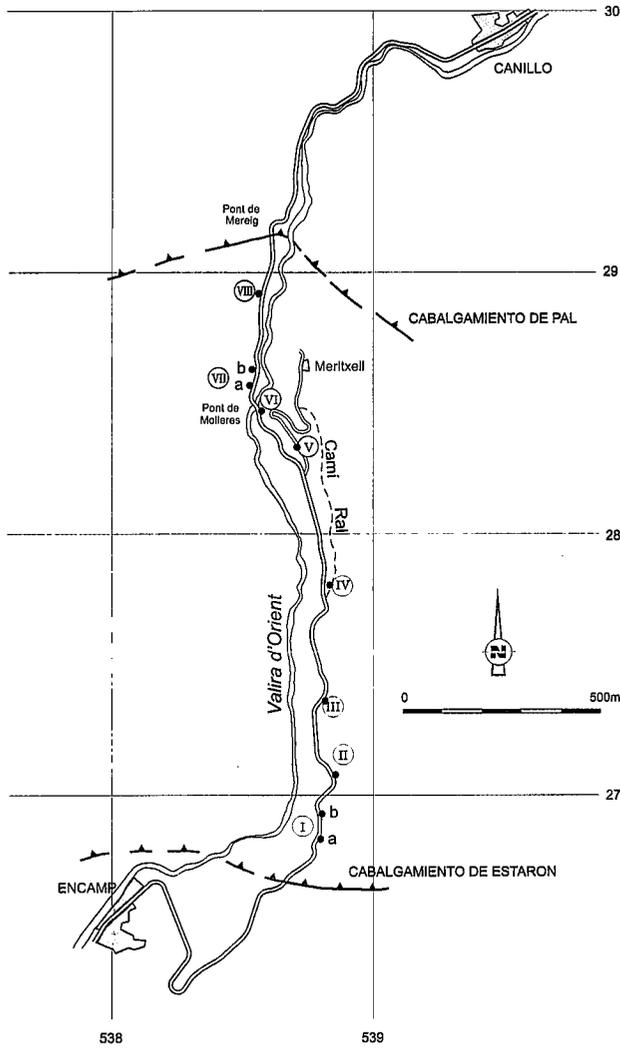


Figura 5.- Situación de las estaciones muestreadas a lo largo de la sección del Anticlinal de la Massana. El reticulado corresponde a las coordenadas Lambert, Zona III.

pero aun así, estos sugieren que $K_{máx}$ está más agrupado que la L_{01} y con una inclinación más elevada, del orden de 45, hacia el WNW (Fig. 7).

Destacaríamos la sensibilidad en la orientación del elipsoide magnético con respecto a ligeras variaciones en la orientación de la S_1 (Fig. 7).

Estación II

Situada unos 200 m al norte de la anterior, en esta estación se reconoce solamente la esquistosidad S_1 como estructura planar desarrollada. La estratificación está prácticamente obliterada.

Los elipsoides magnéticos obtenidos se sitúan también en el campo del aplastamiento (Fig. 6) con valores de $T=0,486$ y un grado de anisotropía alrededor de 1,54. Presentan el mismo tipo de relación con la S_1 descrito para la estación anterior: los ejes del elipsoide de la ASM muestran una marcada orientación preferente, con $K_{mín}$ con suaves inclinaciones hacia el sur y K_{int} y $K_{máx}$ contenidos en la superficie media de la S_1 (Fig. 8).

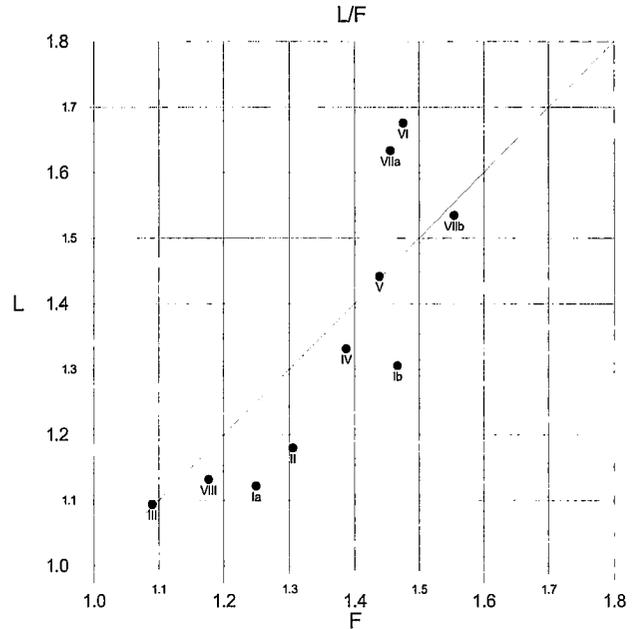


Figura 6.- Representación de los parámetros de forma L (lineación magnética, $L=K_{máx}/K_{int}$) y F (foliación magnética, $F=K_{int}/K_{mín}$) de los elipsoides magnéticos obtenidos.

Estación III

En este afloramiento destacan los pliegues de dimensiones centimétricas de la estratificación. Son apretados a isoclinales, sinfoliados respecto S_1 y sus ejes están fuertemente inclinados hacia el oeste o son subverticales (Fig. 9).

Los elipsoides magnéticos presentan formas variadas, con un valor promedio de T negativo, con valores de L y de F alrededor de 1 (Fig. 6) y con valores de P (1,19) que son los más bajos obtenidos en toda la zona. $K_{máx}$ presenta una buena orientación preferente, está contenido en S_1 y tiene una disposición próxima a la de los ejes de los pliegues sinfoliados aunque con una inclinación ligeramente menor (Fig. 9). K_{int} y $K_{mín}$, por el contrario, están más dispersos a lo largo de un plano perpendicular a la lineación magnética, aunque $K_{mín}$ se sitúa en promedio paralelo a los polos de la S_1 (Fig. 9). En algunos casos K_{int} y $K_{mín}$ presentan las posiciones intercambiadas debido a la forma del elipsoide magnético.

Estación IV

La estratificación y la esquistosidad son subparalelas en este afloramiento, en el que destaca la presencia de la S_2 , espaciada, subvertical o buzando fuertemente hacia el sur, y de bandas de pliegues de tipo *kink*. Como resultado, las superficies de la S_1 presentan orientaciones variadas, aunque siempre buzando hacia el NNW (Fig. 10).

Los elipsoides magnéticos tienen formas diversas, con predominio de las aplastadas, con valores de T bajos próximos a 0 en promedio. El grado de anisotropía

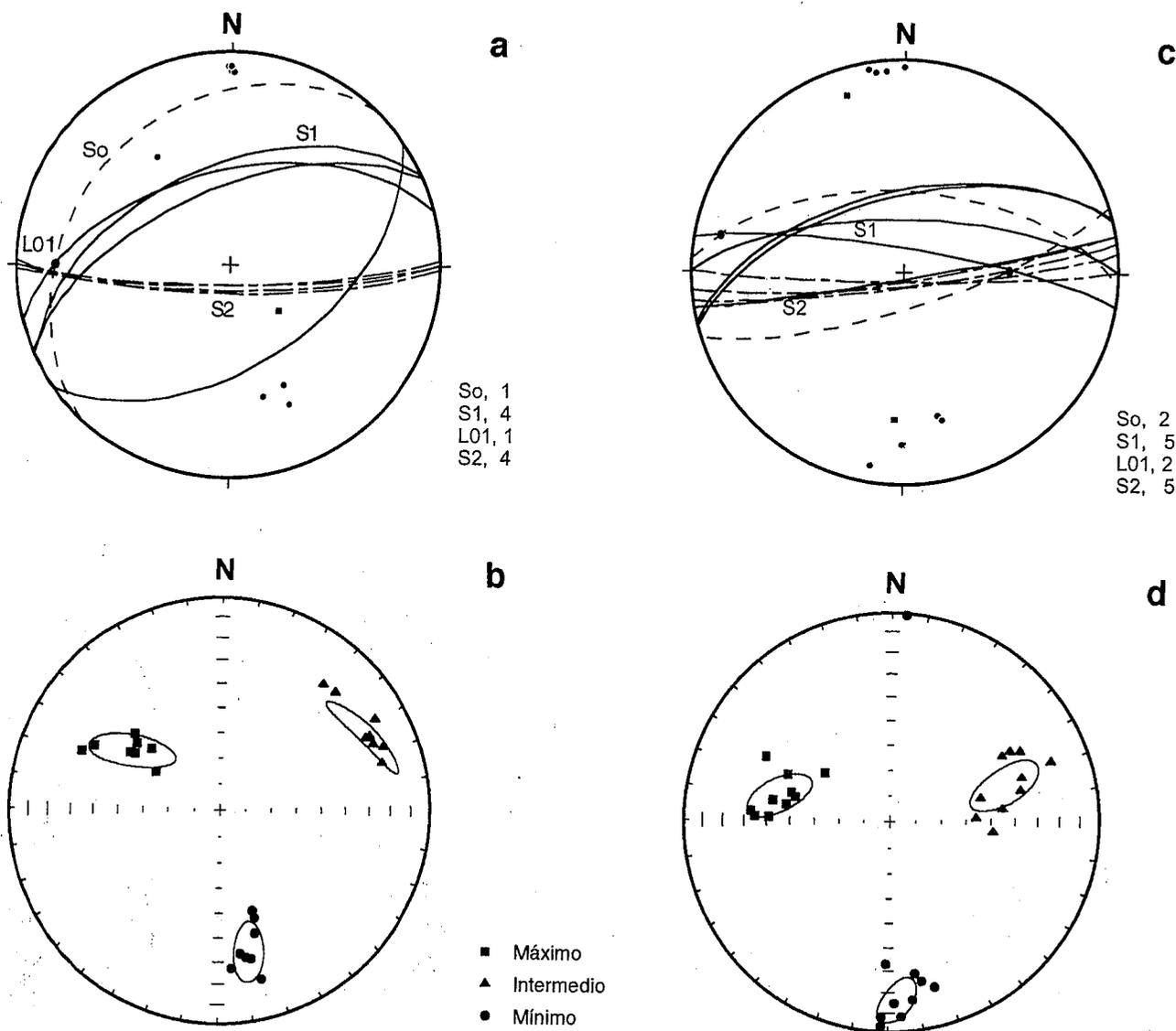


Figura 7.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de los dos afloramientos de la estación I; (a) y (b) corresponden al afloramiento más meridional y (c) y (d) al más septentrional. (a) y (c): S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; L_{01} , lineación de intersección entre S_0 y S_1 ; S_2 , segunda esquistosidad; (b) y (d) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

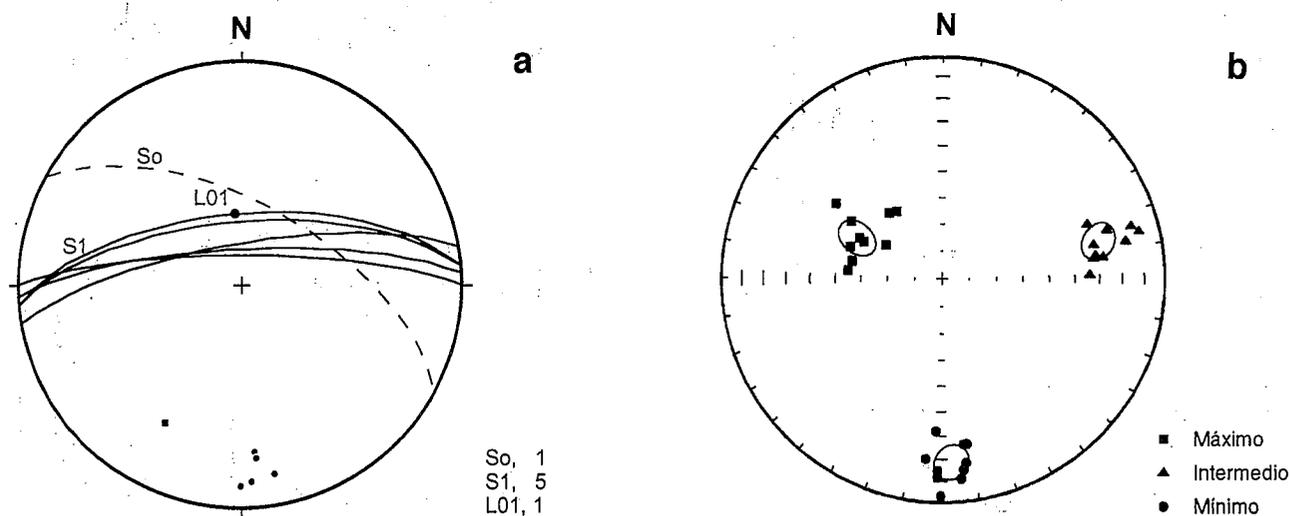


Figura 8.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de la estación II. (a) S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; L_{01} , lineación de intersección entre S_0 y S_1 ; (b) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

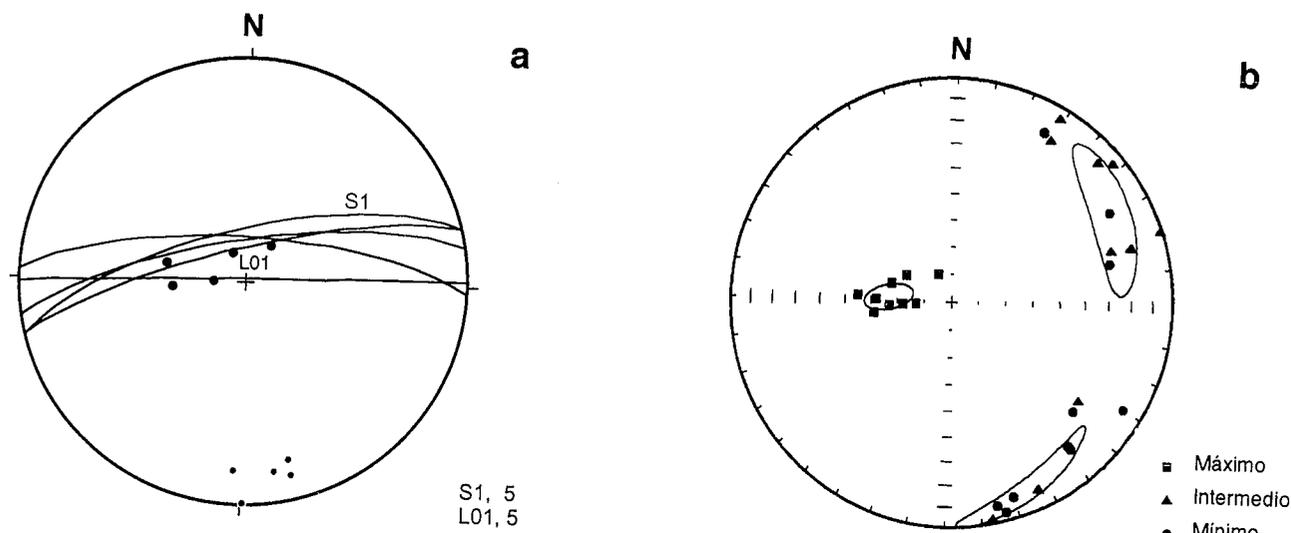


Figura 9.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de la estación III. (a) S_1 , esquistosidad dominante; L_{01} , lineación de intersección entre S_0 y S_1 ; (b) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

medio es del orden de 1,84. $K_{máx}$ se muestra muy agrupado y contenido en la superficie S_1 , mientras que K_{int} y $K_{mín}$ están ligeramente más dispersos, aunque menos que en la estación anterior. Cabe destacar en este afloramiento que K_{int} no está contenido en la superficie media de S_1 , ni por tanto $K_{mín}$ es perpendicular estrictamente a S_1 , sino que la foliación magnética se aleja en promedio unos 20° en sentido horario de los polos de dicha superficie (Fig. 10).

Estación V

Destacan en este afloramiento niveles métricos de cuarcitas que alternan con niveles de pelitas oscuras. Las capas están afectadas por pliegues apretados con inclinación axial hacia el oeste. S_1 es subvertical.

Las muestras se caracterizan por presentar unos elipsoides magnéticos con valores de T alrededor de 0, es decir, con formas “planas” por similitud con los elipsoides de la deformación interna (Fig. 6). El grado de anisotropía es elevado, en promedio 2,07. Los ejes magnéticos se orientan de manera parecida a los de la estación IV, con $K_{máx}$ contenido en S_1 , mientras que $K_{mín}$ presenta una ligera diferencia en su dirección en sentido horario respecto a la dirección media de los polos de la S_1 (Fig. 11).

Estación VI

Los materiales muestreados en esta estación son las típicas ritmitas del Cambro-Ordovícico formadas por

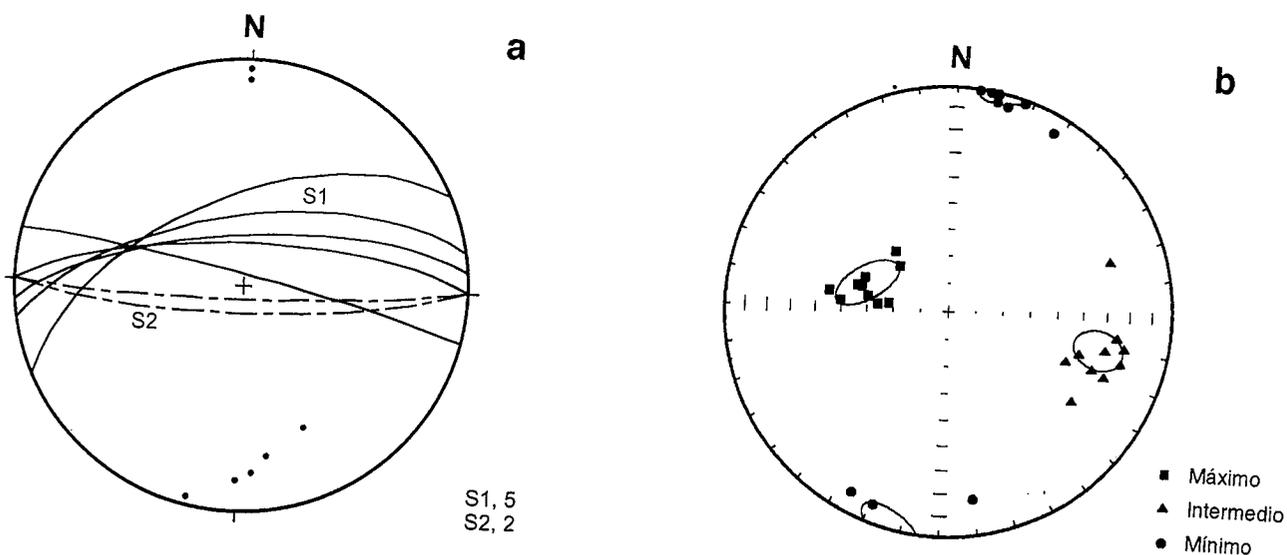


Figura 10.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de la estación IV. (a) S_1 , esquistosidad dominante; S_2 , segunda esquistosidad; (b) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

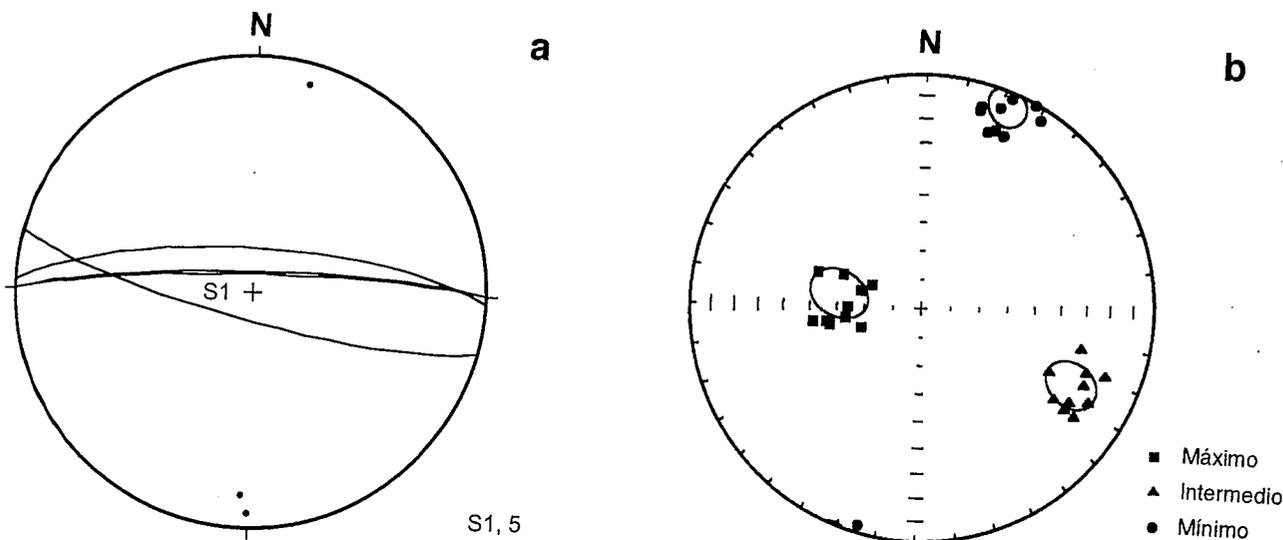


Figura 11.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de la estación V. (a) S_1 , esquistosidad dominante; (b) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

alternancias de niveles pelíticos y arenosos milimétricos. La estratificación y la esquistosidad dominante S_1 presentan buzamientos elevados, dando lugar a una lineación de intersección subvertical (Fig. 12).

Las formas de los elipsoides magnéticos son ligeramente alargadas (Fig. 6) y muestran los máximos valores obtenidos del grado de anisotropía, 2,47. $K_{máx}$ está contenido en S_1 con un dirección próxima a la de la lineación de intersección pero con una inclinación entre 15 y 25° menor. $K_{mín}$ se situa en promedio muy próximo a los polos de los planos S_1 .

Estación VII

En esta estación hemos agrupado dos afloramientos prácticamente en continuidad. En ambos destacan los

pliegues de la estratificación, con inmersión axial hacia el oeste y las bandas de pliegues de tipo *kink* que localmente afectan a la esquistosidad S_1 .

Los datos de la ASM muestran elipsoides con valores de T ligeramente negativos o alrededor de 0 (Fig. 6) y con un grado de anisotropía elevado, entre 2,38 y 2,39. Los ejes de los elipsoides de la ASM muestran una elevada concentración, con $K_{máx}$ contenido en S_1 y con la misma dirección que las lineaciones de intersección S_1 - S_0 , pero con una inclinación más elevada, del orden de 25°. En cambio, $K_{máx}$ es paralelo a las lineaciones de estiramiento reconocidas sobre S_1 . K_{int} y $K_{mín}$ están muy agrupados, con $K_{mín}$ perpendicular a S_1 (Fig. 13).

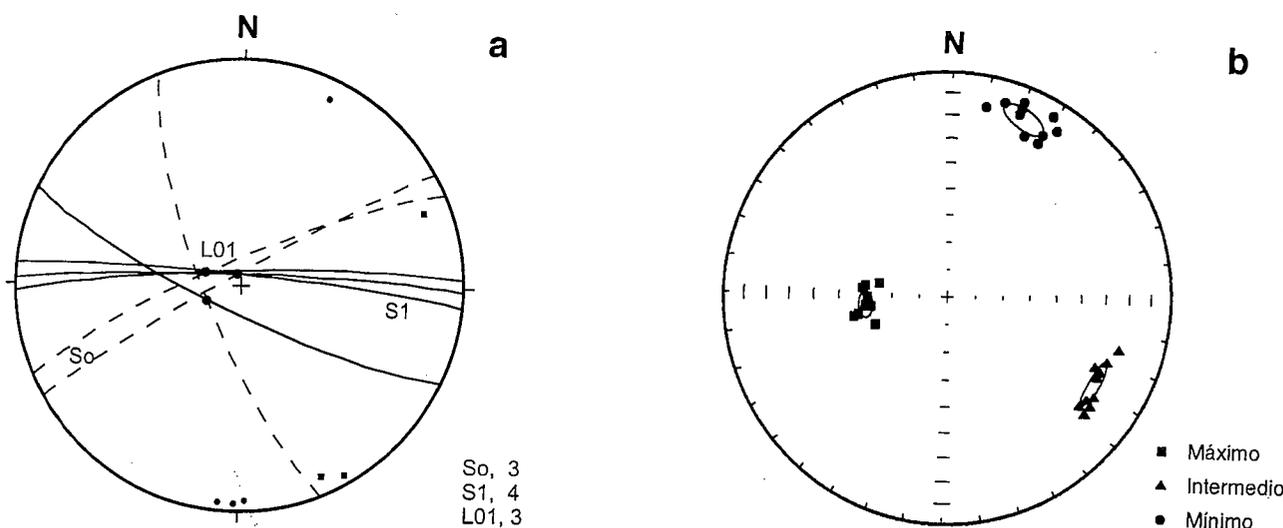


Figura 12.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de la estación VI. (a) S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; L_{01} , lineación de intersección entre S_0 y S_1 ; (b) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

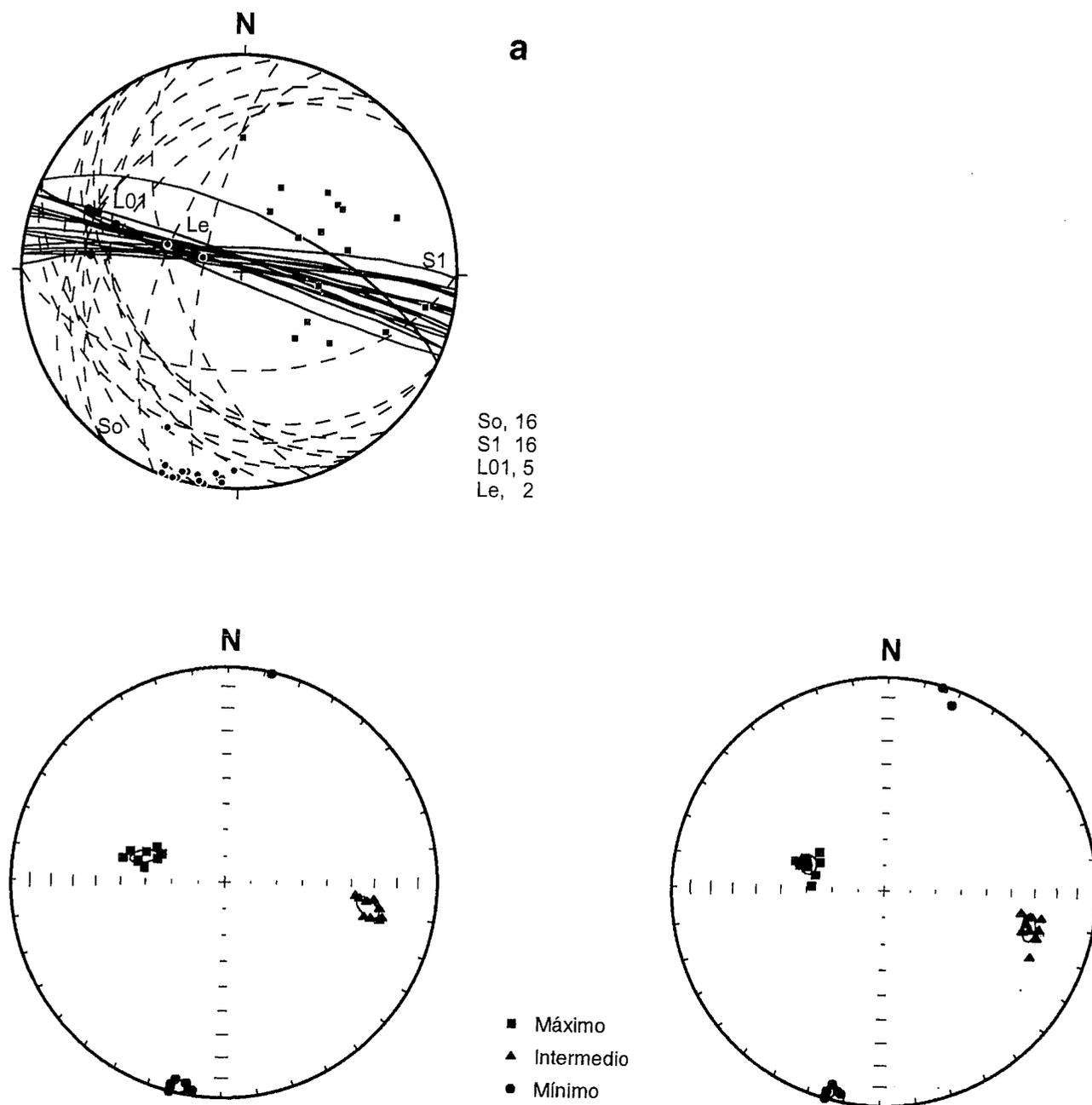


Figura 13.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de los dos afloramientos de la estación VII. (a) S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; L_{01} , lineación de intersección entre S_0 y S_1 , Le , lineación de estiramiento; (b) y (c) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

Estación VIII

Es la estación más septentrional de las estudiadas y se sitúa a unos 250 m más al sur del cabalgamiento de Pal. S_1 es vertical o con elevado buzamiento hacia el NE.

Los elipsoides magnéticos son del tipo aplastado (Fig. 6) y con bajos grados de anisotropía (1,33). Es la única estación en la que los ejes $K_{máx}$ muestran una cierta dispersión, aun cuando su orientación promedio es coincidente con la determinada en las otras estaciones. K_{int} está contenido en S_1 y $K_{mín}$ es perpendicular a los planos de la S_1 (Fig. 14).

Discusión

Los materiales cambroordovícicos de esta zona presentan una fábrica magnética muy bien desarrollada. Los elipsoides magnéticos tienen formas variadas, con predominio de las ligeramente aplastadas, aunque también las hay del tipo "neutro" o "plano" y del tipo constricción aparente. El grado de anisotropía es variable, con valores mínimos de 1,19 y máximos de 2,47. Los ejes del elipsoide de la ASM presentan para cada muestra orientaciones bastante constantes. Hay que destacar $K_{máx}$ que, exceptuando un solo caso, es el eje

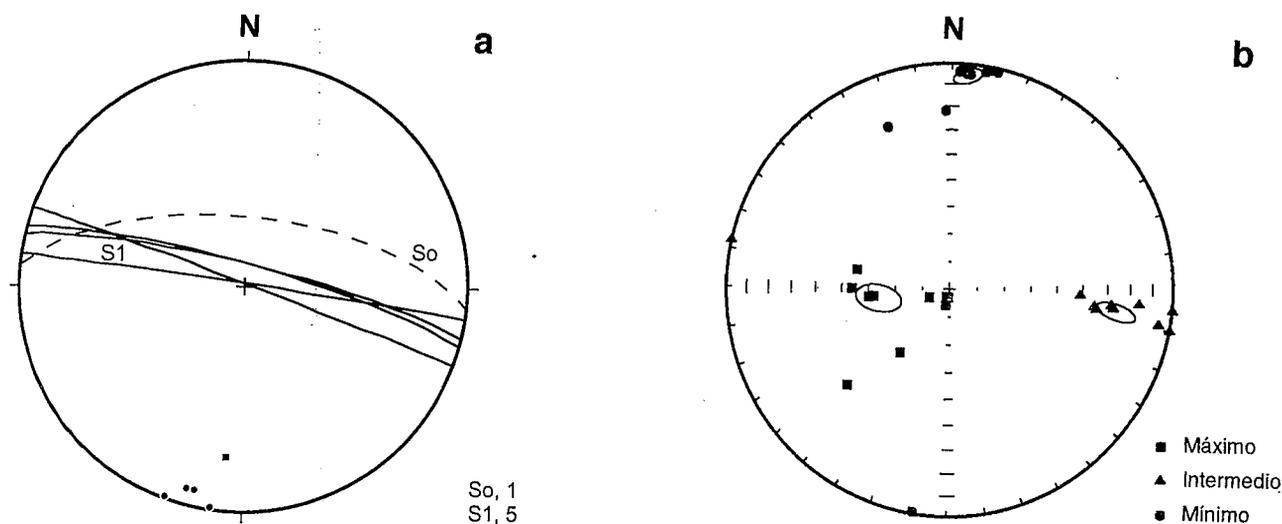


Figura 14.- Datos estructurales y magnéticos (hemisferio inferior) de la estación VIII. (a) S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; (b) orientación de los ejes principales del elipsoide magnético.

con una orientación preferente más marcada. Presenta un inclinación variable entre 45 y 70° hacia el WNW. K_{int} es el eje más disperso, con inclinaciones de entre 20 y 40° hacia el ENE o ESE y K_{min} es el que tiene una inclinación menor, en coherencia con la disposición de los planos de la S_1 , entre 4 y 15°, alrededor de la dirección N-S.

Las fábricas magnéticas determinadas no reflejan la diferente disposición de la estratificación en un mismo afloramiento (estación VII por ejemplo). Tampoco la presencia de una segunda esquistosidad parece influir en el tipo o en la orientación de los elipsoides magnéticos (comparación entre las estaciones I y II). Esto sugiere que se trata de fábricas simples, que no resultan de la intersección entre dos elipsoides distintos ligados a la estratificación y a la esquistosidad o a dos esquistosidades. Esto las diferencia de algunos de los modelos propuestos para el desarrollo de la ASM en rocas parecidas (Housen *et al.*, 1993), o bien de aquellas situaciones en las que la interacción entre la estratificación y la esquistosidad está bien documentada, dando lugar a fábricas compuestas (Parés y Dinarés, 1993). Este último aspecto parece confirmarse con el no paralelismo entre la lineación magnética ($K_{máx}$) y la lineación de intersección entre la estratificación y la esquistosidad.

El elemento común en todas las determinaciones realizadas es que el eje $K_{máx}$ se halla contenido en los planos S_1 y tiene un elevado buzamiento hacia el WNW. Este eje, por su parte, forma un ángulo variable entre 15 y 25° con la lineación de intersección. $K_{máx}$ es paralelo a la lineación de estiramiento, que en el Anticlinal de la Massana tiene una orientación WNW, mucho más constante que la que presenta la lineación de intersección (véase la figura 4 de Capellà, 1997). La dispersión de las lineaciones de intersección y de los ejes de los pliegues parece atribuible en esta zona a la presencia de

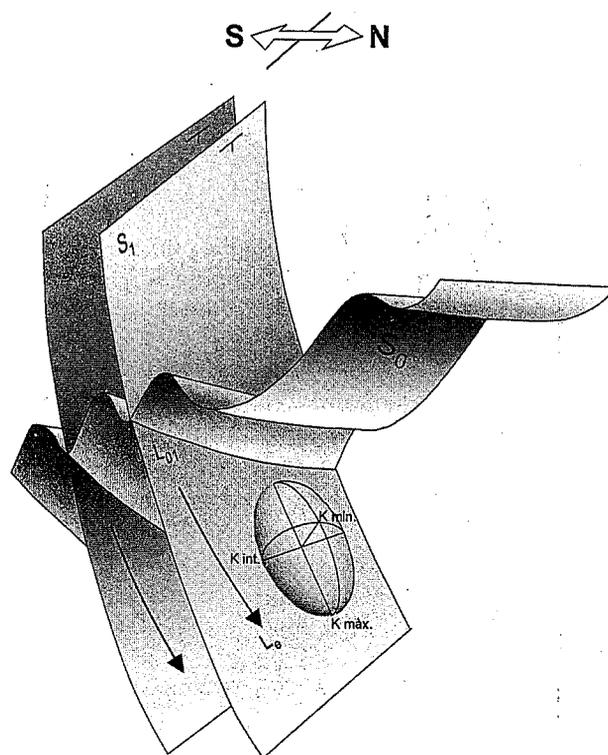


Figura 15.- Representación esquemática de las relaciones geométricas entre las mesoestructuras observadas y los elipsoides de la fábrica magnética (S_0 , estratificación; S_1 , esquistosidad dominante; L_{01} , lineación de intersección entre S_0 y S_1 ; L_c , lineación de estiramiento).

pliegues anteriores. Esta situación, por otra parte muy frecuente en los materiales paleozoicos del Pirineo (véase Capellà, 1995, para una detallada discusión), indica unas relaciones variables entre los ejes de los pliegues y la dirección de estiramiento (Carreras y Capellà, 1994). Los datos expuestos permiten deducir, sin em-

bargo, que en esta zona los ejes de los pliegues podrían ser tanto paralelos como formar ángulos de hasta 25° con la dirección de estiramiento. Así pues, cuando la deformación a nivel mesoestructural está ligada fundamentalmente a pliegues, las fábricas magnéticas pueden informar mucho más acerca de los ejes principales de la deformación que no de los elementos geométricos (Fig. 15).

En 7 de los afloramientos (de un total de 10) la foliación magnética y la esquistosidad S_1 son paralelas, mientras que en otros 3 la foliación magnética muestra una desviación de 20° con respecto S_1 . Esta divergencia no parece en principio relacionable con el grado de desarrollo de la fábrica magnética, ya que se da en muestras con valores muy distintos de P (entre 1,85 y 2,47).

Hay que resaltar, por último, que los elipsoides magnéticos muestran una orientación muy constante en relación con la de los elipsoides de la deformación interna, que en algunos casos pueden presentar tanto formas como orientaciones diversas (Corstanje *et al.*, 1989; Capellà, 1991, 1995, 1997). Cabe señalar, sin embargo, la coincidencia entre la orientación del eje $K_{m\acute{a}x}$ y la de la mayor parte de los ejes X del elipsoide de la deformación interna determinados por Capellà (1991, 1997).

Conclusiones

Los materiales cambroordovícicos del Anticlinal de la Massana presentan una fábrica magnética muy bien definida, adquirida durante el desarrollo del episodio deformativo principal. La foliación magnética es mayoritariamente coincidente con la esquistosidad dominante (S_1) y la lineación magnética refleja la dirección de estiramiento ligada a esta deformación, que es oblicua a los ejes de los pliegues sinfoliares.

Las fábricas magnéticas pueden ser utilizadas como indicadores estructurales, en materiales con un débil desarrollo de la lineación de estiramiento o con escasez de elementos marcadores. En estas situaciones, la determinación de los parámetros de la deformación interna por otros métodos es difícilmente realizable, o puede dar lugar a resultados de difícil interpretación.

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a un Ajut a la Recerca, convocatoria 1996, del Centre de Barcelona del Institut d'Estudis Andorrans. Este trabajo se sitúa en el marco del proyecto PB94-0684-C02-02 financiado por la DGICYT. Los autores agradecen los comentarios de M.L. Osete y de J. Carreras que han contribuido a mejorar el manuscrito. J.M. Casas agradece a los colegas del Centro de Geodinámica de la Università della Basilicata, y especialmente a M. Schiattarella, la cálida acogida dispensada durante la redacción de este trabajo.

Bibliografía

Aubourg, C., Frizon de Lamotte, D., Poisson, A. y Mercier, E. (1997): Magnetic fabric and oblique ramp-related folding: A case study from the western Taurus (Turkey). *Jour. Struct. Geol.*, 19: 1111-1120.

- Averbuch, O., Frizon de Lamotte, D. y Kissel, C. (1992): Magnetic fabric as a structural indicator of the deformation path within a fold-thrust structure: a test case from the Corbières (NE Pyrenees, France). *Jour. Struct. Geol.*, 14: 461-474.
- Averbuch, O., Frizon de Lamotte, D. y Kissel, C. (1993): Strain distribution above a lateral culmination: an analysis using microfaults and magnetic fabric measurements in the Corbières thrust belt (NE Pyrenees, France). *Annales Tectonicae*, III: 3-21.
- Borradaile, G. H. (1988): Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156: 1-20.
- Borradaile, G. H. (1991): Correlation of Strain with Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS). *Pure Appl. Geoph.*, 135: 15-29.
- Bouchez, J.L., Gleizes, G., Djouadi, T. y Rochette, P. (1990): Microstructure and magnetic susceptibility applied to emplacement kinematics of granites: the example of the Foix pluton (French Pyrenees). *Tectonophysics*, 184: 157-171.
- Capellà, I. (1991): *Variació de l'estil estructural a l'hercínica del Pirineu. Infraestructura-zona de transició-supraestructura*. Tesis Doctoral, Univ. Autònoma de Barcelona, 279 p.
- Capellà, I. (1995): El estilo estructural del hercínico del sector suroccidental del Macizo del Canigó-Carança (Pirineos orientales). *Rev. Soc. Geol. España*, 8: 7-20.
- Capellà, I. (1997): Strain analysis in the Axial Zone of the Variscan basement of the Pyrenees. *Geol. in Mijnbouw*, 75: 361-371.
- Carreras, J. y Capellà, I. (1994): Tectonic levels in the Palaeozoic basement of the Pyrenees: a review and a new interpretation. *Jour. Struct. Geol.*, 11: 1509-1524.
- Casas, J.M., Megías, L. y Parés, J.M. (en prensa): La fábrica magnética dels materials cambroordovicians de l'Anticlinal de la Massana. *Annals del Institut d'Estudis Andorrans*.
- Cavet, P. (1957): Le Paléozoïque de la zone axiale des Pyrénées orientales françaises entre le Roussillon et l'Andorre (étude stratigraphique et paléontologique). *Bull. Serv. Carte Géol. France*, 254: 303-518.
- Cirés, J., Alías, G., Poblet, J. y Casas, J.M. (1990): La estructura del anticlinal de la Massana. *Geogaceta*, 8: 42-44.
- Corstanje, R., Klepper, C., Rutgers, B., Van Der Wall, I.J. y Van Den Eeckhout, B. (1989): Quantification of finite strain in the Pyrenean Slate Belt; a first assessment using Rf/θ method. *Geol. in Mijnbouw*, 68: 312-321.
- Hartevelt, J.J.A. (1970): The geology of the Upper Segre and Valira valleys, Central Pyrenees, Andorra/Spain. *Leidse Geol. Mededel.*, 45: 167-236.
- Heller, F., Lowrie, W. y Hirt, A.M. (1989): A review of palaeomagnetic and magnetic anisotropy results from the Alps. En: *Alpine Tectonics* (M.P. Coward, D. Dietrich y R.G. Park, Eds). Special Publ. Soc. Geol. London, 450 p.
- Housen, B.A., Richter, C. y Van der Pluijm, B. (1993): Composite magnetic anisotropy fabrics: experiments, numerical models, and implications for the quantification of rock fabrics. *Tectonophysics*, 220: 1-20.
- Hrouda, F. (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, 5: 37-82.
- Jelinek, V. (1978): Statistical processing of magnetic susceptibility measured in groups of specimens. *Stud. Geoph. Geod.*, 22: 50-62.
- Kligfield, R., Lowrie, W. y Piffener, O. A. (1982): Magnetic properties of deformed oolitic limestones from the Swiss Alps: the correlation of magnetic anisotropy and strain.

- Eclog. Geol. Helv.*, 75: 127-157.
- Leblanc, D., Gleizes, G., Lespinasse, P., Olivier, Ph y Bouchez, J.L. (1994): The Maladeta granite polydiapir, Spanish Pyrenees: a detailed magneto-structural study. *Jour. Struct. Geol.*, 16: 223-235.
- Parés, J.M. y Dinarés, J. (1993): Magnetic Fabric in two Sedimentary Rock-Types from the Southern Pyrenees. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45: 193-205.
- Poblet, J. (1991): *Estructura hercínica i alpina del vessant Sud de la zona axial del Pirineu central*. Tesis doctoral, Univ. de Barcelona. 604 pp.
- Tarling, D.H. y Hrouda, F. (1993): *The magnetic anisotropy of rocks*. Ed. Chapman & Hall, 217 pp.
- Zwart, H.J. (1965): Geological map of the Paleozoic of the Central Pyrenees. sheet 6, Aston, France, Andorra, Spain, 1:50.000. *Leidse Geol. Mededel.*, 33:191-254.

Manuscrito recibido el 3 de Marzo de 1998

Aceptado el manuscrito revisado el 13 de Octubre de 1998