

### 3. ESTRUCTURA Y METAMORFISMO

En el macizo de la Pallaresa ya desde mediados del siglo XX se ha reconocido una zonación estructural en profundidad (De Sitter y Zwart, 1960). Esta zonación consiste en dos dominios estructurales denominados infraestructura y supraestructura, diferenciados principalmente por la disposición de la foliación principal y por el grado metamórfico en el que se ha desarrollado la deformación, de medio a alto en el caso de la infraestructura y bajo para la supraestructura. La foliación principal se dispone subhorizontal en la infraestructura, mientras que en la supraestructura presenta un alto buzamiento e incluso se encuentra subvertical. La explicación a esta zonación ha sido uno de los aspectos estructurales más controvertidos incluso hasta la actualidad. Esto ha dado lugar a diferentes interpretaciones a esta situación, para algunos autores se trata de una sola foliación cuya disposición esta relacionada con el diapirismo asociado a cuerpos graníticos y migmatíticos (Soula, 1982; Soula *et al.*, 1986). Otros autores consideran que el desarrollo de la foliación subhorizontal sería posterior al de la foliación subvertical y estaría asociado a procesos de colapso gravitacional coincidiendo con el climax metamórfico (Van den Eeckhout, 1986; Van den Eeckhout y Zwart, 1988; Kriegsman *et al.*, 1989; Vissers, 1992; Aerden, 1994). Por el contrario, la relación temporal opuesta también es sugerida por otros autores (Matte, 1969; Seguret y Proust, 1968 a y b, Santanach, 1972; Matte y Mattauer, 1987; Carreras, 1996; García-Sansegundo, 1996). Estos últimos apuestan por un desarrollo de la deformación en el marco de un régimen compresivo. Todas estas posturas darán lugar a diferentes hipótesis para explicar la tectónica hercínica Pirenaica.

El sector del macizo de la Pallaresa estudiado en este trabajo, corresponde al área de contacto con los macizos gneísicos del Aston y de l'Hospitalet. En la bibliografía se considera esta, como una zona con ciertos rasgos estructurales que difieren de lo observado en el resto del macizo de la Pallaresa. Concretamente en lo referente a la disposición de la foliación dominante, ya que en este sector dicha foliación se encuentra intensamente plegada por una foliación subvertical similar a la considerada como foliación principal en el resto del macizo. Por otra parte, en este sector afloran materiales metamorizados en facies anfíbolita (zona andalucita – cordierita y zona sillimanita) (Liesa, 2004), que hace que se reconozcan peor las estructuras mayores e incluso en muchos casos el grado de recristalización alcanzado hace desaparecer las superficies de estratificación y foliación.

La evolución estructural hercínica del noroeste de Andorra se ha tratado de encajar en este contexto geológico. En este sentido Cirés en Barnolas *et al.* (1996), propone tres episodios de deformación: Un primer episodio caracterizado por una foliación subhorizontal al norte de la falla de Merens que se dispone algo más vertical al sur de dicha falla. Un segundo episodio reflejado por pliegues de eje N-S y finalmente el tercer y último episodio cuya deformación corresponde a pliegues de dirección E-O, a los que se asocia una foliación de transposición con la misma dirección. En lo que se refiere al metamorfismo regional hercínico, este se desarrollaría en esta zona coincidiendo mayoritariamente con una fase de deformación caracterizada al norte de la falla de Merens por una foliación subhorizontal que al sur de dicha falla se encontraría intensamente plegada (Alías y Cirés, 1992), estos autores consideran esta como la fase de deformación principal.

Partiendo de esta situación de conocimiento, se intentará en este estudio aportar nuevos datos que ayuden a establecer la relación temporal entre los dos dominios estructurales y de este modo esclarecer la historia de la deformación en esta zona y por extensión en el macizo de la Pallaresa.

El estudio estructural realizado en este trabajo se ha llevado a cabo a partir de la realización de la cartografía (ANEXO 1) y de la elaboración de dos cortes geológicos a escala 1:10000, así como del estudio microestructural y petrográfico a partir del análisis de las láminas delgadas. La cartografía nos permite observar a primera vista que la zona queda dividida en dos partes por la falla de Merens. Una parte sur en la que afloran mayoritariamente materiales de la serie cambro-ordovícica con un grado metamórfico bajo y una parte norte en la que la serie cambro-ordovícica presenta un metamorfismo más intenso. Por su parte los cortes geológicos realizados tienen una dirección aproximada N-S, es decir, se han realizado buscando una orientación perpendicular a la dirección dominante de las estructuras. Las características estructurales observadas durante la realización de estos cortes nos permitirán diferenciar distintas fases de deformación así como conocer algo más de la relación existente entre ellas.

### **3.1 Sector situado al sur de la falla de Merens**

#### **3.1.1 Corte geológico A-A'**

Este corte se extiende a lo largo de la cresta fronteriza de dirección aproximadamente N-S entre Andorra y Francia, desde el Port de Arinsal al sur al Pic de Cabagnau al norte (figura 7) (corte A-A' mapa, Anexo 1). A lo largo de prácticamente todo el corte y siguiendo las relaciones entre la foliación dominante en este sector y la estratificación se han podido reconstruir situaciones tanto de flanco normal como de flanco inverso de grandes pliegues de escala cartográfica, acostados y vergentes al norte.

En el extremo sur se observa principalmente una foliación subvertical o vergente al sur asociada a pliegues de orientación E-O y plano axial subvertical o vergente al sur, que deforman a los pliegues vergentes al norte. Estos pliegues derechos son menos abundantes en el resto del corte. En esta parte meridional del corte la serie cambro-ordovícica se encuentra afectada por un cabalgamiento de dirección aproximada NE-SO y una falla normal que corta tanto el flanco inverso de un pliegue vergente al norte como a pliegues de menor escala vergentes al sur.

A escala de detalle en algunos afloramientos de la mitad sur del corte y sobretodo en lámina delgada se observan, en los niveles más pizarrosos, pliegues milimétricos a centimétricos, vergentes al sur, a los que se asocia una foliación de plano axial. Estas estructuras se encuentran deformadas por pliegues centimétricos a decimétricos vergentes al norte con charnelas y flancos inversos engrosados y flancos normales adelgazados, coherentes con los pliegues de escala cartográfica descritos al principio. A estos se asocia una foliación de plano



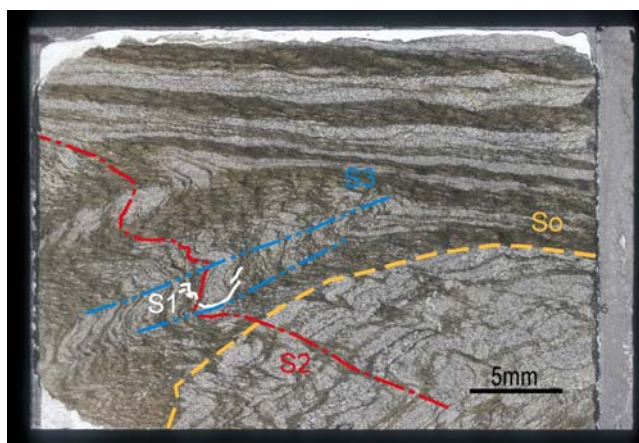


axial que no tiene un buen desarrollo y solo se observa como una foliación de crenulación. Esta superposición dará lugar a estructuras en caja como puede observarse en la figura 8.



*Figura 8. Aspecto de detalle de los pliegues vergentes al norte con chamelas engrosadas y estructuras en caja producto de la superposición de estos pliegues a una deformación anterior, vergente al sur.*

La presencia de un clivaje anterior a los pliegues vergentes al norte se observa a nivel microestructural en otros puntos del área de estudio concretamente en la cresta del Pic de Arcalis. En las láminas delgadas realizadas a partir de las muestras recogidas en esta zona se puede observar la presencia de dicho clivaje que denominaremos a partir de ahora S1. Este clivaje está plegado por la foliación asociada a los pliegues vergentes al norte (S2), que a su vez se encuentra plegada por una foliación posterior que estaría asociada a los pliegues de plano axial subvertical y que llamaremos S3 (figura 9).



*Figura 9. Aspecto de lámina delgada en la que se observa la presencia de una foliación anterior a la foliación principal y a su vez la foliación principal plegada por la foliación S2*

En la mitad septentrional del corte puede observarse de manera más clara que los grandes pliegues de vergencia norte se encuentran plegados por pliegues de plano axial subvertical o vergente al sur bastante laxos.

Finalmente en el extremo norte del corte se alcanza la zona de falla de Merens, la cual pone en contacto la serie cambro-ordovícica de grado metamórfico bajo con materiales cambro-ordovícicos que poseen

un mayor grado metamórfico. A su vez al aproximarnos a la zona de falla se hace muy abundante la presencia de bandas de cizalla de dirección E-O y buzamientos entre 50° y 70° hacia el norte.

### 3.1.2 Corte geológico B-B'

Este corte (figura 11) (corte B-B' mapa, Anexo 1) discurre desde la cresta del Pic de Arcalis al sur, hasta el río de la Coma del Forat al norte. En el extremo meridional afloran materiales correspondientes a la serie del Ordovícico superior, estos al sur, se encuentran discordantes sobre el cambro-ordovícico y al norte están en contacto mecánico con las ampelitas del Silúrico, las cuales están a su vez en contacto mecánico con la serie cambro-ordovícica situada al norte y aflorante en el resto del corte. Durante la realización del corte, en los materiales cambro-ordovícicos se pudo observar como ocurría en el corte anterior, la presencia de pliegues de orientación aproximadamente E-O y plano axial subhorizontal, apretados y vergentes al norte. A estos pliegues esta asociada una foliación de plano axial (S2) subhorizontal, que se corresponde con la foliación dominante a lo largo de todo el corte.

Un aspecto muy significativo que pudo observarse claramente, gracias a la calidad de los afloramientos, es que en la zona de charnela de estos pliegues, la foliación de plano axial (S2) está completamente plegada por pliegues desde angulosos a laxos de plano axial subvertical o vergente al S, mientras que la estratificación no presenta dicha deformación. Sin embargo en la zona de flanco del pliegue aparecen plegadas tanto la foliación como la estratificación (figura 10).

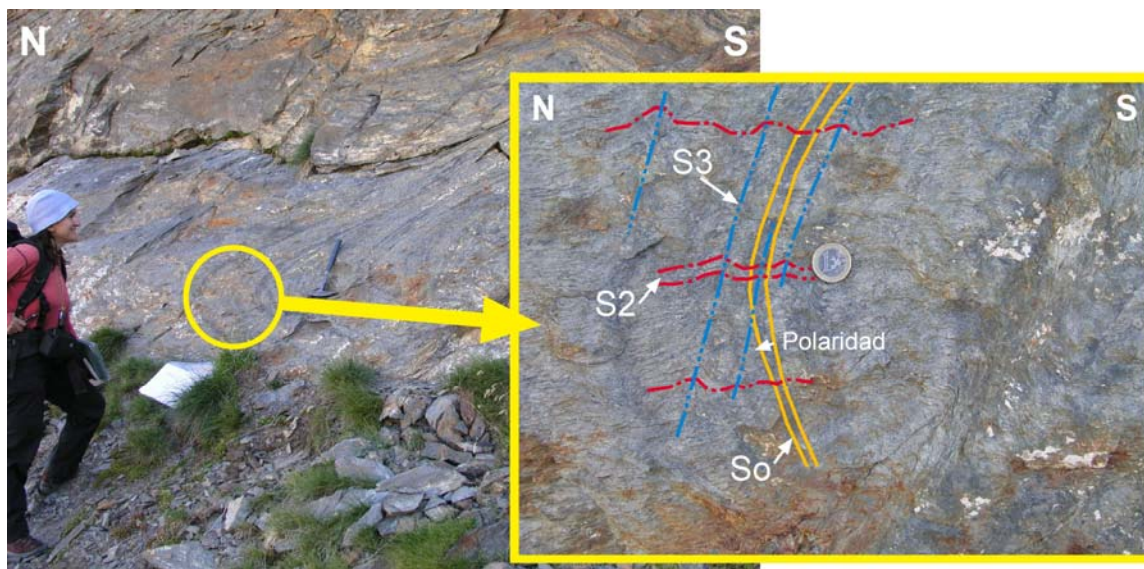


Figura 10. Foliación principal (S2) plegada por pliegues de plano axial subvertical a los que se asocia la foliación (S3). Estación de esquí de Arcalis.

En este corte, teniendo siempre en cuenta la polaridad de la serie, establecida en base a criterios sedimentarios, se ha podido reconstruir la presencia de pliegues vergentes al norte de escala hectométrica. A su vez asociados a estos grandes pliegues, se observan numerosos pliegues menores apretados, vergentes al norte de escala decimétrica a métrica plegados por pliegues de plano axial subvertical o vergente al sur de







tamaño métrico (figura 12). Estos últimos por las características que presentan, pueden considerarse contemporáneos con los pliegues de tercera fase descritos en el corte anterior.



*Figura 12. Pliegue vergente al norte plegado por los pliegues de plano axial subvertical o vergente al sur.*

La orientación de los ejes de los pliegues vergentes al norte queda reflejada en la figura 13, en la que a su vez puede observarse la representación de la foliación (S2) asociada a estos pliegues. En la representación estereográfica puede observarse que se trata de una foliación plegada como marca la dispersión de los polos de plano a lo largo de una guirnalda N-S. Esto a su vez puede observarse en otros puntos del área de estudio como es el caso de la zona de la carretera del Serrat a Arcalis también representada en la figura 10.

Por otra parte es abundante la presencia a lo largo de todo el corte de bandas de cizalla de orientación ENE-OSO a E-O y con altos buzamientos hacia el norte (desde 50° a 70°), similar por tanto a la orientación de los pliegues de fase 3 de plano axial subvertical.

Hacia la parte central del corte se observa una zona con una intensa deformación frágil y fracturación en la que se identifican precipitaciones de sulfatos y sulfuros, todo esto indicaría la presencia de una falla, que se ha interpretado como una falla inversa que corta a un sinclinal vergente al norte.

Finalmente en el extremo norte del corte alcanzaríamos la zona de falla de Merens, lo cual queda reflejado en el campo principalmente porque se ponen en contacto la típica serie cambro-ordovícica con materiales cambro-ordovícicos que presentan un grado metamórfico mucho más alto. Además el efecto de la falla se refleja en la serie cambro-ordovícica situada al sur por la presencia de recristalizaciones de clorita, apreciables en muestra de mano.

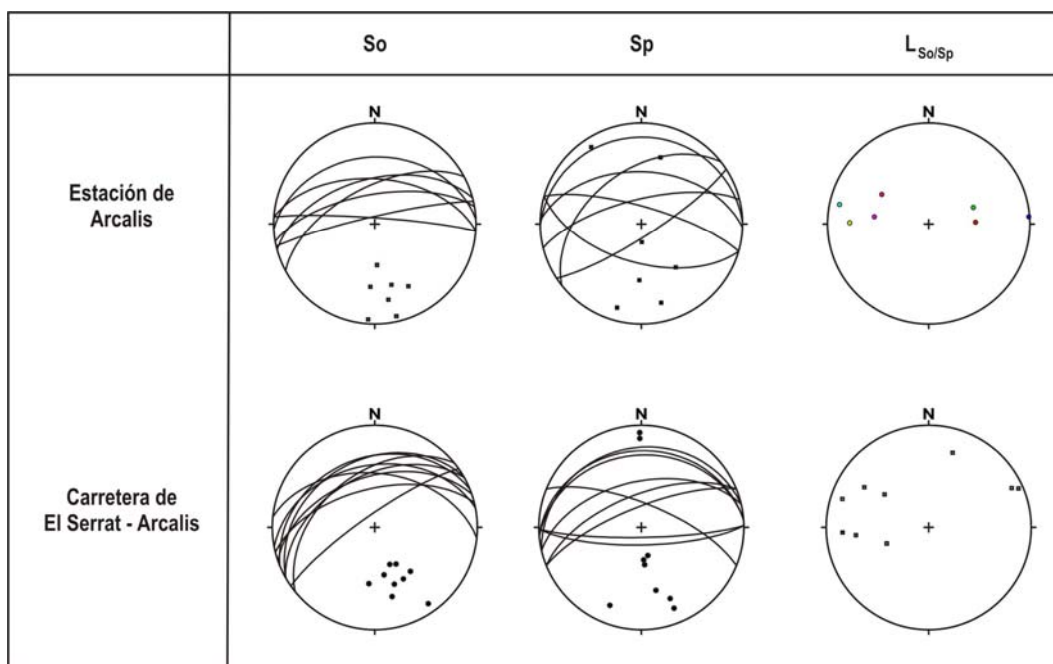


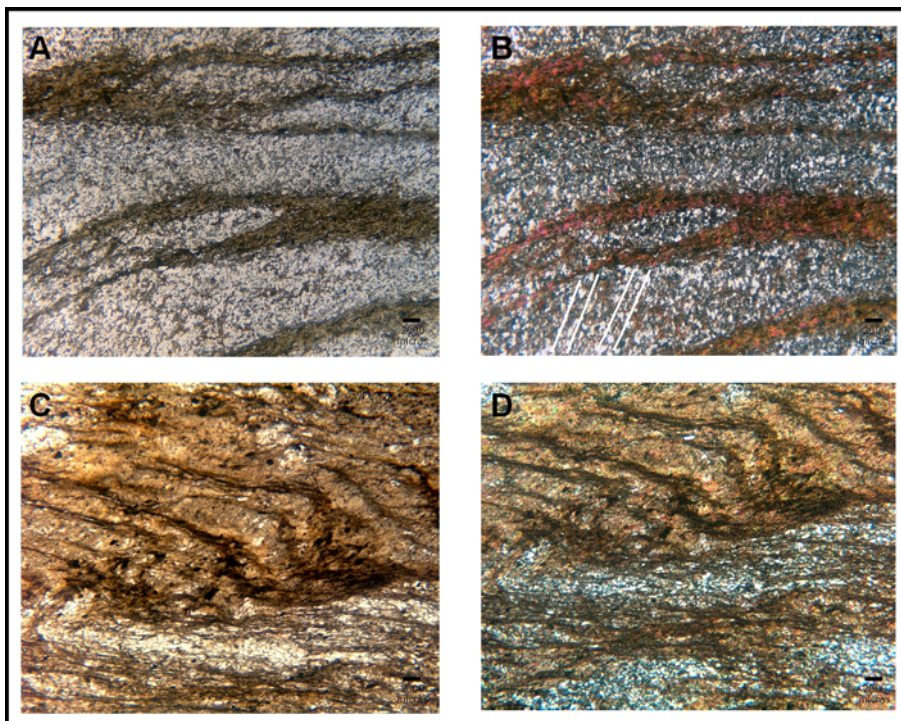
Figura 13. Representación estereográfica de la estratificación, la foliación principal y las lineaciones de intersección entre la estratificación y la foliación principal en la zona de Arcalis y de la carretera que va desde la población del Serrat a la estación de Arcalis.

### 3.1.3 Metamorfismo, sector situado al sur de la falla de Merens

Los materiales que afloran en este sector fueron incluidos, partiendo de los minerales metamórficos que contienen, mayoritariamente en la *zona Biotita*, excepto la zona del valle de Rialp que se incluiría en *la zona Andalucita – Estaurolita – Cordierita*, Alias (1992). En las láminas delgadas procedentes de las muestras recogidas en este sector y más concretamente en la primera zona, puede apreciarse claramente la presencia de biotita, que será el mineral índice de esta zona metamórfica. En esta zona también se desarrollan otros filosilicatos, como clorita y moscovita. La Biotita puede observarse orientada según la foliación dominante en este sector (S2) y plegada por la foliación subvertical (S3). Además de estos filosilicatos en las láminas delgadas puede observarse la presencia de cuarzo y plagioclasas. Los cuarzos en numerosas ocasiones se encuentran orientados formando un alto ángulo con la foliación S2 (figura 14). Esto reflejaría el relicto de la fase de deformación anterior (S1). Incluso en muchas ocasiones puede observarse el clivaje primario (S1) crenulado por la foliación S2 (figura 14).

Al observar estas láminas, también podemos apreciar que la foliación S2 dominante en esta zona presenta las características de una foliación espaciada, con unos dominios de cleavage en los que se acumulan principalmente filosilicatos paralelos a la dirección de los dominios y unos microlitones en los que no se reconoce la presencia de una crenulación. Este tipo de foliación espaciada se denomina: foliación disjuntiva o *“tectonic Banding”*

En alguna de las muestras de esta zona se observa la presencia de cloritas con un crecimiento helicoidal, coherente con la foliación principal, es decir estas se habrían desarrollado coetáneamente con la fase deformación principal como también lo indicarían las trazas de la foliación onduladas dentro del mineral.



*Figura 14. En esta figura queda reflejado tanto en nicoles paralelos como en nicoles cruzados por una parte la orientación de los cuarzos subperpendicular a la foliación principal como queda bien reflejado en las líneas blancas de la esquina inferior izquierda de la lámina derecha (fotografías A y B). Por otra parte se puede observar como la foliación S2 se encuentra plegada por pliegues de fase 3 está crenulando al clivaje primario S1 (fotografías C y D).*

### **3.2 Sector situado al Norte de la falla de Merens**

Como puede apreciarse en el mapa geológico los materiales de la serie cambro-ordovícica que afloran en la parte septentrional del área de estudio presentan un mayor grado metamórfico que el resto. Esta circunstancia nos impide en muchas ocasiones observar con claridad las diferentes superficies, bien de estratificación, foliación, etc, lo cual dificultará la reconstrucción y caracterización de las estructuras presentes en la zona.

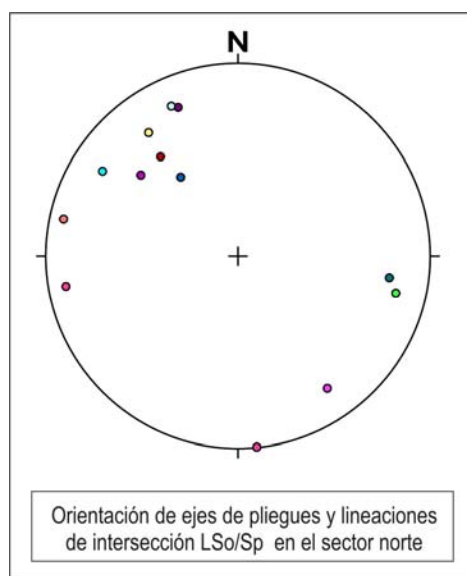
En esta zona, los niveles más cuarcíticos de la serie permiten observar la presencia de pliegues desde decimétricos como los que se observan en la cresta que va desde el Port de Creussans hasta el Pic Petit de l'Estany Forcat, a pliegues de escala métrica a decamétrica en la zona del Pic de Tristaina. Se trata de pliegues, apretados, acostados, con ejes de orientación NO-SE y plano axial subhorizontal (figura 15). Los ejes de estos pliegues presentan mayoritariamente, una baja inmersión hacia el oeste al igual que sucedía en los pliegues descritos anteriormente para zonas con menor grado de metamorfismo.

La vergencia de estos pliegues no ha podido ser establecida hasta el momento porque no se ha observado en ningún punto de manera clara la polaridad de la serie, si bien la morfología de estos pliegues resulta similar a la de los pliegues de plano axial subhorizontal y vergentes al norte descritos en los cortes geológicos realizados en el sector sur y que caracterizan a la fase de deformación principal en esta zona.



*Figura 15. Aspecto de campo de los pliegues descritos de orientación NO-SE. Zona del Pic de Tristaina.*

La orientación NO-SE de los ejes de pliegues así como de las lineaciones de intersección entre la estratificación y la foliación principal quedan reflejadas en el diagrama de proyección estereográfica (figura 16).

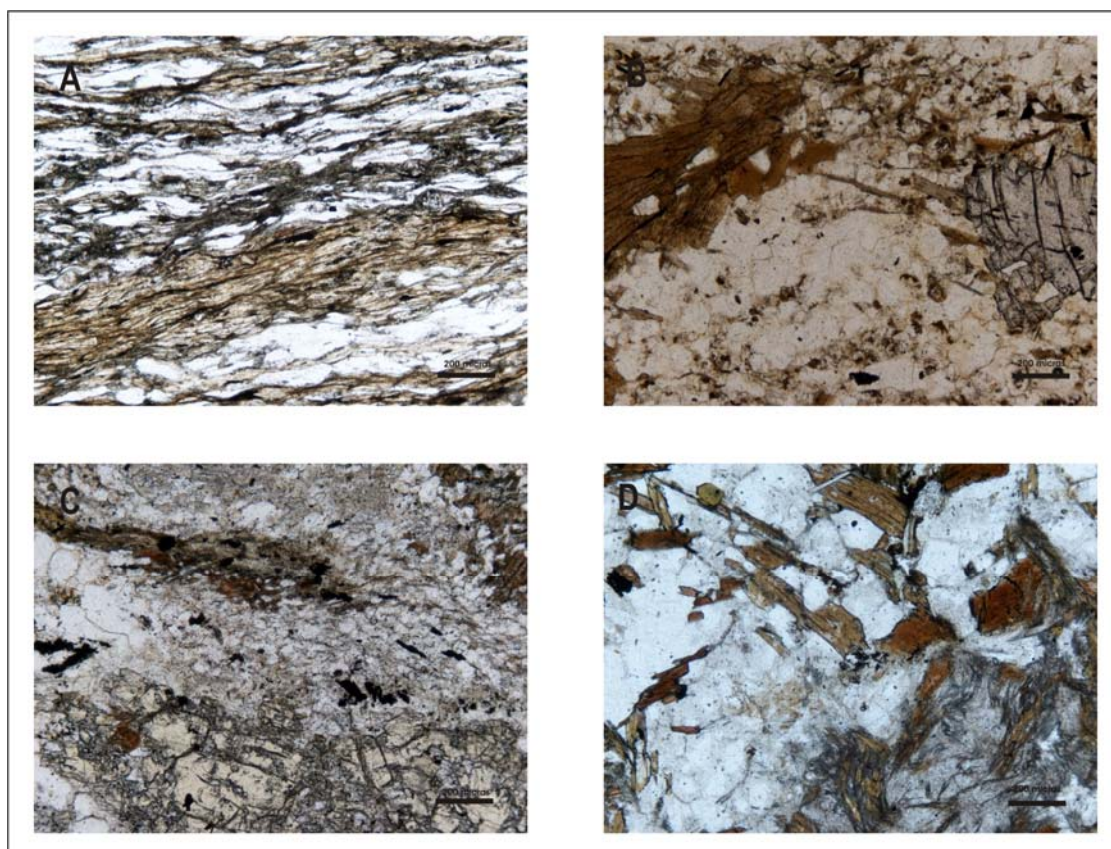


*Figura 16. Representación estereográfica de los ejes de pliegues y lineaciones de intersección So/Sp para el sector norte del área estudiada*

### 3.2.1 Metamorfismo, sector situado al norte de la falla de Merens

El grado metamórfico en este sector es más elevado que en el sector sur y en él se han descrito hasta este momento diferentes zonas metamórficas, que de oeste a este son: *zona Andalucita – Estaulolita - Cordierita*, *zona Estaulolita out* y *zona Sillimanita* (Alias, 1992). En el área cubierta por las dos primeras todavía pueden apreciarse e incluso diferenciarse las superficies de estratificación de las de foliación como es el caso de los pliegues descritos más arriba, sin embargo en la tercera el metamorfismo ha borrado en gran medida las características iniciales de estas rocas.

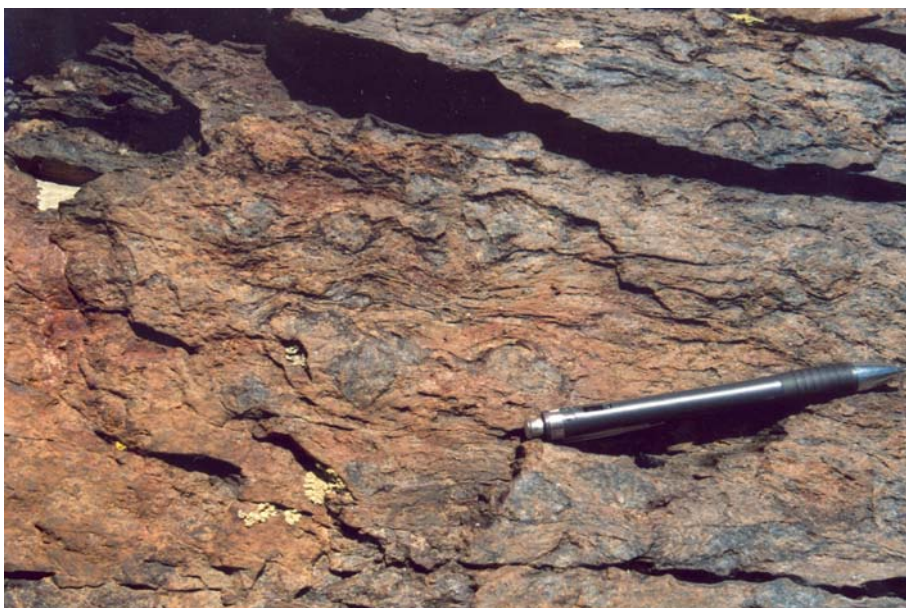
Una vez observadas al microscopio las láminas delgadas de las muestras recogidas en este sector, se podrían introducir algunas modificaciones a las zonas definidas por Alias (1992), como queda reflejado en el mapa geológico elaborado en este trabajo (Anexo 1). En la cartografía puede observarse que en este trabajo el rincón más noroccidental del área se ha incluido en la zona de la Biotita, lo que se ha deducido a partir de los minerales identificados en las láminas delgadas: biotita, clorita, moscovita, cuarzo y plagioclasa (figura 17A) que son los minerales típicos de esta zona metamórfica. En estas muestras se aprecian micropliegues apretados, tumbados, con una foliación de plano axial asociada que parece coincidir con la foliación principal.



*Figura 17. En ella se puede apreciar el aspecto microscópico de algunas de las zonas metamórficas descritas en este trabajo. En ellas se ha intentado reflejar principalmente los minerales índice que caracterizan cada una de estas zonas. (Explicación en el texto)*

Algo más al sur en la cresta fronteriza entre Andorra y Francia las asociaciones minerales observadas nos situarían en la zona del granate, con abundante presencia en las láminas de este mineral junto con otros

como biotita, cordierita, cuarzo y plagioclasa (figura 17B). Esta zona metamórfica no había sido diferenciada en Alías (1992). Hay que señalar que se trata de una zona de extensión reducida y se ha trazado aproximadamente paralela a la isograda de la zona siguiente es decir la zona de Andalucita – Estaurolita – Cordierita, la cual se caracteriza por los siguientes minerales índice: andalucita, estaurolita, biotita, moscovita, cuarzo y plagioclasa. En esta zona cabe destacar la presencia como minerales accesorios de clinizoisita y epidota (figura 17C). En alguna de las láminas delgadas que representan esta zona metamórfica pueden observarse cristales de biotita acumulados en bandas paralelas que marcarían la presencia de una foliación espaciada cuyas características nos permitirían pensar en un posible *tectonic Banding*. A su vez pueden apreciarse micas y biotitas plegadas lo cual nos indicaría que estas se desarrollaron en las primeras etapas del metamorfismo y por otra parte que el aumento del grado de metamorfismo se produce coetáneamente con el desarrollo de la deformación. Cuando los minerales índice de esta zona se mantienen pero la estaurolita comienza a desestabilizarse y a pseudomorfizarse por moscovita y fibrolita se considera que esta asociación caracteriza una nueva zona metamórfica, la zona de la Estaurolita out, identificada en el área de los lagos de Tristaina. El aspecto de campo de las rocas que afloran en esta zona puede apreciarse en la figura 18, donde se identifican cristales de quiastolita de tamaño centimétrico.



*Figura 18. Aspecto de campo de una roca situada dentro de lo que se ha definido como zona estaurolita – out. Alrededores de los lagos de Tristaina.*

Finalmente la zona de mayor grado metamórfico que se ha identificado es la zona de la Sillimanita, los minerales índice que la caracterizan son: Biotita, Sillimanita, cuarzo, moscovita, y plagioclasa (figura 17D). Destaca la abundante presencia de turmalina como mineral accesorio.

### 3.3 Falla de Merens

En la zona estudiada en este trabajo falla de Merens únicamente se asocia a rocas miloníticas en el Port de Banyell. En el resto del área, el rasgo que permite apreciar la presencia de esta falla es el contacto brusco entre la serie cambro-ordovícica típica del macizo de la Pallaresa, con un grado metamórfico bastante bajo, situada al sur, con materiales cambro-ordovícicos que presentan un grado metamórfico mucho más alto que los adyacentes y que afloran al norte de la falla. Esta característica puede apreciarse claramente en el valle de Rialp, unos metros más al norte del Refugio de montaña del mismo nombre.

A lo largo de su trayectoria, los materiales del bloque sur situados en las proximidades de la falla presentan una foliación de espaciado centimétrico y prácticamente subhorizontal o con escaso buzamiento tanto al norte como al sur. Esta foliación se observa en ocasiones como una foliación de crenulación sobre la foliación S2. Por otra parte en algunas ocasiones incluso la estratificación parece sufrir un efecto de crenulación, observándose microlitones separados por superficies de disolución (figura 19). La relación de esta foliación con la falla de Merens es un aspecto que todavía quedaría por investigar.

Otra característica que parece reflejar el efecto de este accidente es el aumento de bandas de cizalla que se observa al acercarnos a su área de influencia tanto en el bloque norte como en el bloque sur de la falla. Además hay que señalar también que durante la realización del corte geológico B-B', es decir en el bloque sur, se pudo observar que dichas bandas de cizalla parecen agruparse en dos áreas de entre doscientos y trescientos metros de espesor. Una de ellas se situaría justo al sur del Port de Rat y la otra, algo más estrecha, justo al norte del Pic de Cataperdis.



*Figura 19. Foliación de crenulación grosera que en las zonas cercanas a la falla afecta a la serie cambro-ordovícica. Zona del Pic de Besalí.*