

# El papel de las zonas de cizalla en la configuración estructural del complejo migmatítico del sector septentrional de la península del Cap de Creus (Girona).

J. CARRERAS y E. DRUGUET

*Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra. Barcelona.*

**Resumen:** Las bandas miloníticas de la zona del Cap de Creus responden a una red anastomosada de zonas de cizalla que, en condiciones metamórficas retrógradas, afectan a esquistos de grado medio-alto. Los esquistos están extensamente intruidos por diques de pegmatita y localmente presentan zonas migmatíticas en las cuales aparecen pequeños cuerpos de granitoides y cuarzodioritas. A pesar de la intensidad de la deformación que se genera en las zonas de cizalla, éstas nunca constituyen discontinuidades mayores y el efecto estructural producido por las cizallas comporta la configuración de un mosaico de cuerpos elongados no miloníticos, en los que se preservan las estructuras anteriores, envueltos por fajas de milonitas bandeadas producto de la trasposición de las estructuras y litologías preexistentes. El resultado de la combinación de cizallas ligadas a movimientos dextrales-inversos predominantes con cizallas precedentes senestrales-normales, explica la estructuración final del complejo migmatítico disgregado en diversos afloramientos, uno de los cuales aparece circundado por esquistos no migmatíticos.

**Palabras clave:** Zona de cizalla, milonita, migmatita

**Abstract:** Mylonitic bands in the Cap de Creus area are related to an anastomosed network of shear zones cutting across medium-high grade schists, which become retrograded by mylonitization. Schists are extensively intruded by a swarm of pegmatites and locally display migmatitic zones with associated small bodies of granitoid and quartz-diorite. Although the shear zones do not represent major discontinuities, their bulk effect consists in the development of an assemblage of elongated bodies wrapped by mylonitic bands. Migmatite derived mylonites display banded-gneiss structures arising as the result of ductile high strain inducing the transposition of the earlier structural and lithologic arrangement. The combined effect of the predominantly dextral-reverse movements with previous sinistral-normal movement along the shear zones is responsible for the configuration of the migmatitic complex, now forming individualized outcrops, being one of these surrounded by non migmatitic schists.

**Key Words:** Shear zone, mylonite, migmatite

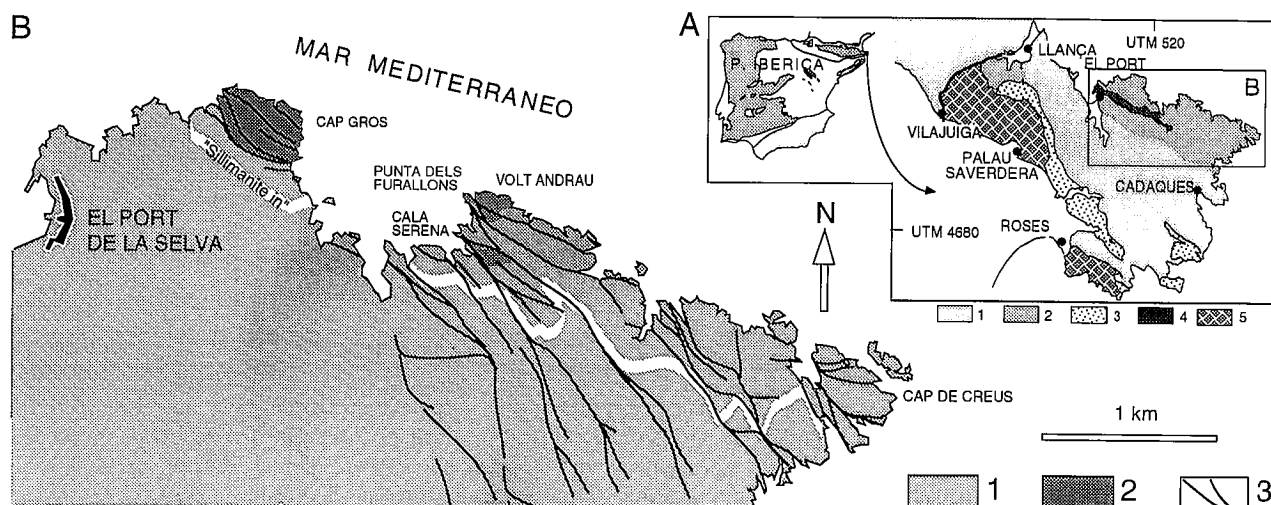
Carreras, J. y Druguet, E. (1994): El papel de las zonas de cizalla en la configuración estructural del complejo migmatítico del sector septentrional de la península del Cap de Creus (Girona). *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (1-2): 21-29.

La faja milonítica septentrional de la península del Cap de Creus (Carreras 1975a; Carreras et al., 1975; Carreras y Casas, 1987) constituye una red anastomosada de zonas de cizalla que afectan a esquistos de grado medio-alto y a rocas ígneas asociadas (pegmatitas, granitoides y cuarzodioritas). Los esquistos corresponden a una serie formada por alternancias de metagrauvas y metapelitas con predominio de las primeras. La edad de la secuencia sedimentaria no está establecida y, si bien ésta se atribuye al Cambro-Ordovícico, no pueden descartarse edades precámbricas. El metamorfismo es de edad creciente y del tipo de baja presión. Muestra un grado creciente hacia el norte detectable en los esquistos por la delimitación de zonas de isometamorfismo que comprenden desde la zona de la clorita-moscovita hasta la zona de la sillimanita. Las pegmatitas, también hercínicas, conforman un enjambre de diques de forma generalmente irregular emplazados en el dominio metamórfico que incluye las

zonas de la cordierita-andalucita y de la sillimanita (Orta, 1973; Carreras et al., 1975; Corbella, 1990; Damm et al., 1992). En la zona de la sillimanita existen tres afloramientos de migmatitas y granitoides asociados (Fig. 1), localizados uno en el Cap Gros (Ramírez, 1983) y los dos restantes al este de Cala Serena y en Volt Andrau (Druguet, 1992).

Las cizallas se desarrollan en condiciones metamórficas regresivas (facies de los esquistos verdes) y traspone a las estructuras anteriores (esquistosidades, pliegues y una débil foliación en los granitoides) generadas en parte durante la etapa progradada y en parte durante el clímax metamórfico, la migmatización y la intrusión de los cuerpos de granitoides, cuarzodioritas y pegmatitas. Todo el conjunto de estructuras se interpreta como producto de la tectónica polifásica hercínica.

La faja milonítica en su conjunto tiene una dirección WNW-ESE e individualmente las zonas de cizalla pre-



**Figura 1.-** Localización de las zonas de cizalla y los afloramientos migmatíticos del litoral septentrional de la península del Cap de Creus. A: Mapa de situación (a partir de Carreras y Losantos, en prensa): 1. Serie Inferior : metagrauvascas y metapelitas en grado bajo, 2. Id.: en grado medio (esquistos de Cap de Creus), 3. Serie superior: mármoles, metapsamitas y metaconglomerados, 4. Gneises del Port, 5. Granodioritas. B: Sector septentrional: 1. Esquistos (metagrauvascas y metapelitas), 2. Migmatitas, 3. Zonas de cizalla.

sentan orientaciones variables entre NW-SE y W-E, y buzamientos moderados a fuertemente inclinados de componente norte (Carreras y Casas, 1987). La red de zonas de cizalla se dispone oblicuamente a las foliaciones previas provocando la inflexión de las mismas y produciendo su trasposición mediante la formación de una foliación milonítica muy penetrativa y con carácter de fábrica plano-linear. El bandeado litológico de las milonitas surge como resultado de la deformación de un conjunto metasedimentario estructural- y litológicamente heterogéneo, localmente de carácter migmatítico, y que además está ampliamente intruido por pequeñas venas de cuarzo y diques de pegmatita.

La inflexión marginal de la foliación previa y la disposición de la lineación de estiramiento sobre el plano de foliación milonítica permiten, en una gran mayoría de casos, determinar directamente la dirección y sentido del desplazamiento en cada zona de cizalla. El análisis de la distribución de las asimetrías de los pliegues intramiloníticos mediante el método del ángulo de separación de Hansen (1971), permite confirmar la validez de la utilización de la lineación de estiramiento como elemento estructural y a la vez cinemático (Carreras y Santanach 1973). La disposición de las crenulaciones extensivas en las bandas miloníticas y el análisis de fábricas de ejes "c" del cuarzo muestran resultados congruentes con los obtenidos mediante los criterios anteriores (Carreras et al. 1977; Carreras y García-Celma, 1982, García, 1983; Norton, 1982). En algunos casos, el desplazamiento de diques cizallados permite incluso estimar la magnitud del desplazamiento.

En las zonas de cizalla de orientación NW-SE el movimiento es mayoritariamente dextral con un componente inverso menor. Este componente inverso se incrementa a medida que las zonas de cizalla adquieren orientaciones más próximas a la dirección W-E siendo el movimiento totalmente inverso en zonas de cizalla de dirección WSW-ENE (Carreras et al., 1982). Algunas zonas de cizalla con disposiciones análogas al conjunto evidencian sin embargo movimientos con componentes normales y senestrales.

Las zonas de cizalla en este sector no originan discontinuidades netas entre unidades litológicas ni entre dominios metamórficos. En términos generales la relación entre espesor de la banda y desplazamiento es de uno o, a lo sumo, de dos órdenes de magnitud. Las bandas de espesores centimétricos muestran desplazamientos de orden métrico y las bandas con espesor de orden métrico presentan desplazamientos de orden deca- o hectométrico. Las zonas de cizalla, por tanto, no constituyen discontinuidades de magnitud regional que yuxtapongan unidades litológicas alóctonas con litologías primarias diferentes o que registren evoluciones distintas. Sin embargo, juegan un importante papel en otros aspectos. Por una parte, modifican la estructura interna de las rocas presentes en los complejos migmatíticos dando lugar a la aparición de variedades de rocas gnésico-miloníticas bandeadas con apariencia de derivar de protolitos constituidos por alternancias para- y ortoderivadas. Por otra, condicionan la estructuración final del complejo migmatítico en varios afloramientos por efecto de los cizallamientos. Los desplazamientos relativos entre bloques son, a lo sumo, de orden kilométrico. La estructura en superficie responde tridimensionalmente a la sección de un conjunto de cuerpos fusiformes flanqueados por bandas de intensa deformación por cizalla dúctil y elongados según la dirección de estiramiento inducido por las cizallas.

#### **El papel de las zonas de cizalla en la estructuración interna de las rocas migmatíticas.**

La estructuración de las rocas ubicadas en dominios de deformación dúctil heterogénea presenta un carácter muy variable en función del grado de deformación. Los afloramientos del sector septentrional de la península del Cap de Creus muestran ejemplos muy ilustrativos de la modificación de la estructura de las migmatitas por efecto de la deformación. De las heterogéneas migmatitas se derivan rocas miloníticas bandeadas que responden a gneises de tipo bandeado (Figs. 2 y 3). El

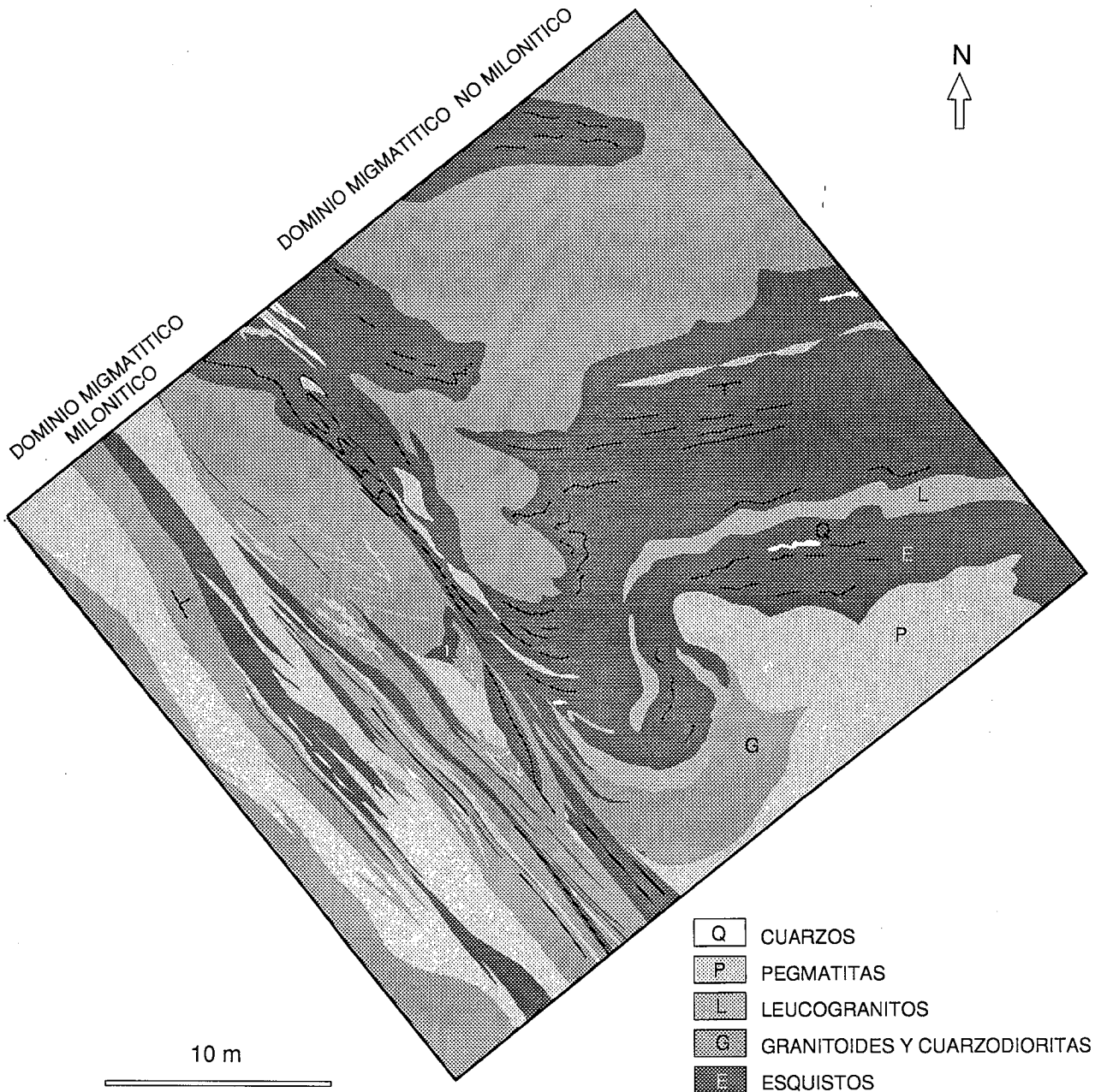
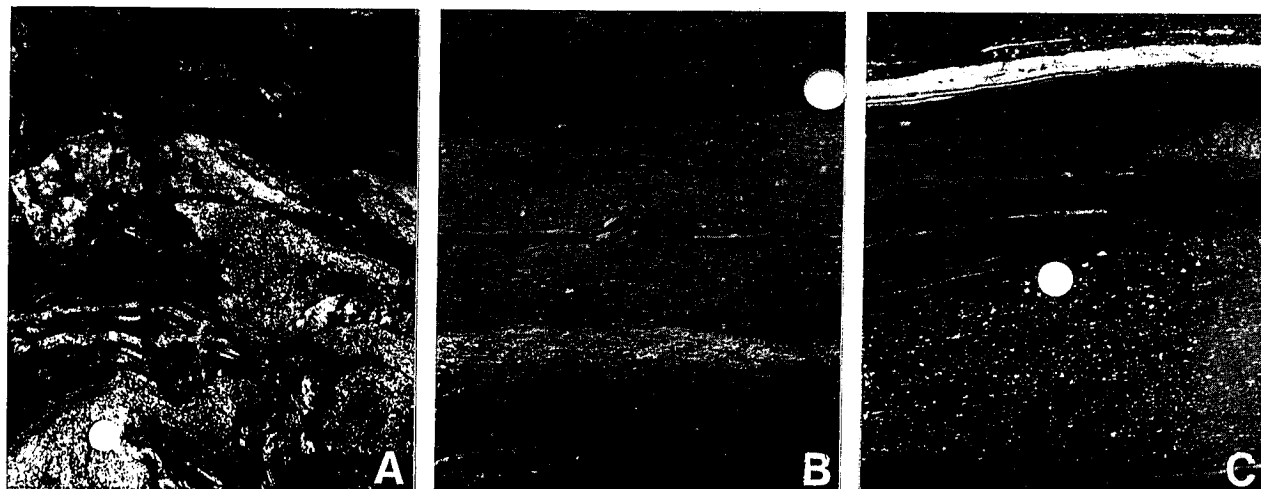


Figura 2.- Cartografía de detalle que muestra los efectos de la milonitización sobre las rocas del complejo migmatítico. La localización del sector se muestra en la Fig. 4.

bandeado gnésico se desarrolla por extrema deformación dúctil de una asociación de rocas con heterogeneidades composicionales no necesariamente planares. Este tipo de gneises miloníticos bandeados son comunes en dominios de elevada deformación y pueden inducir a ser interpretados, fuera de contexto o en áreas en donde la transición entre los dominios miloníticos y los no miloníticos no sea evidente, como secuencias de alternancias de rocas paraderivadas y ortoderivadas volcano-clásticas.

El conjunto, heterogéneo en cuanto a litología y estructura, constituido por las migmatitas, que incluyen paleosomas con estructuras anteriores y neosomas con enclaves, schlierens y fábricas plano-lineares ígneas o de alta temperatura, se transforma en una asociación de milonitas bandeadas. A las heterogeneidades previas mencionadas hay que añadir las intrusiones de cuerpos de

granitoides, diques de pegmatita y venas de cuarzo. Como consecuencia de la deformación del conjunto, cada uno de los componentes genera una banda litológicamente diferenciada. La foliación milonítica traspone y oblitera las fábricas y estructuras anteriores. Los componentes litológicos con fábricas originalmente isótropas como las pegmatitas, adquieren por efecto de la intensa deformación una foliación milonítica y son transformadas en bandas de gneises leucocráticos que se disponen paralelamente al resto de bandeados composicionales. Asimismo, la foliación milonítica y el bandeo litológico se paralelizan. Ejemplos análogos de desarrollo de bandeados gnésicos por deformación de rocas ígneas heterogéneas han sido descritos por Myers (1978) y Passchier et al. (1990). En este proceso intervienen la retrogradación parcial de la mineralogía original a asociaciones propias de las facies de los esquistos verdes y la



**Figura 3.-** Detalle de los efectos de la milonitización en las migmatitas. A. Migmatita no milonítica. B. Milonita derivada de la migmatita bajo los efectos de una deformación moderada. C. Milonita producto de alta deformación; se forma un gneis milonítico bandeado en la que las bandas oscuras de grano grueso son los equivalentes miloníticos de las cuarzodioritas y tonalitas, mientras que las bandas claras de grano grueso derivan de la milonitización de pegmatitas o leucogranitos.

transformación microestructural con una drástica reducción del tamaño de grano (Carreras et al., 1975 y 1977). Se mantienen no obstante las heterogeneidades composicionales iniciales sin que se detecte la intervención de ningún proceso de diferenciación metamórfica en la generación del bandeo.

Se han determinado valores de la deformación del orden de  $\gamma = 10$  en los bordes de la banda milonítica, mediante medidas del cambio de orientación de la foliación previa (Carreras, 1975b), y de  $\gamma = 100$  en el interior de algunas bandas miloníticas, mediante mediciones de la variación de espesor de capas o diques milonitizados, así como de la relación entre magnitud del desplazamiento y espesor de la banda milonítica (Norton, 1982).

Estos elevados valores de deformación originan elipsoides de relación axial  $100 < R < 10000$ . Esta circunstancia determina que, cualquiera que sea la estructura inicial del cuerpo migmatítico, tras la deformación se genere una roca penetrativamente foliada y con un marcado bandeo litológico producto del estiramiento de los distintos componentes petrológicos presentes en el complejo migmatítico (Figs. 2 y 3). Exclusivamente los grandes cuerpos de pegmatitas se comportan de forma refractaria frente a la deformación, debido a su gran tamaño de grano original, su elevado contenido en feldespatos y la relativamente baja proporción de filosilicatos. Como resultado de este comportamiento, los grandes diques de pegmatita contribuyen a la acentuación del carácter heterogéneo de la deformación, conformando estructuras pinch and swell o boudins aislados con núcleos no deformados y bordes milonitizados en mayor o menor grado pero con valores de  $\gamma$  menores a los que se registran en las milonitas envolventes. En estos casos se observa una adaptación de la foliación y de la lineación milonítica a las irregularidades de la forma del cuerpo. Por el contrario, todas las variedades de granitoides así como las cuarzodioritas, por su menor tamaño de grano original y su mayor contenido en filosilicatos, presentan una milonitización intensa y uniforme sin marcados contrastes de competencia respecto a los paleosomas metapelíticos y metagrau-vaquicos.

### Cinemática de las zonas de cizalla y su papel en la configuración estructural de los afloramientos de migmatitas.

Los afloramientos de migmatitas del sector de la Punta dels Furallons conforman dos unidades (Fig. 4), la septentrional (Vult Andrau) y la meridional (Cala Serena), separadas ambas por esquistos no migmatíticos. En ambas unidades los contactos meridionales entre los dominios migmatíticos y los formados por esquistos no migmatíticos son graduales y, a grandes rasgos, paralelos a la foliación dominante. Los restantes contactos observables vienen marcados por importantes zonas de cizalla. La unidad migmatítica meridional situada al E de Cala Serena está enteramente circundada por esquistos no migmatíticos y fue considerada a priori como un foco migmatítico producto de una anatexia inducida por el emplazamiento local de granitoides y cuarzodioritas en el seno de los esquistos.

Las cizallas de la faja milonítica septentrional de la península de Cap de Creus presentan movimientos predominantemente dextrales con menor o mayor componente inversa. En consecuencia, la presencia de unidades migmatíticas flanqueadas por el SW por zonas de cizalla y adyacentes a dominios no migmatíticos, es congruente con los mencionados movimientos, ya que su efecto es desplazar hacia el sur y hacer ascender los dominios de más alto grado situados originalmente a más profundidad y geográficamente más al norte.

El análisis cinemático del conjunto de zonas de cizalla de este sector revela, no obstante, que el comportamiento cinemático no es idéntico en todas ellas puesto que, si bien predominan las cizallas dextrales-inversas, también se reconocen movimientos senestrales y normales. La configuración global del sistema de cizallas, indicando la orientación de los elementos estructurales y comportamiento cinemático, se resume en las figuras 5 y 6. En estos esquemas puede evidenciarse el carácter senestral con una débil componente normal de la zona de cizalla del Prat de Cala Prona, que limita por el norte el afloramiento migmatítico meridional. El carácter senes-

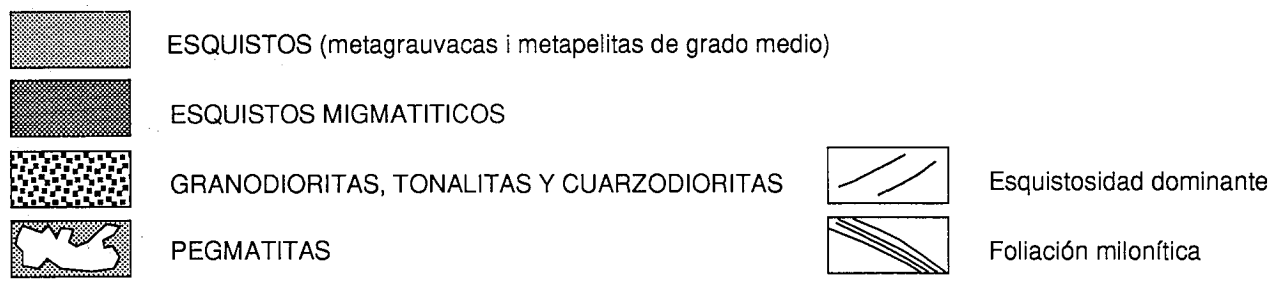
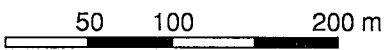
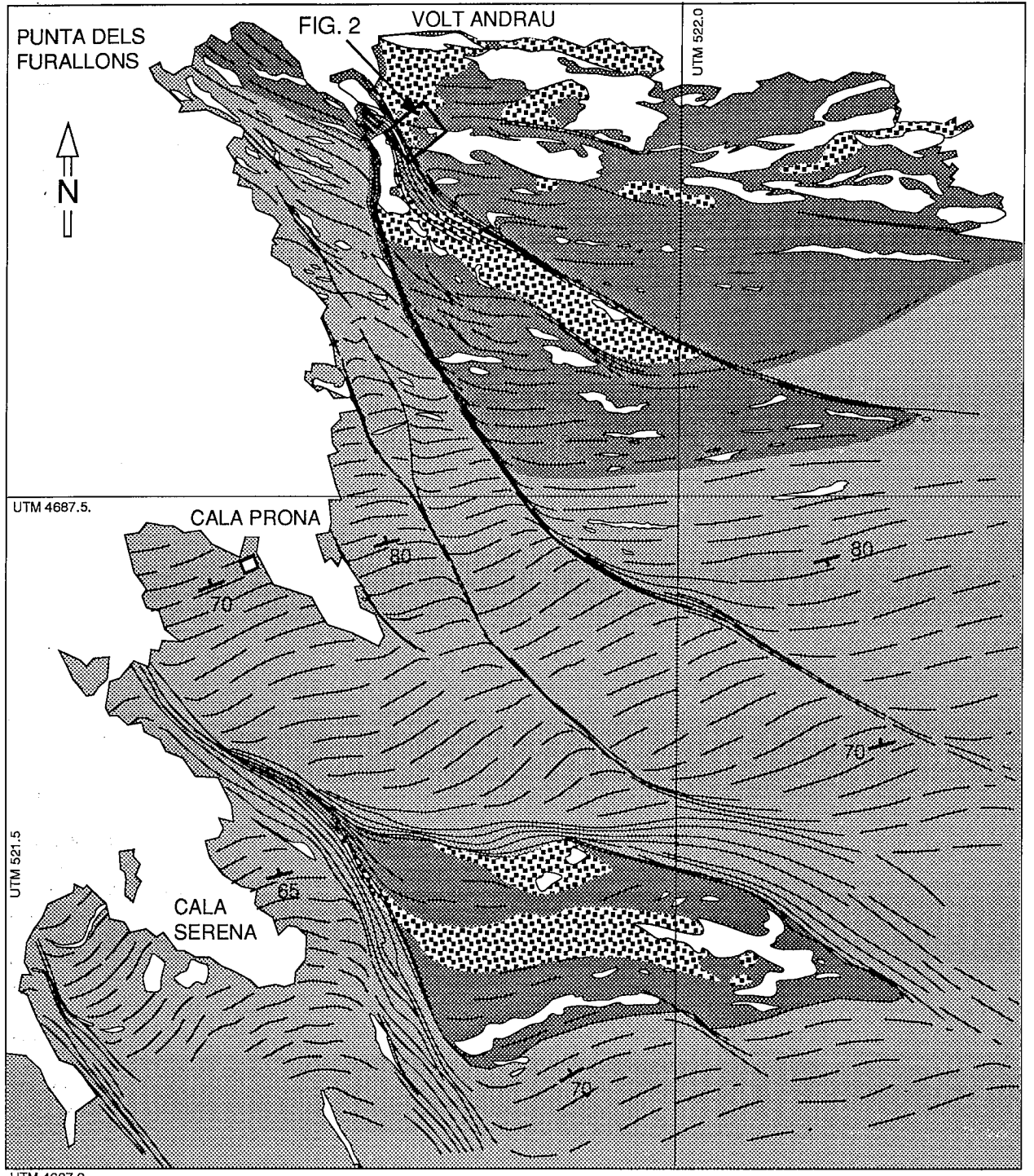
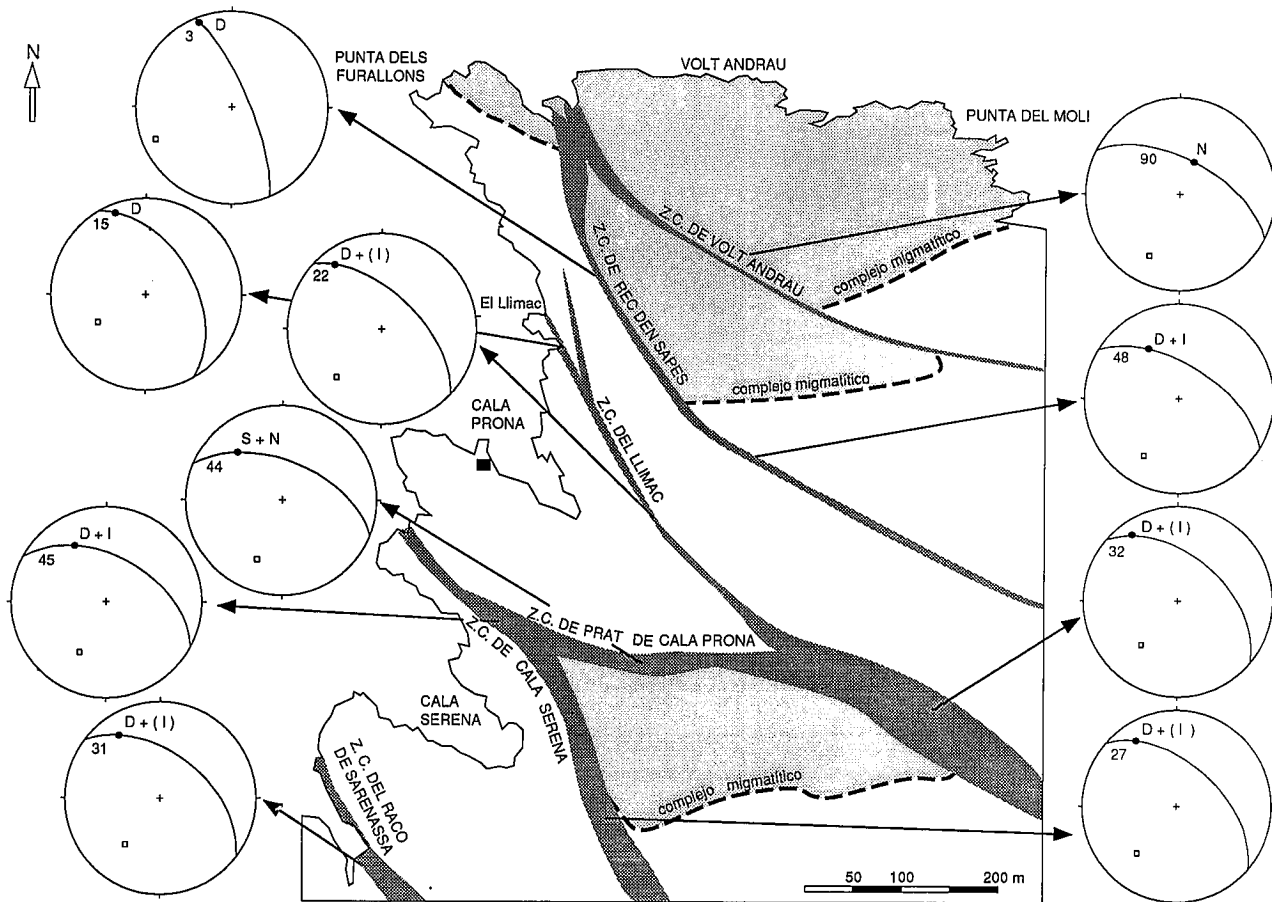


Figura 4.- Situación geológica de los afloramientos migmatíticos de Volt Andrau y de Cala Serena en el sector de la Punta dels Furallons.



**Figura 5.-** Disposición de las principales zonas de cizalla. Los estereogramas (en proyección equiareal) representan la orientación media del plano de foliación milonítica (ciclográfica y polo □), la lineación de estiramiento asociada (\*), así como los componentes de movimiento (D = dextral, S= senestral, I= inversa, N= normal; los componentes menores del movimiento se indican entre paréntesis). La cifra en cada estereograma indica el pitch de la lineación.

tral de esta cizalla es incuestionable en base a la sistemática disposición de las crenulaciones extensivas (Fig. 7) en la zona de cizalla, hecho que ya fue establecido por Norton (1982). Este autor interpretó esta situación como el resultado de un movimiento antitético del bloque constituido por los materiales migmatíticos, que se comportaría como un cuerpo rígido frente a los esquistos durante los cizallamientos (Fig. 8A). Este modelo, si bien es coherente con la componente senestral que se registra en las milonitas de la zona de cizalla del Prat de Cala Prona, no explica una posible conexión inicial entre las unidades migmatíticas meridional y septentrional.

La banda milonítica ligada a la cizalla senestral es coalescente cartográficamente con la zona de cizalla dextral de Cala Serena (Figs. 4, 5 y 6). Sin embargo, la única banda milonítica que representa la prolongación hacia el NE del conjunto coalescente, presenta la misma disposición geométrica y muestra comportamiento cinemático desxtral, igual que la zona de cizalla de Cala Serena (Fig. 6). Esta desaparición de indicadores de movimientos senestrales a partir del punto de coalescencia, induce a considerar que el cizallamiento senestral precede a las cizallas dextrales.

El movimiento senestral inicial, congruente con el registrado por los indicadores cinemáticos en la banda milonítica de Prat de Cala Prona (Fig. 7) sería el responsable del desplazamiento relativo hacia el ESE del bloque situado al S de la zona de cizalla. Una reconstrucción ba-

sada en la restitución de los movimientos asociados a las distintas zonas de cizalla implicadas (Fig. 8B), muestra como se puede llegar a la configuración actual partiendo de un único complejo migmatítico situado al norte. Por efecto del cizallamiento senestral inicial (CS), parte del complejo migmatítico quedaría flanqueado por el N por una banda milonítica que lo separaría de esquistos no migmatíticos. Un efecto análogo pero mucho más limitado produciría el cizallamiento normal asociado a la zona de cizalla de Volt Andrau (CN). Los cizallamientos dextrales-inversos (CD1, CD2 y CD3) configurarían la disposición final del conjunto de unidades. En esta reconstrucción no se ha considerado la deformación interna de los dominios no miloníticos puesto que ésta no es significativa, excepto en los dominios entre zonas de cizalla próximas o en los dominios de coalescencia de bandas. Este modelo propuesto explica la falta de continuidad del afloramiento meridional de migmatitas y su brusco contacto con el dominio no migmatítico situado al NE.

**Conclusiones**

La reconstrucción de la disposición anterior a los cizallamientos permite considerar que los diversos afloramientos de rocas migmatíticas a lo largo de la zona litoral septentrional de la Península del Cap de Creus proceden de una sola zona migmatítica, posiblemente en for-

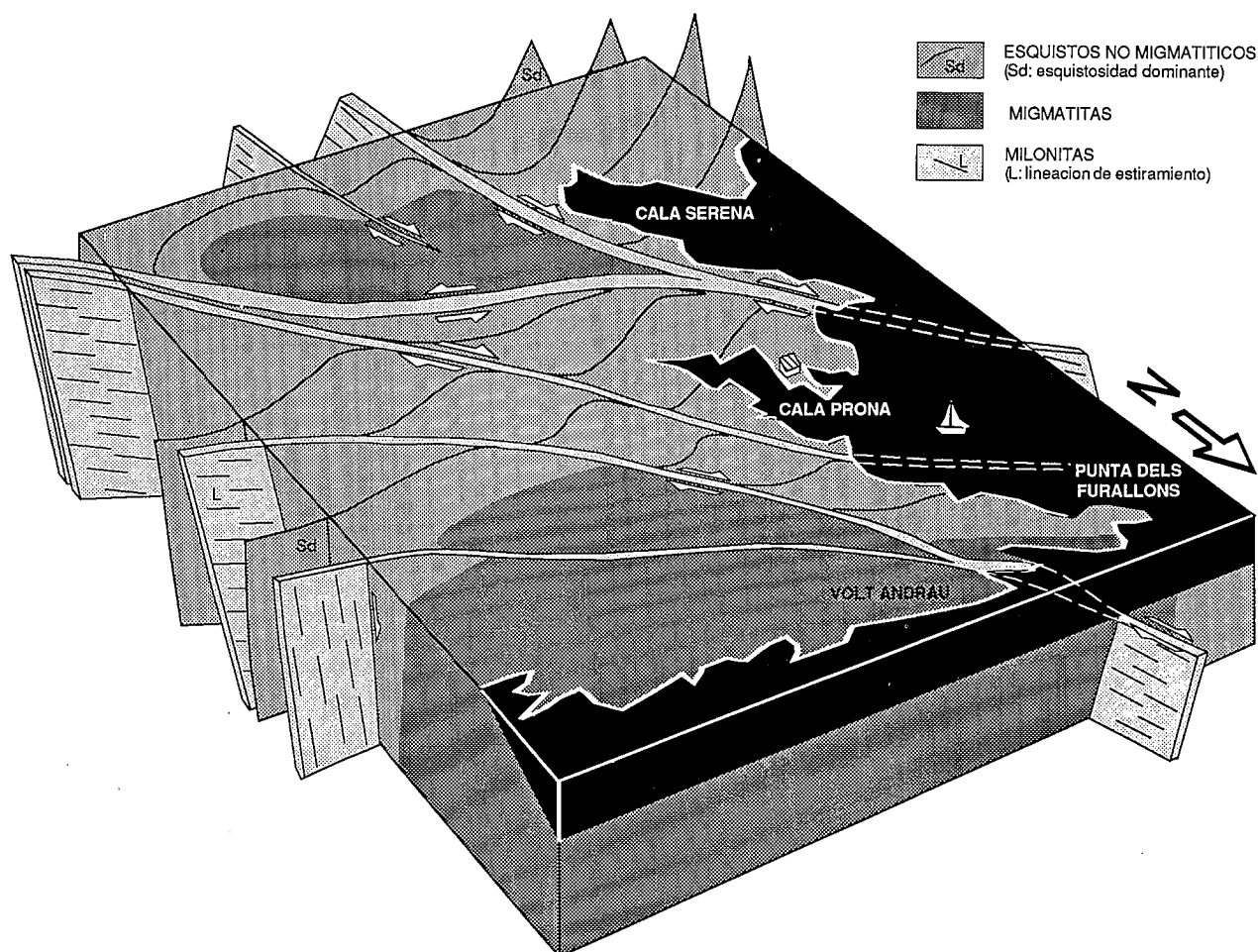


Figura 6.- Representación tridimensional esquemática de la disposición de las principales zonas de cizalla en la zona mostrada en los mapas de la Fig. 4 y 5.

ma de faja continua situada al N, donde una migmatización inducida por el emplazamiento sintectónico de cuar-zodioritas, tonalitas y granodioritas, se solapó subparalelamente a la zonación metamórfica preexistente en los metasedimentos no migmatíticos.



Figura 7.- Foliación milonítica y crenulaciones extensivas en filonitas de la zona de cizalla del Prat de Cala Prona.

La coexistencia espacial de cizallamientos dúctiles con desplazamientos según direcciones próximas pero con sentidos opuestos fue responsable de la desmembración del complejo migmatítico en varias unidades y ex-

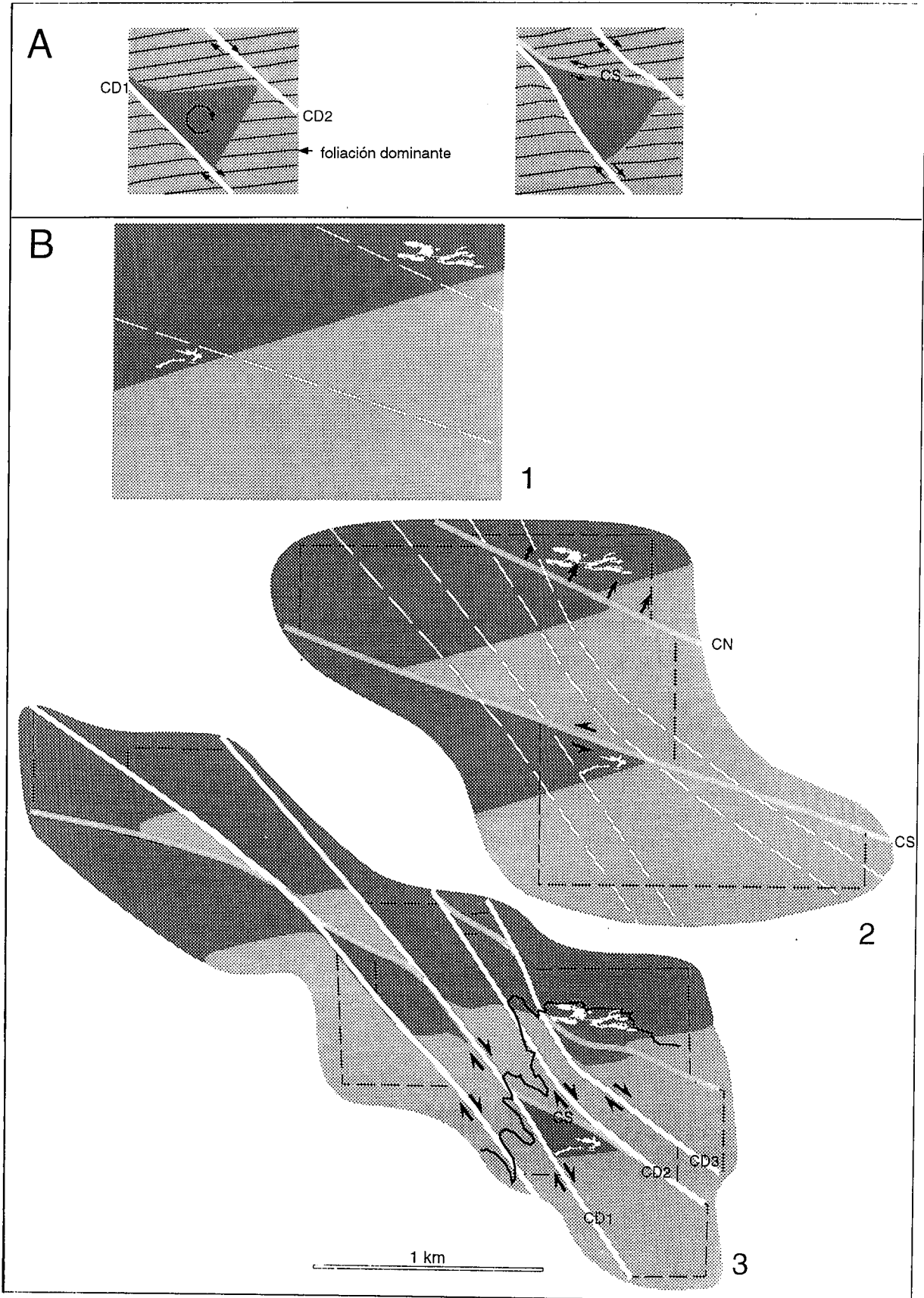
plica la presencia de una zona migmatítica envuelta por dominios no migmatíticos, sin tener que considerar la existencia de un foco anatéctico puntual.

Otra consecuencia del desarrollo de zonas de cizalla es la formación de amplias bandas miloníticas en las que se produce la transformación total de las estructuras previas por efecto de la trasposición. Los equivalentes miloníticos de las migmatitas y rocas asociadas constituyen gneises bandeados provistos de una foliación muy penetrativa. El bandeado se genera exclusivamente por efecto de la extrema deformación dúctil de una asociación heterogénea y no necesariamente planar de litologías previas.

El trabajo de campo fue financiado por la DGICYT mediante los proyectos PB 88-0240 (J. Carreras) y GEO 89-0830 (E. Druguet). El artículo ha sido elaborado en el marco del proyecto PB 91-0477. Se agradece a los revisores anónimos y a M.L. Arboleya sus críticas y comentarios que han contribuido a mejorar el trabajo.

### Bibliografía

- Carreras, J. (1975a): Las deformaciones tardi-hercénicas en el litoral septentrional de la península del Cap de Creus (prov. Gerona, España): la génesis de las bandas miloníticas. *Acta Geol. Hisp.*, 10 (3): 109-115.
- Carreras, J. (1975b): Determinación de las relaciones angulares y de la deformación por cizalla, para cizallamientos en materiales con una heterogeneidad planar. *Acta Geol. Hisp.*, 10 (4): 141-145
- Carreras, J., Estrada, A., & White, S. (1977): The effects of folding on



**Figura 8.-** Interpretación cinemática para la configuración actual del complejo migmatítico en la zona cartografiada. A) Interpretación de Norton (1982) de la cizalla senestral del Prat de Cala Prona (CS1) como resultante de un componente de aplastamiento entre dos zonas de cizalla dextrales principales (zonas de cizalla de Cala Serena: CD1, y del Llimac: CD2). B) Modelo alternativo propuesto en donde las zonas de cizalla senestrales ( $\pm$  normales) anteceden a las zonas de cizalla dextrales ( $\pm$  inversas) principales. 1. Situación pre-milonítica, 2. Desplazamientos producidos por efecto de los cizallamientos senestrales (CS) y normales (CN). 3. Situación final tras los cizallamientos dextrales. (En gris oscuro se representan los dominios migmatíticos, en gris medio los esquistos no migmatíticos y en blanco las pegmatitas).



- the c-axis fabrics of a quartz-mylonite. *Tectonophysics*, 39, 3-24.
- Carreras, J., Orta, J.M. y San Miguel, A. (1975): El área pegmatítica del litoral N. de la península del Cap de Creus y su contexto metamórfico y estructural. *Rev. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 30: 11-34.
- Carreras, J., Losantos, M. y Santanach, P. (1982): An example of relationship between mylonite foliation planes and associated stretching lineations in anastomosed mylonite belts. Abstracts of T.S.G. Annual Meeting Oxford. 1p.
- Carreras, J. y Casas, J.M. (1987): On folding and shear zone development: a mesoscale structural study on the transition between two different tectonic styles. *Tectonophysics*, 135: 87-98.
- Carreras, J., & Garcia-Celma, A. (1982): Quartz c-axis fabric variation at the margins of a shear zone developed in schists from Cap de Creus (Spain). *Acta Geol. Hisp.* 17:137-149.
- Carreras, J. y Losantos, M. (en prensa): Introducció a la geologia de Cap de Creus. Llibre homenatge Dr. Faura i Sans. Servei Geològic de Catalunya.
- Carreras, J. y Santanach, P. (1973): Micropliegues y movimientos en los cizallamientos profundos del Cabo de Creus (prov. de Gerona, España). *Estudios Geol.*, 29: 439-450.
- Corbella, M. (1990): Estudi metalogenètic del camp pegmatític del Cap de Creus. Tesis Lic. Univ. Barcelona (ined.): 317 p.
- Damm, K. W., Hamon, R. S., Heppner, P. M. y Dornsiepen, U. (1992): Stable isotope constraints on the origin of the Cabo de Creus garnet-tourmaline pegmatites, Massif des Alberes, Eastern Pyrenees, Spain. *Geol. Jour.*, 27:75-86.
- Druguet, E. (1992): Petrologia del complex migmatític de l'àrea de la Punta dels Furallons (Cap de Creus). Tesis Lic. Univ. Barcelona (ined.): 235 p.
- García, A. (1983): C- axis and shape fabrics in quartz mylonites of Cap de Creus (Spain); their properties and development. Ph. D. thesis, Institute of Earth Sciences, University of Utrecht. 130 p.
- Hansen, E. (1971): *Strain facies*, Springer Verlag, Berlin. 208 p.
- Myers, J. S. (1978): Formation of banded gneisses by deformation of igneous rocks. *Precambrian Res.*, 6: 43-64.
- Norton, M. (1982): The kinematic and microstructural development of some shear zones. Unpubl. Thesis. Imperial College, London. 189 p.
- Orta, J. M. (1973): Estudio petrológico y estructural del area pegmatítica del litoral septentrional de la Península del Cabo de Creus entre Cala Taballera y Cala Portaló. Tesis Lic. Univ. Barcelona (ined.): 67 p.
- Passchier, C. W., Myers, J. S. y Kröner, A. (1990): *Field Geology of High-grade Gneiss Terrains*. Springer, New York.
- Ramírez, J. (1983): Zonació metamòrfica de les roques metapelítiques i metapsamítiques del litoral nord del Cap de Creus (Port de la Selva- Cala Taballera). *Rev. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 36: 7 - 24.

*Recibido el 3 de Diciembre de 1992; aceptado el manuscrito  
revisado el 17 de Noviembre de 1993.*