

Cataclasis relictas en los mármoles de alta presión del complejo de Samaná, Noreste de la República Dominicana

I. Rodríguez⁽¹⁾, F. J. Fernández⁽¹⁾, J. Escuder-Viruete⁽²⁾ y A. Pérez-Estaún⁽³⁾

(1) Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo, España.
UO234195@uniovi.es, brojos@geol.uniovi.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. España.
j.escuder@igme.es

(3) Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" CSIC C/ Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona España.

RESUMEN

Imágenes de catodoluminiscencia fría (CCL) han revelado microestructuras cataclásticas relictas en mármoles y calco-esquistos de las unidades de más alta presión del complejo de Samaná. El tamaño de grano de estas microestructuras presenta una distribución auto-similar de tipo potencial con una ruptura de pendiente en $\log(r_i)=1.7$. La fracción de mayor tamaño ($1.7 < \log(r_i) < 2.4$) presenta una dimensión fractal $D_2=2.43$ en las microestructuras de calcita de las muestras de la unidad de Punta Balandra y $D_2=2.72$ en la unidad de Santa Bárbara. Ambos valores están dentro de los valores habituales de las cataclasitas carbonatadas y tienen ajustes lineales de $R^2=0.95$ y 0.93 respectivamente. Sin embargo, la fracción de tamaño fino ($0.9 < \log(r_i) < 1.7$) se caracteriza por $D_1 < 1$, por debajo del rango fractal de las distribuciones de tamaño de grano para las fábricas cataclásticas puras, aun presentando un mejor ajuste.

Microestructuras como superficies de disolución, cantos interpenetrados y el mayor redondeamiento y menor irregularidad en los bordes de grano de la fracción fina indican que el *creep* de disolución-precipitación dominó tras la cataclasis. La reducción del tamaño de grano, la caída de los esfuerzos diferenciales tras el proceso cataclástico y la alta presión de fluidos, proporcionaron unas condiciones favorables para el *creep* de disolución-precipitación. La transición del flujo cataclástico al *creep* de disolución-precipitación fue escala-dependiente y homogeneizó la fracción de grano fina. Consecuentemente, la ruptura de pendiente entre D_1 y D_2 es interpretada como un registro en la distribución de tamaños de grano producido por un cambio en el mecanismo de deformación dominante.

Palabras clave: Cataclasis, dimensión fractal, mecanismos de deformación, metamorfismo de alta presión.

Relict cataclasis in the high-pressure marbles of the Samaná complex, Northeast Dominican Republic

ABSTRACT

Cold-cathodoluminescence (CCL) images have unmasked relict cataclastic microstructures in marbles and calc-schists of the higher-pressure units of the Samaná complex. The grain size of the cataclastic microstructures always has a self-similar distribution of power law type, with a slope break at $\log(r_i)=1.7$. The large grain size fraction ($1.7 < \log(r_i) < 2.4$) is characterized by fractal dimension $D_2=2.43$ in the calcite-microstructures of the Punta Balandra unit and $D_2=2.72$ in the Santa Bárbara unit. Both D-values are within the usual range of the carbonate-cataclasites and they are significant with the linear correlation of $R^2=0.95$ and 0.93 , respectively. However, the finer grain size fraction ($0.9 < \log(r_i) < 1.7$) is characterized by $D_1 < 1$ and this grain-size distribution is beyond the fractal-range for pure cataclastic-fabric, even though it has better fit power-law distribution.

Microstructures such as dissolution-surfaces, interpenetrated particles and the higher roundness and lower irregularity of the boundary grain from fine fraction indicate that dissolution-precipitation creep was dominant after cataclasis. Clast size and stress reduction after cataclasis and the high fluid pressure provided favourable conditions to allow dissolution-precipitation creep. Transition from cataclastic flow to dissolution-precipitation creep was scale-dependent and it tended to homogenize and reduce the finer grain size frac-

tion. Consequently, the slope break between D_1 and D_2 is interpreted as a record in the grain size distribution produced by a change in the dominant deformation mechanism.

Key words: cataclasis, deformation mechanisms, fractal dimension, high-pressure metamorphism.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

The shape-fabric and grain-size distribution of masked cataclastic microstructures found in marbles and calc-schists of the high-pressure Samaná complex have been analyzed. Cataclastic deformation in marbles is an unusual process at high-depth conditions (Turner et al., 1954; Griggs et al., 1960; Spiers, 1982; Rutter, 1976, 1983; Rutter and Brodie, 1992; Burkhard, 1993; Ferrill et al. 2004). Since Fernández et al. (in this volume) such anomalous deformation conditions have been analyzed, the main target of this study has been to define the relict cataclastic imprints and their effect on the subsequent composite tectonic-fabric formed during the exhumation and accretion of these marbles in the northeastern border of the Hispaniola Island (Fig. 1). These cataclastic microstructures are only observed by optical microscope, using cold cathodoluminescence (CCL) images (Fig. 2). Geometrical characteristics of these microstructures show patterns that will be compared with patterns of the same microstructures observed using conventional optical microscopy (OM). The objective of this analysis is to identify which fabric patterns are attributed to cataclastic deformation and which records of tectonic fabric are attributed to other overlap deformation mechanisms.

Detailed petrological studies of the basic and ultrabasic blocks from the highest-pressure units, Punta Balandra and Santa Bárbara (Fig. 1), show that microstructures occurred in ductile conditions and developed blastomylonitic F_2 -fabrics (Figs. 3, 4). However, some dissolution-precipitation patterns seem to have been formed prior to the blastomylonitic fabrics. After analyzing cathodoluminescence images, it has been possible to find other microstructures that reveal relict cataclastic microstructures (Figs. 5, 6, 7).

CCL-images have been analyzed in order to obtain the basic parameters of grain-size distributions (GSD). The GSD-diagrams have similar patterns in the samples of Punta Balandra and Santa Bárbara units and show a normal distribution within the same range of grain size. All the samples present three grain-fractions (Fig. 9), corresponding to the populations of the phenoblasts and hosted grains of calcite (p.f.), the recrystallized grains by boundary migration (f.f.2) and the finer grain fractions (f.f.1).

The fractal dimension- D , which characterizes a GSD, is obtained as the slope of a $\log(\text{frequency})/\log r_i$ plot (Figs. 10, 11). The grain size of the microstructures always has a self-similar distribution of the power law form with a slope break at $\log(r_i)=1.7$. The large grain-size fraction ($1.7 < \log(r_i) < 2.4$) is characterized by fractal dimension $D_2=2.43$ and 2.72 in the calcite-microstructures of the Punta Balandra and Santa Bárbara units respectively, and they are within the usual range of the carbonate-cataclasis (i.e. Storti et al., 2003; Billi, 2007). However, the finer grain size fraction ($0.9 < \log(r_i) < 1.7$) is characterized by $D_1 < 1$ and this grain-size distribution is beyond the fractal-range for pure cataclastic-fabric, even though it also has good fit to a power-law.

Paradoxically, the large grain-size fraction of the tectonic fabrics preserves a D_2 typically found in other cataclastic-fabrics of carbonate rocks, even though they do not have clearly preserved cataclastic-microstructures. However, the D_1 of the finer fraction distribution is beyond the fractal-range, even though the relicts of cataclasis have been found within this grain-size fraction (Fig. 7). That contradiction is explained because the GSD of the finer fraction is formed by the superposition of scale-dependent mechanisms of deformation. Thus, the clast fragmentation and stress reduction after cataclasis might allow water to come from metasomatic processes after eclogitization (Catlos and Sorensen, 2003) and provided the ideal conditions for high-pressure/low temperature dissolution-precipitation creep (i.e. Wassmann and Stöckhert, 2013). Then, later cataclastic processes of grain-size refinement, such as comminution and grinding, together with dissolution-precipitation creep, might have homogenized the grain size of the finer fraction. Because of this, the finest grain size was presumably dissolved and the roundness and package of the resultant calcite-fabric might also have increased differentially and in a scale-dependent form. In order to test this hypothesis, a shape parameter (S) has been used to evaluate the irregularity of the grain boundary (Fernández et al., 2005). S ranges between 0, if the boundary grain is extremely irregular, and 1, if the boundary grain is a circumference. S is showing differences between the values obtained in CCL-images and OM-images (Figures 12, 13). Because S is a scale-dependent parameter, the different populations of grains detected in the GSD-diagrams (Fig.9) have been plotted. Tectonic fabrics of OM-images show higher boundary-irregularity than fabrics of CCL-images, in the four differentiated populations of grains. However, the S -values for f.f.2-fraction in both images are in the range 0.6-0.7. The variation of S respect to grain size is slightly higher in the finer fractions of the CCL-images than the OM-images (Fig. 13), whereas it is lower in the coarser fractions. In addition, ellipticity increases with grain-size enlargement and the tectonic fabrics of the Santa Bárbara unit record larger ellipticities than the tectonic-fabrics of the Punta Balandra (Fig. 12).

Based on this GSD analysis, we can conclude that D_1 -values from bi-log plots reflect the overlap of scale-

*dependent deformation mechanisms that produced the refinement of the grain size in the tectonic fabric. The break slope between D_1 and D_2 defines the grain-size in GSD where the shape fabric has a pattern that is defined by the cataclastic process and defined by the D_2 -values. The change in the dominant deformation process could be induced by clast size reduction after cataclasis, and high fluid pressure may have provided adequate conditions for the dissolution-precipitation creep to begin. Finally, the increase of differential stress during exhumation disabled the dissolution-precipitation creep and facilitated plastic deformation (Fernández *et al.*, in this volume) which developed the final tectonic-fabrics recorded in the marbles and calc-schists of the high-pressure Samaná complex during their exhumation.*

Introducción

En este trabajo se identifican y describen las microestructuras cataclásticas relictas desarrolladas en mármoles y calco-esquistos del complejo de Samaná, en el extremo NE de la Isla de la Española (República Dominicana), en condiciones de alta presión y moderada temperatura. Las condiciones de deformación cataclástica de los mármoles son muy restrictivas en general y absolutamente anómalas si se producen a gran profundidad (Turner *et al.*, 1954; Griggs *et al.*, 1960; Spiers, 1982; Rutter, 1976, 1983; Rutter y Brodie, 1992; Burkhard, 1993; Ferrill *et al.* 2004). Fernández *et al.* (en este volumen) interpretan las condiciones de deformación concretas a través de los registros que los mecanismos de deformación, activos durante la exhumación de estos mármoles desde condiciones de alta presión, dejaron en las microestructuras de su fábrica tectónica. Como método de análisis, las fábricas de forma y de la distribución de tamaño de grano (GSD) de las microestructuras relictas cataclásticas se han medido a partir de las imágenes de catodoluminiscencia fría (CCL) donde se han identificado. Estas fábricas se han comparado con las fábricas que se obtienen en imágenes tomadas en la misma área por microscopía óptica convencional y donde no se observan las fábricas relictas cataclásticas porque quedan enmascaradas por el efecto de la disolución-precipitación y de la deformación plástica posteriores. Estas microestructuras se encontraron exclusivamente en las unidades del complejo de Samaná que registraron un metamorfismo de la facies de las eclogitas y de los esquistos azules (p.ej. Escuder-Virueite *et al.*, 2011a, b, c). Las características geométricas de estas microestructuras definen unos patrones de su fábrica tectónica que se comparan con las mismas microestructuras cuando se observan por microscopía óptica convencional (OM). El objeto de este trabajo es identificar los patrones de las fábricas que se pueden atribuir a la deformación cataclástica y qué registros en la forma y en la GSD de la fábrica tectónica son atribuibles a otros mecanismos de deformación superpuestos, comparando las imágenes de la misma área obtenidas por los dos tipos de microscopía.

La GSD permite caracterizar los procesos de fragmentación auto-similares (p.ej. Turcotte, 1986), como es la cataclasis, y diferenciarlos de los mecanismos que producen reducción del tamaño de grano por procesos escalo-dependientes, como es la recristalización dinámica, donde los cambios de la energía interna son proporcionales a los cambios en el área de borde de grano (p.ej. Austin y Evans, 2007). Las rocas de falla fragmentadas por procesos cataclásticos presentan una GSD que se ajusta a funciones potenciales y se caracteriza por tener una dimensión fractal (D). Aunque D mide la fragilidad del material fragmentado y su valor debe aproximarse a 3 para que el volumen del material fragmentado sea próximo al volumen del material del que procede, los valores estimados en cataclasis de distintos orígenes varía entre 1.6 y 5.5 (p.ej. Turcotte, 1986; Blenkinsop, 1991; Storti *et al.*, 2003; Keulen *et al.*, 2007). La GSD en un rango de tamaños de 0.0005-16 mm procedentes de rocas de falla carbonatadas deformadas por procesos cataclásticos tiene valores de D que varían en un menor rango entre 2-3.5 (Storti *et al.*, 2003; Billi *et al.*, 2003; Agosta y Aydin, 2006; Billi, 2007). Una GSD con una $D > 3$ significa que el empaquetado de los fragmentos está interpenetrado (Stacy y Sammis, 1992; Heilbronner y Keulen, 2006). Además, las cataclasis pueden contener distinta proporción de clastos de gran tamaño con respecto a los pequeños clastos de la matriz, de manera que el valor de D es mayor en cataclasis con menor proporción de matriz (p.ej. Blenkinsop, 1991; Billi, 2007).

Frecuentemente en las fábricas de las rocas cataclásticas se obtienen patrones de GSD que ajustan a dos valores de D (D_1 y D_2) a partir de un determinado tamaño de grano (r_k), incluso en fábricas cataclásticas puras (p.ej. Keulen *et al.*, 2007; Kruhl, 2013). En estos casos el patrón de GSD indica que el proceso de fragmentación fue escalo-dependiente. El mayor valor (D_2) caracteriza la fragmentación pura, mientras que el menor valor (D_1) caracteriza el proceso de molienda y compactación posterior al proceso de fragmentación inicial. Sin embargo, la fábrica tectónica que presentan los mármoles y calco-esquistos de este estudio son el resultado de la superposición de al

menos dos mecanismos de deformación diferentes sobre la fábrica cataclástica inicial (Fernández *et al.*, en este volumen). La deformación cataclástica provocó la caída de los esfuerzos diferenciales y facilitó la entrada de fluidos para que los mármoles se deformaran por *creep* de disolución-precipitación y posteriormente se produjera la recuperación de los esfuerzos diferenciales en un contexto de exhumación tectónica forzada (p.ej. Mancktelow, 1995) de las unidades de alta presión. El estudio comparativo de las GSD y de las fábricas tectónicas de forma en imágenes-CCL y en imágenes-OM ha permitido discutir e interpretar estas fábricas tectónicas complejas.

Contexto geológico

La Española es una isla perteneciente al archipiélago de las Antillas Mayores que definen el borde convergente en el que la placa litosférica norteamericana subduce bajo el arco caribeño (p.ej. Joyce, 1991; Draper *et al.*, 2004; Escuder-Virueite *et al.*, 2013). En el extremo NE de la Española aflora el complejo de alta *P* de Samaná, formado por series de rocas metasedimentarias, ofiolíticas y melanges tectónicas en las que se distingue una secuencia metacarbonatada que incluye bloques exóticos eclogíticos y ultrabásicos

(p.ej. Escuder-Virueite *et al.*, 2011a, b, c). En el borde E de la península de Samaná, tres unidades se superponen tectónicamente formando una secuencia inversa metamórfica (Figura 1). De manera que la unidad de Punta Balandra con un metamorfismo eclogítico se superpone sobre los calcoesquistos de Santa Bárbara, cuyas paragénesis indican que sólo alcanzaron la facies de los esquistos azules con epidota. Hacia el N la unidad de Santa Bárbara se superpone sobre los Mármoles del Rincón, que registran un menor grado metamórfico. La superposición produce un apilamiento tectónico de unos 10 km de espesor. En la estructura del complejo de Samaná se pueden diferenciar a escala regional al menos cinco eventos tectono-metamórficos (Escuder-Virueite *et al.*, 2011b). La primera fase de deformación regional (F_1) está relacionada con la subducción de la placa litosférica Norteamericana desde el Eoceno hasta el Oligoceno superior y produce un metamorfismo progrado de alta *P* (M_1) que alcanzó la facies de esquistos azules y de eclogitas. Se reconoce sólo una foliación relictas S_1 como alineación de las inclusiones en los fenoblastos que se forman en esta fase de deformación. La segunda fase de deformación (F_2) está relacionada con la exhumación de las unidades de mayor grado y la construcción de una cuña de acreción. Se caracteriza porque todas las unidades implicadas desarrollan

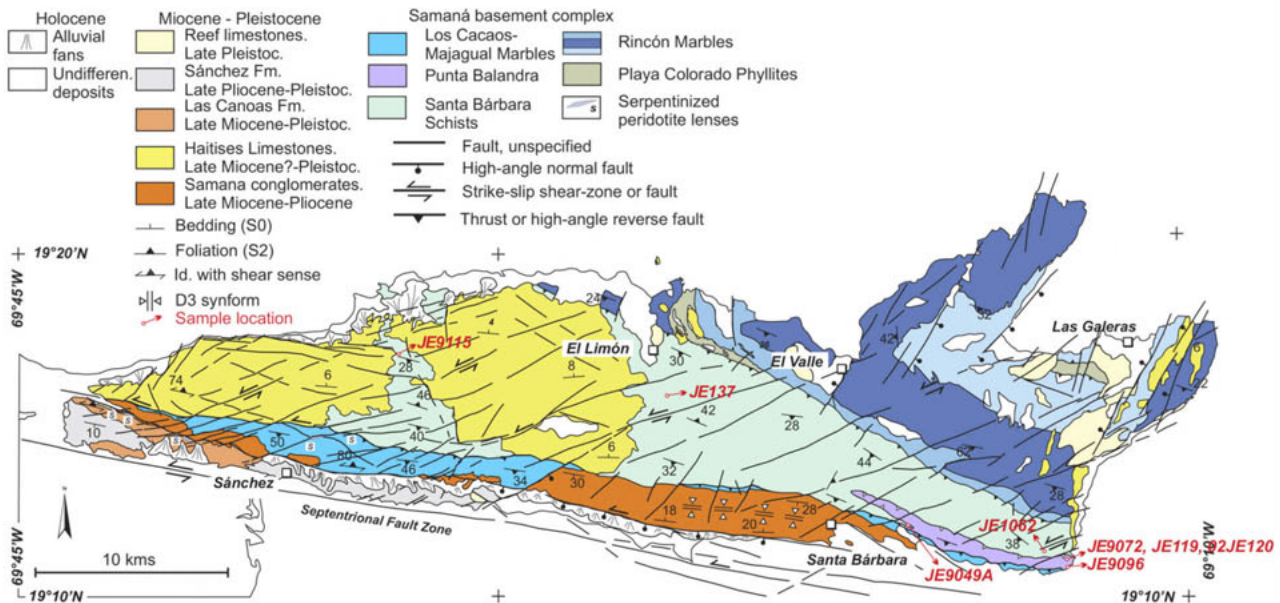


Figura 1. Mapa geológico de la península de Samaná incluyendo la localización de las muestras empleadas en este trabajo (Modificado de Escuder-Virueite *et al.*, 2011b). **Figure 1.** Geological map of the peninsula of Samaná including the location of the samples used in this study (After Escuder-Virueite *et al.*, 2011 b).

una foliación fuertemente heterogénea y de tipo blastomilonítico (S_2), cuyo resultado final es una fábrica tectónica compleja donde se superponen varios mecanismos de deformación (Fernández *et al.*, en este volumen). Aunque la foliación S_2 se reequilibra durante un metamorfismo retrógrado (M_2) en facies esquistos azules, el comienzo del desarrollo de la foliación debe situarse en M_1 , momento en el que se inicia el proceso de exhumación. Posteriormente, durante el Mioceno inferior, la cuña de acreción se reequilibra en la facies esquistos verdes (M_3). La fase de deformación F_3 es una deformación no penetrativa que produce pliegues abiertos subverticales de escala kilométrica. Las relaciones microestructurales indican que F_3 se produjo en condiciones de transición frágil-dúctil, por debajo de la facies de los esquistos verdes. La fase de deformación F_4 se relaciona regionalmente con una deformación extensional tardía registrada por fallas y zonas de cizalla y un plegamiento de plano axial sub-vertical y ejes sub-horizontales. Finalmente, la fase de deformación F_5 está asociada principalmente a la deformación que se produce como consecuencia del movimiento lateral izquierdo de una falla de desgarre cuyo trazado se prolonga más allá de la isla Española y que limita la zona muestreada en este trabajo por el Sur, la falla Septentrional (Figura 1). Esta deformación F_5 también se asocia con el sistema de fallas inversas producidas durante la tectónica de convergencia oblicua activa desde el Mioceno hasta la actualidad.

Este estudio se ha realizado sobre las fábricas tectónicas desarrolladas durante la fase de deformación

regional F_2 en los mármoles y calco-esquistos de las unidades de Punta Balandra y de Santa Bárbara (Figura 1). Estas son las únicas unidades tectónicas acrecionadas en la península de Samaná cuyas fábricas tectónicas permiten observar las microestructuras relictas cataclásticas por microscopía-CCL.

Metodología

Se han estudiado 4 muestras correspondientes a la unidad de Punta Balandra (JE9096, JE9072, JE119 y 02JE120), y 4 muestras de los Esquistos de Santa Bárbara (JE1062, JE9049A, JE137 y JE9115). Todas las muestras se localizan en distintos niveles estructurales de las dos unidades (Figura 1). Las láminas delgadas se prepararon sobre muestras orientadas y fueron cortadas en secciones XZ, paralelas a la orientación mineral que define la fábrica tectónica F_2 de tipo plano-lineal, siguiendo la foliación. Las condiciones de presión y temperatura en las que se desarrolló la fábrica tectónica F_2 de las muestras estudiadas junto con los registros paleopiezométricos y las características generales de las fábricas tectónicas se detallan en la (Tabla I).

Métodos analíticos

Las imágenes-OM fueron realizadas con una cámara digital montada sobre el ocular de un microscopio petrográfico. Para cada muestra se adquirieron una

Unid.	Muestra	Tamaño de grano			S	Paleoesfuerzo		M_1		M_2	
		h.g.	ff.1	ff.2		a	b	P	T	P	T
UPB	JE9096	50±17	8±2	19±5	0.56		139±15	2.0±0.1	475±25	1.4±0.2	515±15
UPB	JE9072	not hg	9±1	20±3	0.58		173±48	?	?	1.5±0.1	475±25
UPB	JE119	53±15	9±2	19±6	0.71	350±31	158±38	2.0±0.1	475±25	1.4±0.2	515±15
UPB	02JE120	49±21	8±1	15±4	0.62	?	?	?	?	?	?
ESB	JE1062	55±14	9±2	20±6	0.67	200±31	79±20	1.6±0.1	375±10	1.2±0.1	400±10
ESB	JE9049A	55±18	8±2	17±3	0.58		?	?	?	?	?
ESB	JE137	64±14	8±2	18±4	0.58		?	?	?	?	?
ESB	JE9115	50±10	8±2	18±5	0.67		?	?	?	?	?

Tabla 1. Características microestructurales de las muestras analizadas en este trabajo. Distribución de tamaños de grano: tamaño de grano medio de la fracción más fina (*ff.1*), de la fracción fina correspondiente a los granos recristalizados por migración de borde de grano (*ff.2*) y de la fracción de los blastos de calcita (*h.g.*). Parámetro de forma (*l*). Valores de paleoesfuerzo calculados por la incidencia de maclado (*a*) o utilizando la *ff.2* (*b*). Condiciones *P-T* entre el metamorfismo M_1 y M_2 (Escuder-Viruet *et al.*, 2011a, c). Las unidades de tamaño de grano, paleoesfuerzo, *P* y *T* están en μm , MPa, GPa y $^\circ\text{C}$ respectivamente.

Table 1. Microstructural features of the studied samples. Grain size is calculated for the finer fraction (*ff.1*), the fraction of grains recrystallized by grain boundary migration (*ff.2*) and for the host grains (*h.g.*). Shape parameter (*l*). Palaeo-stress data calculated by twinning incidence (*a*) or by using *ff.2* (*b*). *P-T* conditions of metamorphism M_1 and M_2 after Escuder-Viruet *et al.*, (2011a, c). Grain size, palaeostress, *P* and *T* is given in μm , MPa, GPa and $^\circ\text{C}$ respectively.

cascada de entre 4 y 9 imágenes para posteriormente ensamblarlas en mosaico. Se montaron mosaicos de imágenes tomadas con objetivo x5 aumentos, dentro de las cuales se trabajaron áreas más pequeñas con fotomontajes de imágenes tomadas con objetivo x10 aumentos. Además, en 6 muestras se realizaron los mosaicos de imágenes-CCL donde se observaron las microestructuras relictas cataclásticas. Estas imágenes se obtuvieron con un microscopio óptico equipado con un equipo de catodoluminiscencia *Technosyn Cold Cathodoluminescence CL8200 MK5* especialmente adecuado para captar la luminiscencia que produce el Mn en las rocas carbonatadas. El equipo trabajó en vacío, con una fuente de intensidad de 500-600 μA y un voltaje de 15 keV de aceleración. Los mosaicos fueron ensamblados utilizando el programa *Photoshop CS4 (64 bits)* de *Adobe*. Con este programa también se ajustó el contraste más adecuado de las imágenes-CCL para la diferenciación de los bordes de los cristales de calcita de luminiscencia diferente. Generalmente, los cristales de calcita que tienen contenido alto de Fe y/o bajo de Mn, tienen luminiscencia baja (Figura 2; Long y Agrell, 1965; Sommer, 1972), aunque las variaciones de la luminiscencia del carbonato pueden venir determinadas por cambios en el quimismo y/o pH del fluido mineralizante durante los procesos diagenéticos de la roca carbonatada (Sommer, 1969). La luminiscencia de tonalidad verdosa puede ir asociada a la presencia de

aragonito (Marshall, 1988), aunque en las imágenes analizadas se corresponde con burbujas y/o con cirrones. La materia orgánica a veces también produce luminiscencias de intensidad variable. En este trabajo encontramos imágenes-CCL en la que los cambios de luminiscencia están relacionados con el desarrollo de microestructuras cataclásticas, lo que sugiere que el proceso cataclástico se produjo en presencia de fluido.

Las imágenes adquiridas permiten discriminar un rango de tamaños de grano de radio (r) $400 \mu\text{m} > r > 2 \mu\text{m}$. Los bordes de grano de las microestructuras analizadas se delinearon manualmente con el objeto de evitar confundir bordes de grano con bordes de planos de macla (Fernández *et al.*, 2011). Se ha utilizado el software libre de procesamiento de imágenes *ImageJ* (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) para obtener los parámetros básicos del análisis GSD, tales como el área del grano (A_i), perímetro (P_i), centroide y ejes mayor y menor de la elipse mejor inscrita, así como su orientación. Siempre se utilizaron imágenes de fábricas con resolución suficiente como para poder dibujar la irregularidad de borde de grano y las fracciones de tamaño de grano más finas de forma precisa.

Los diagramas-GSD muestran la frecuencia en porcentajes de número de granos y de área que representa un determinado rango de tamaño respecto a la población total analizada. Aunque se podrían obtener microestructuras simples con una población de granos que mostrasen una distribución normal, siempre se han encontrado distribuciones complejas formadas por varias poblaciones de distribución normal. Se han podido diferenciar tres poblaciones de granos. La población de fenoblastos (*p.f.*) se identifica en los diagramas GSD como la distribución normal en la que el porcentaje de área y el de número de granos es similar. Además aparecen las fracciones de grano finas (*f.f.*) en las que encontramos distribuciones normales con frecuencias de número de granos mayores que el porcentaje de área que representan y fracciones de grano gruesas (*f.g.*) en las que el porcentaje del área es mayor que el del número de granos y que representan a los clastos de calcita que han sufrido crecimiento por deformación plástica intracrystalina durante el desarrollo de la fábrica tectónica. Para cada distribución normal se calculó el tamaño medio (media lineal) y su variación como desviación estándar. Se calculó también el radio equivalente y además se caracterizó cada fracción con un parámetro de forma. Este parámetro permite la cuantificación de la irregularidad del borde de grano (Fernández *et al.*, 2005) y su valor puede variar entre 0 y 1. Los valores de S próximos a 0 representan bordes de grano muy irregulares, mientras que los valo-

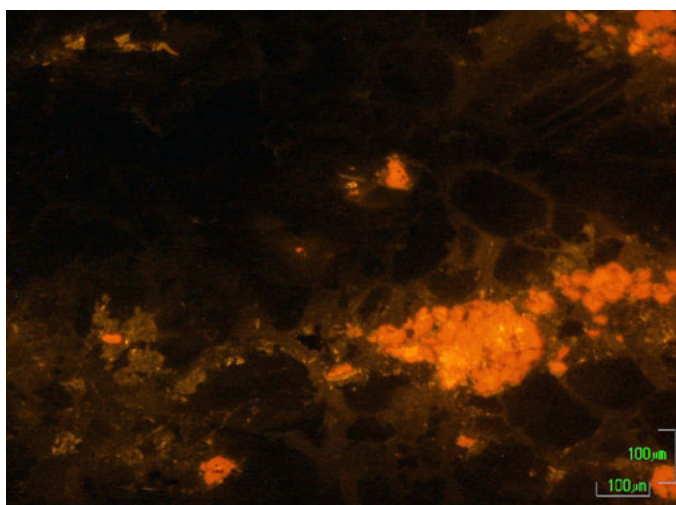


Figura 2. Variaciones de luminiscencia del carbonato de la muestra JE1062. Baja luminiscencia correspondiente a cristales de calcita, luminiscencia media del cemento carbonatado y luminiscencia muy alta provocada por la acumulación de material opaco.

Figure 2. Carbonate luminescence variations of simple JE1062. Low luminescence corresponding to calcite crystals, medium luminescence of carbonate-cement and very-high luminescence caused by opaque material accumulated.

res que tienden a 1 corresponden a granos cuya sección es una circunferencia. En el análisis de la fábrica de forma se ha proyectado el parámetro S respecto a la elipticidad que se ha medido como la relación axial de la elipse inscrita en cada grano. Este diagrama muestra los cambios de forma de grano de las diferentes fracciones identificadas en los diagramas-GSD y se ha utilizado para interpretar, junto con las microestructuras observadas los patrones de GSD encontrados. Como el parámetro S es escalo-dependiente también se ha proyectado este parámetro respecto al tamaño de grano (Fernández *et al.*, 2005).

Además se ha utilizado la fractalidad para cuantificar la fragmentación de las fábricas relictas cataclásicas. Cuando la variación de un parámetro con respecto a otro se ajusta a una función potencial, el exponente de la función define su dimensión fractal (D) (Epstein, 1947). La dimensión fractal- D que caracteriza a las GSD de las fábricas tectónicas se obtiene fácilmente como la pendiente del ajuste lineal del diagrama $\log(\text{frecuencia})/\log r_i$ (o diagrama bi- \log). Los tamaños de grano representados por su radio equivalente (r_i) se han agrupado en intervalos de $\log r_i$ de 0.1 desde el menor tamaño medido 0.3 hasta 3, lo que equivale a r_i desde 1.99 μm hasta 1000 μm respectivamente.

Resultados

La microestructura de las fábricas tectónicas F_2

Las imágenes-OM de las muestras de la unidad de Santa Bárbara (Figura 1) corresponden a fábricas tectónicas de mármoles formados por más de un 90% de calcita. Además contienen fengita, cuarzo y restos insolubles de minerales opacos. Las muestras JE9049A y JE9115 contienen además clorita y albita (Figura 3).

Los mármoles presentan una fábrica tectónica plano lineal de tipo blastomilonítico definida por fenoblastos de calcita de bordes irregulares bordeados de pequeños cristales recrystalizados (Figura 3a). Los cristales de calcita están generalmente maclados. Los sistemas de maclas delgadas y rectas, de tipo I y II (Burkhard, 1993), se superponen en ocasiones a otros sistemas de maclas más anchos e irregulares correspondientes a maclas de tipo III y IV. La irregularidad de los bordes de los fenoblastos de calcita está fuertemente condicionada por el espaciado y tipología de las maclas. En ocasiones se observa el desarrollo de una foliación oblicua definida por la forma y orientación de los fenoblastos de calcita (Figura 3b) que es consistente con un sentido de cizalla dextro

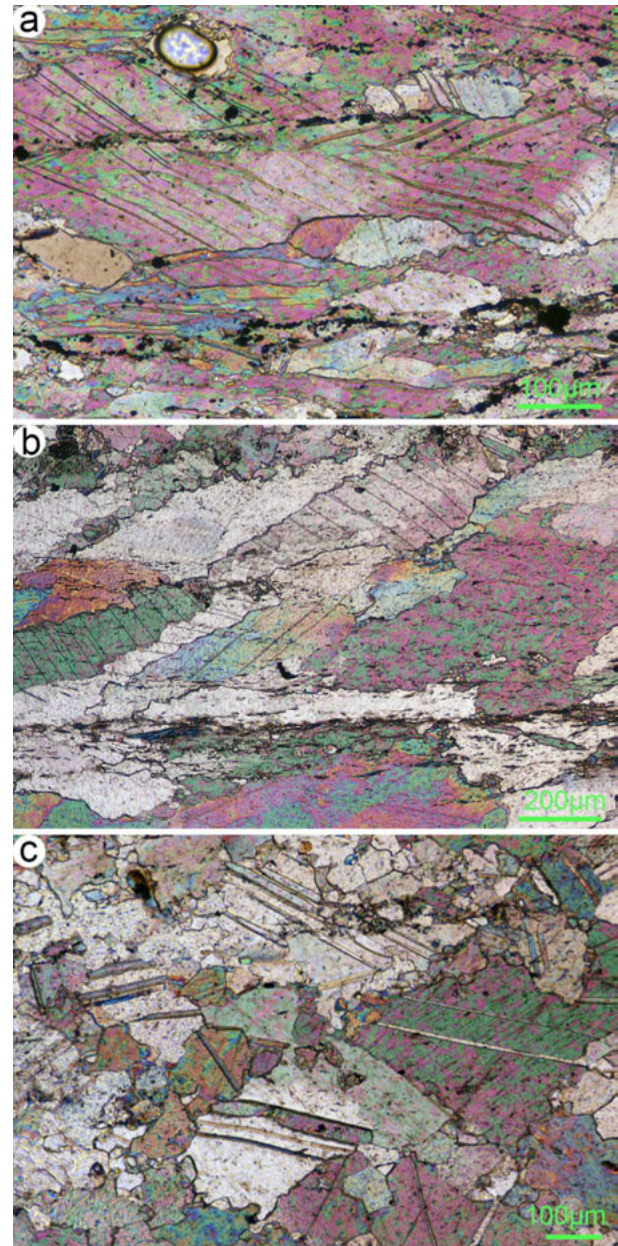


Figura 3. Microestructuras F_2 de los mármoles de la unidad de Santa Bárbara. (a) Detalle de fenoblastos de calcita de bordes irregulares bordeados de pequeños cristales recrystalizados. Fuerte concentración de minerales opacos en bandas dispuestas paralelas a la foliación principal S_2 . (Muestra JE9049A). (b) Foliación oblicua definida por la forma y orientación de los fenoblastos de calcita. Esta fábrica está sobreimpuesta a un bandeado restítico definido por la concentración de insolubles (Muestra JE9115). (c) Fenoblastos de calcita maclados con más de una tipología de macla (Burkhard, 1993) (Muestra JE1062).

Figure 3. F_2 -Microstructures of the marbles from Santa Bárbara unit. (a) Detail of calcite phenoblasts with irregular edges and surrounded by smaller recrystallized crystals (Sample JE9049A). (b) Oblique foliation defined by elongated shape and orientation of calcite phenoblasts. This fabric is overprinting a restitic foliation defined by insoluble material (Muestra JE9115). (c) Calcite-twinning lamellae in phenoblasts formed by different twin types (Burkhard, 1993) (Sample JE1062).

hacia el NNE. La muestra JE9115 presenta también inclusiones fluidas en las bandas donde se concentran los residuos insolubles de opacos. Estas inclusiones son muy escasas y sus tamaños $<2-4 \mu\text{m}$ son insuficientes para aportar datos termobarométricos fiables. La muestra JE1062 presenta algunas superficies de foliación S_2 retrabajadas por procesos de disolución tardíos, probablemente producidos durante la fase F_3 .

Las imágenes-OM de las muestras de la unidad de Punta Balandra (Figura 1) son dos mármoles (muestras 02JE120 y JE9096), un calco-esquistos (muestra JE119) y un mica-esquistos (muestra JE9072). En los mármoles y calco-esquistos la calcita representa $>70\%$ de la fábrica, mientras que en el mica-esquistos $<5\%$ modal. Cuarzo, lawsonita, granate, epidota y fengita aparecen en distinta proporción. Los opacos son escasos y se concentran en torno a restos pseudomorfo de cristales maclados o en torno a superficies de disolución F_3 tardías, como las observadas en la muestra JE119 (Figura 4). La fábrica plano-linear blastomilonítica F_2 sugiere una mayor intensidad de la deformación que la observada en las muestras de la unidad de Santa Bárbara porque el porcentaje de cristales recrystalizados es mayor y su distribución en bandas separa dominios más intensamente deformados de otros formados por agregados menos deformados que producen estructuras en manto (Figura 4b). Además la densidad del maclado es mayor y su incidencia es próxima al 100% (Figura 4c). La tipología y relación estructural entre los distintos tipos de maclas es similar a la descrita para la unidad de Santa Bárbara.

La luminiscencia en los carbonatos va asociada

fundamentalmente al contenido en Mn que produce tonos anaranjados en las imágenes obtenidas con el equipo de CL. En cambio la opacidad va asociada al contenido en Fe de los carbonatos (Sommer, 1972).

Las imágenes-CCL de las dos muestras de la unidad de Santa Bárbara (Figura 5) presentan bandas de luminiscencia alta que se disponen paralelas a los dominios de deformación composicionales que producen la foliación blastomilonítica S_2 en las imágenes de la Figura 3a y b. Sin embargo en las imágenes-CCL de la unidad de Punta Balandra los cambios de luminiscencia presentan patrones más irregulares (Figura 6). Los cambios de luminiscencia se presentan en clastos aislados de calcita poco luminiscente y de bordes irregulares y angulosos, incluidos en un cemento carbonatado luminiscente. Estas microestructuras son similares a las que se producen en las cataclasis. Todas las fábricas tectónicas de la unidad de Punta Balandra, a excepción de la de la muestra 02JE120, presentan estas microestructuras cataclásticas. Las fábricas cataclásticas se localizan en las zonas donde hay mayor reducción de tamaño de grano y se caracterizan por presentar clastos de calcita procedentes de la fragmentación, o por el desplazamiento y rotación de dos clastos de calcita contiguos (Figura 7). Comparando las microestructuras cataclásticas de las imágenes-CCL con las imágenes-OM de estas mismas fábricas (Figuras 5, 6) se puede apreciar que algunos fenoblastos de calcita que aparecen en las imágenes-OM se corresponden con las microestructuras cataclásticas de las imágenes-CCL, formadas por clastos de calcita poco luminiscentes cementados entre sí por una matriz carbonatada luminiscente. Incluso algunos fenoblastos de calcita

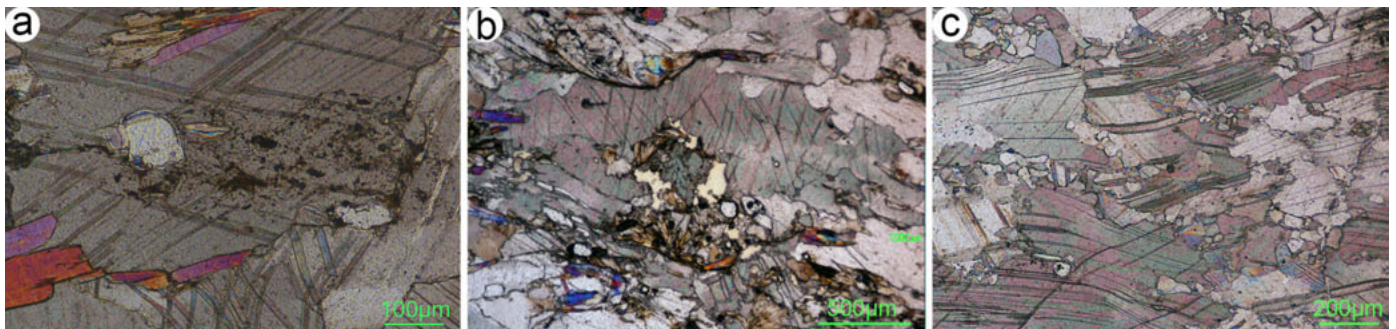


Figura 4. Microestructuras de los mármoles y calcoesquistos de la unidad de Punta Balandra. Mayor incidencia de maclado con respecto a la unidad de Santa Bárbara. (a) Opacos concentrados en torno a restos pseudomorfo (Muestra 02JE120). (b) Dominios intensamente deformados separados de otros formados por agregados de fenoblastos menos deformados (c) Cristales de calcita recrystalizados bordeando fenoblastos cuyas maclas están frecuentemente deformadas (Muestra JE9096).

Figure 4. Microstructures of the marbles and calc-schists from the Punta Balandra unit. Calcite-twins are more frequent than in samples from the Santa Barbara unit. (a) Opaque material concentrated over pseudomorphs (Sample 02JE120). (b) Domains highly deformed separated from other domains that included less deformed phenoblasts. (c) Recrystallized calcite surrounding phenoblasts where twins are mostly deformed.

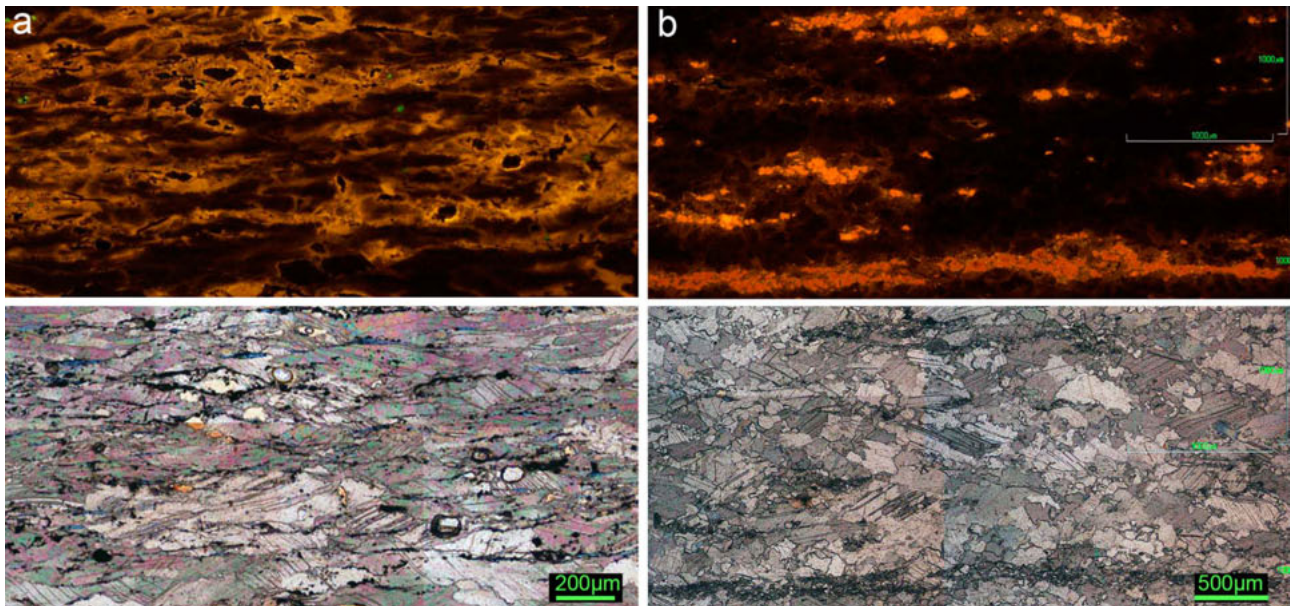


Figura 5. Imágenes-CCL de muestras de la unidad de Santa Bárbara. Las bandas de luminiscencia alta se disponen paralelas a la foliación blastomilonítica S_2 . La imagen-OM inferior cubre la misma área. (a) Dominios de diferente luminiscencia donde se distinguen los clastos de calcita poco luminiscentes poligonizados de un cemento carbonatado luminiscente (Muestra JE9049A). (b) Luminiscencia debida a superficies de disolución tardía donde se concentra gran cantidad de material insoluble (Muestra JE1062).

Figure 5. CCL-images from the Santa Bárbara unit samples. High-luminiscent bands are disposed parallelly to the blastomylonitic S_2 foliation. Lower image shows the same area. (a) Domines with different luminiscence where low-luminiscent poligonal calcite clasts are distinguished from a luminiscent carbonate-cement (b) Luminiscence induced by late dissolution surfaces where insoluble material is accumulated (Sample JE1062).

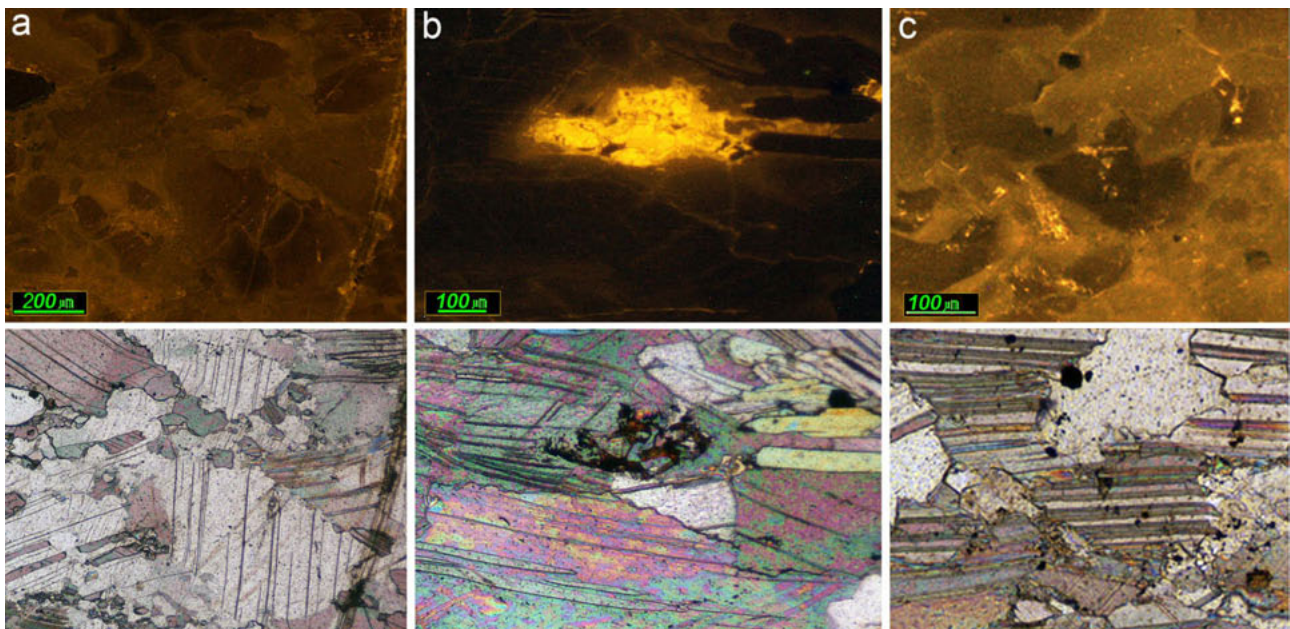


Figura 6. Imágenes-CCL de muestras de la unidad de Punta Balandra. (a) Agregados policristalinos de calcita que en microscopía óptica convencional se observan como un simple fenoblasto de calcita (Muestra JE9096). (b) Zona de alta luminiscencia coincidiendo con concentración de material opaco (Muestra 02JE120). (c) Fenoblastos de calcita, maclados en las imágenes-OM, formados por agregados policristalinos de las microestructuras cataclásticas (Muestra JE9096).

Figure 6. CCL-images from the Punta Balandra unit samples. (a) Polycrystalline aggregates of calcite which are observed as a simple phenoblast under conventional optical microscope (Sample JE9096). (b) High-luminescence zone where opaque material is accumulated (Sample 02JE120). (c) Calcite phenoblasts, which are twinned in OM-images, formed by polycrystalline aggregates of cataclastic microstructures.

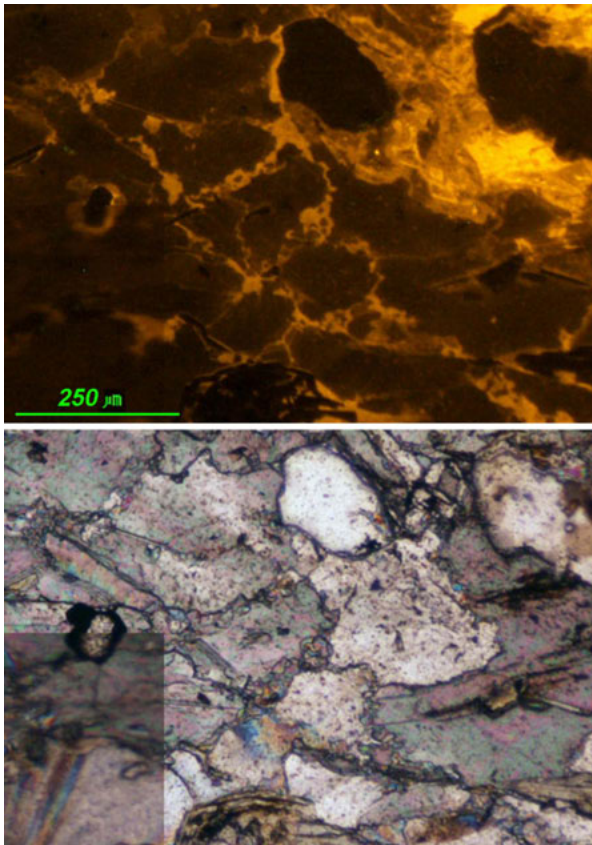


Figura 7. Microestructura cataclástica formada por clastos angulosos no luminiscentes rodeados de un cemento carbonatado luminiscente (Muestra JE119).

Figure 7. Cataclastic microstructure formed by angular clasts of non-luminescent calcite bordered by luminescent carbonate cement (Sample JE119).

maclados de las imágenes-OM, están formados por agregados policristalinos de las microestructuras cataclásticas (Figura 6c). Existe una buena correspondencia entre las zonas de concentración de opacos observadas en las imágenes-OM con zonas de las bandas de luminiscencia alta (Figuras 5, 6b). Las estructuras de disolución tardía- F_3 también muestran luminiscencia, como la que muestra la microestructura de JE1062 en la Figura 5b.

Se ha evaluado el aumento de área durante el proceso cataclástico midiendo la diferencia entre las áreas donde se han delineado clastos de calcita relictos de tamaño grande y luminiscencia baja con respecto al área de la matriz luminiscente de las microestructuras cataclásticas. Se aprecia un mayor aumento de área en las muestras de la unidad de Santa Bárbara, que varía entre el 7% y el 15% en las muestras JE9049A y JE1062, que en la unidad de Punta Balandra, que varía entre el 5% y el 6% en las muestras JE9096 y JE119, respectivamente.

También se observan algunas diferencias en los diagramas de orientación entre los agregados de calcita que definen las microestructuras observadas en las imágenes-OM con respecto a las observadas en las imágenes-CCL. La orientación de los cristales de calcita en las GSD analizadas se mide por el ángulo que forma el eje mayor de la elipse inscrita en cada calcita delineada con respecto al plano de foliación principal de la fábrica tectónica- S_2 , definidas por la distribución en bandas de cristales recrystalizados y bandas de fenoblastos. Este bandeo coincide con la orientación de los fenoblastos de calcita, salvo cuando se desarrollan foliaciones oblicuas. La orientación se ha representado en histogramas de frecuencia de orientación en intervalos de 10° grados, siendo 0° el sentido positivo del eje X y que generalmente representa la orientación de la lineación mineral NNE (Figura 8). En general, tanto las orientaciones de las imágenes-OM como las de las imágenes-CCL son simétricas respecto al plano de foliación principal- S_2 . Aunque las muestras JE9072 y JE137 analizadas sobre imágenes-OM no tienen una orientación preferente, y las muestras JE9115 y JE9049A de la unidad de Santa Bárbara tienen una desviación asimétrica producida por los planos de la foliación de cizalla oblicua que forma un ángulo de 20° con respecto a la foliación principal S_2 y que es consistente con un sentido de desplazamiento dextro de la cizalla hacia el NNE (Figura 8a). Además se ha encontrado en dos diagramas de orientación de las imágenes-CCL de la unidad de Punta Balandra un sesgo asimétrico que muestra un ángulo $\approx 10^\circ$ con respecto al plano de foliación principal- S_2 y que se corresponde con la oblicuidad que presenta en ocasiones las bandas restíticas de opacos con respecto a la foliación principal- S_2 (Figura 8b).

Análisis de la distribución de tamaño de grano (GSD) de las fábricas tectónicas F_2

La GSD de las fábricas tectónicas de las muestras analizadas (Figura 1) se ha representado en un diagrama que muestra la frecuencia con que aparece un determinado tamaño y su porcentaje de área respecto del área total. En la unidad de Punta Balandra se ha medido una población total >3000 granos y en los Esquistos de Santa Bárbara una población total >7000 granos. El tamaño de las calcitas se representa en estos diagramas como el diámetro en micras (d) de un círculo equivalente al área (A_i) del polígono que define cada borde de calcita delineada (Figura 9). Las fábricas tectónicas- F_2 se caracterizan por presentar distribuciones complejas de tamaños de grano.

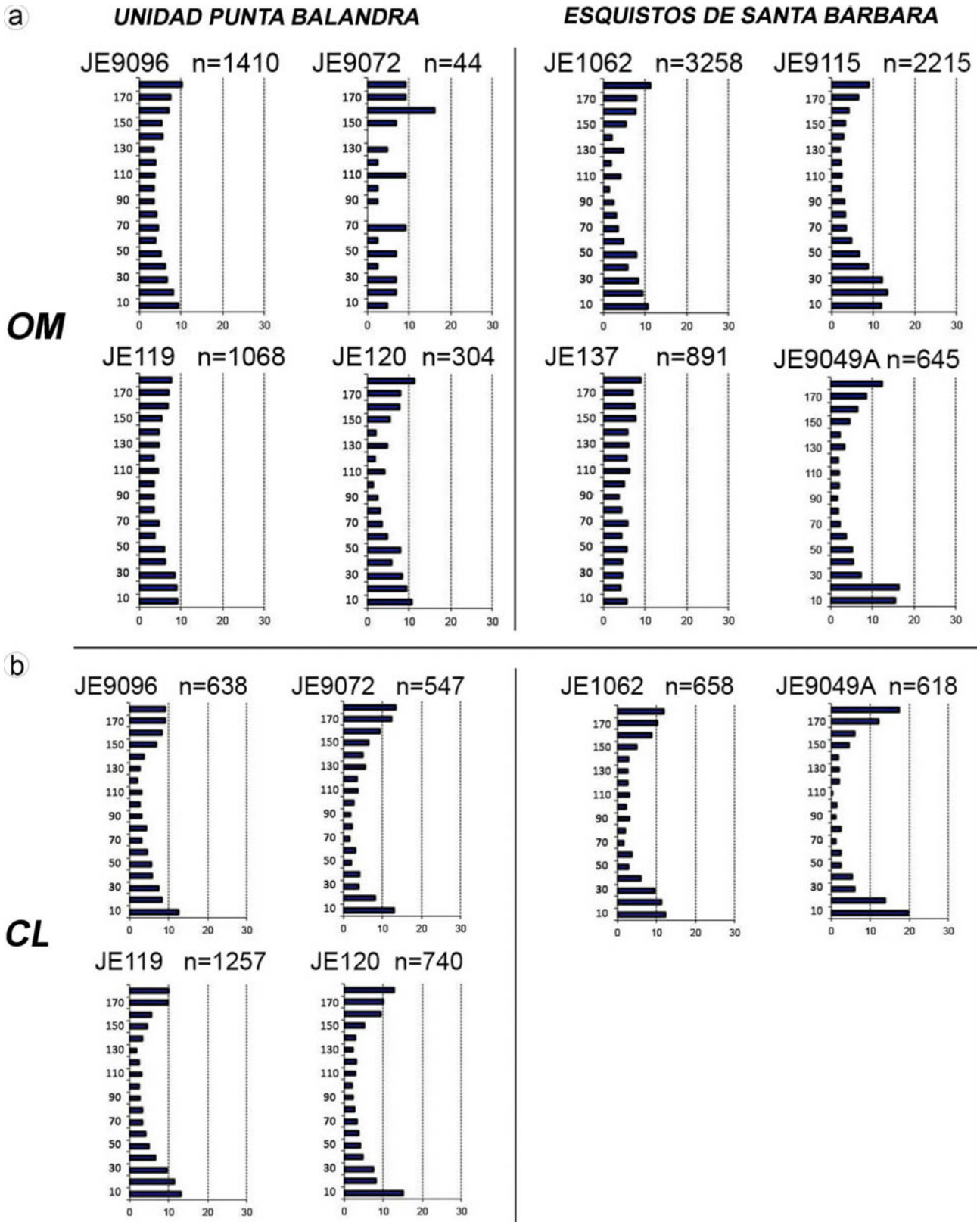


Figura 8. Histograma de frecuencia de orientación. (a) A partir de imagines-OM. (b) A partir de imagines-CCL.
Figure 8. Orientation frequency histogram. (a) From OM-images. (b) From CCL-Images.

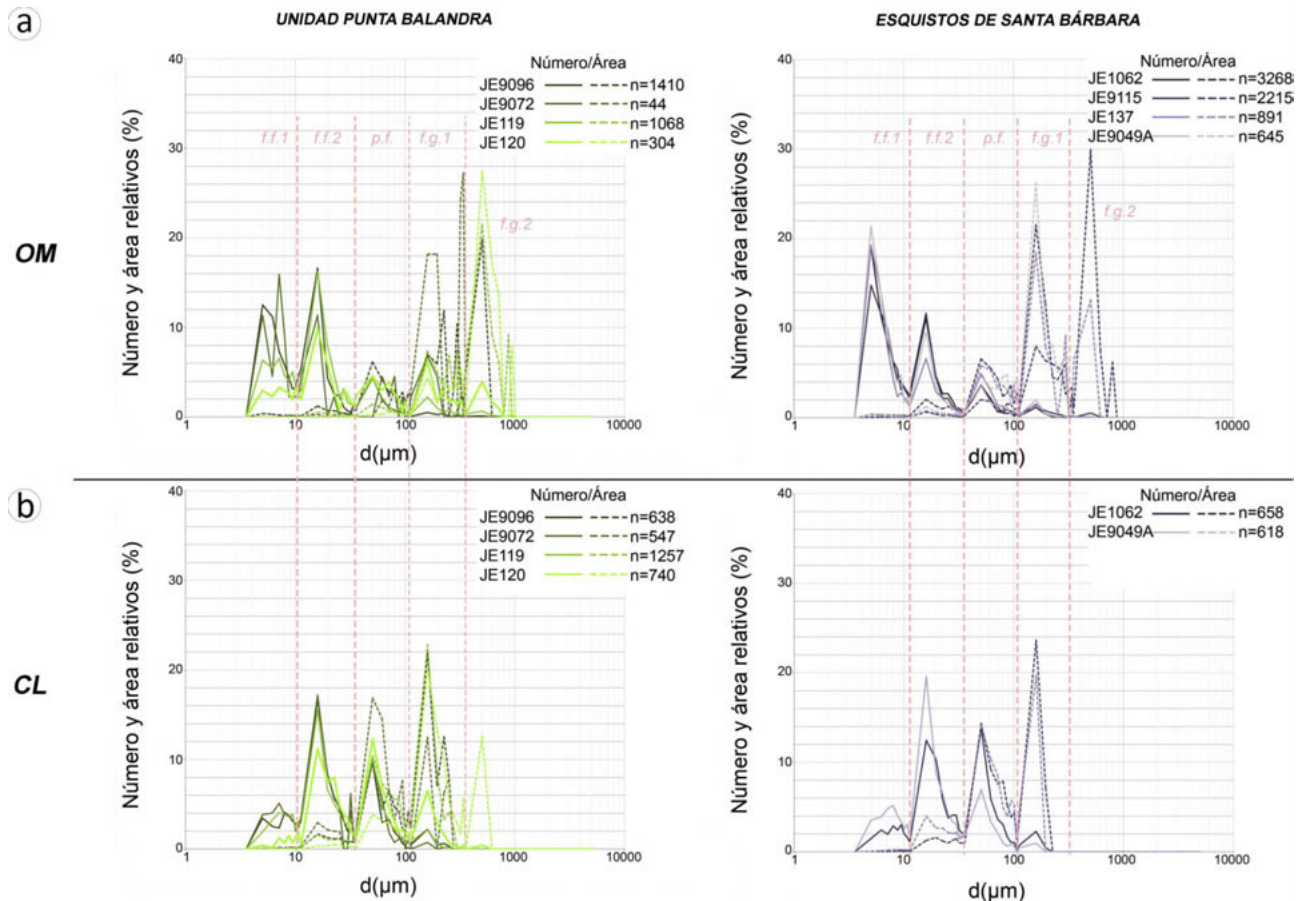


Figura 9. Diagramas de tamaños de grano mostrando la frecuencia de tamaño (línea continua y el porcentaje de área (línea discontinua). Fracción de fenocristales (*p.f.*), fracción de granos recrystalizados por migración de borde (*f.f.2*) y fracción de granos más fina (*f.f.1*). (a) A partir de imágenes-OM. (b) A partir de imágenes-CCL.

Figure 9. Grain-size diagrams showing the size frequency (continuous line) and the area per cent (dashed line). Phenocrysts fraction (*p.f.*), grain boundary migration recrystallization fraction (*f.f.2*) and finer grain fraction (*f.f.1*). Punta Balandra samples (green line), Santa Bárbara samples (purple line). (a) From OM-images. (b) From CCL-images.

En los diagramas-GSD de las microestructuras analizadas mediante imágenes-OM (Figura 9a) se reconoce una población de distribución normal que corresponde a los fenoblastos de calcita (*p.f.*). La *p.f.* se identifica porque el pico de frecuencia de tamaño y el de porcentaje de área tienen una amplitud similar. Esta fracción representa sólo el 4% del número total de calcitas analizadas en ambas unidades. Además, también se reconocen dos distribuciones normales correspondientes a las fracciones finas que se identifican de menor a mayor tamaño como *f.f.1* y *f.f.2* y dos fracciones gruesas (*f.g.1* y *f.g.2*, de menor y mayor tamaño medio de grano respectivamente). El diámetro medio de las fracción fina correspondiente a la población de granos recrystalizados *f.f.2* ≈ 15µm, es similar en las fábricas tectónicas de las dos unidades, y también es similar al que se midió en las muestras

analizadas de la unidad de los mármoles del Rincón (Fernández *et al.*, en este volumen). Esta fracción de granos en todas las microestructuras se ha identificado como cristales de calcita recrystalizados por migración de bordes de grano (Figuras 3, 4). La *f.f.2* representa sólo el 9% de la población analizada en las microestructuras de la unidad de Santa Bárbara y el 13% de la población analizada en las microestructuras de la unidad de Punta Balandra, mientras que las fracciones más finas (*f.f.1*) representan un porcentaje ligeramente superior en la unidad de Santa Bárbara y su variabilidad de tamaño con respecto a la unidad de Punta Balandra no permite hacer una interpretación genética simple. Respecto a las fracciones más gruesas, en las que las distribuciones normales de área son mayores que las correspondientes al número de granos medidos, se interpretan como fenocristales de

calcita que han sufrido crecimiento durante el desarrollo de la fábrica tectónica por deformación plástica.

En los diagramas-GSD de las microestructuras analizadas mediante imágenes-CCL (Figura 9b) se reconocen cuatro poblaciones de distribución normal que corresponden a las fracciones *p.f.*, *f.f.1* y *f.f.2* de las distribuciones que presentan las imágenes-OM. La fracción gruesa sólo presenta una distribución normal y se identifica como equivalente a la *f.g.1* de las imágenes-OM. Además se duplica el porcentaje de número de granos de la población *p.f.* ($\approx 10\%$). Se ha interpretado que la población *p.f.* de las imágenes-CCL representa la distribución de los fenoclastos relictos de la fábrica original, mientras que esta población disminuye en las imágenes-OM porque parte de estos clastos se incorporan a las poblaciones *f.g.1* y *f.g.2*. Además, parte de las microestructuras cataclásticas que en las imágenes-OM forman parte de la población *f.g.2*, formaban parte de las fracciones finas de las imágenes-CCL.

Fractalidad de la GSD

Los diagramas-GSD muestran un patrón de distribución similar en las muestras de cada unidad (Figura 9) por lo que se han agrupado los datos procedentes de todas las muestras de cada unidad y se han proyectado por unidades en los diagramas bi-log (Figuras 10, 11). Los diagramas bi-log de las microestructuras de las imágenes-OM muestran buenos ajustes lineales en ambas unidades con valores de R^2 entre 0.94 y 0.98 y presentan una ruptura de pendiente $r_k \approx 2.35$ que

equivale a un $r_f = 258 \mu\text{m}$ y que es común en ambas unidades (Figura 10). Por lo tanto en los diagramas bi-log se definen dos valores de D . La fracción de mayor tamaño de la unidad de Punta Balandra tiene una $D_2 = 2.75$, mientras que la unidad de Santa Bárbara tienen una $D_2 = 3.89$. Estos valores de D_2 son habituales en cataclasis carbonatadas (Billi, 2007). Sin embargo la fracción fina $D_1 \approx 1$ presenta valores más bajos de los que producen la fragmentación indicando una homogeneización en la variación de la frecuencia que representa cada rango de tamaño. Aunque la distribución es auto-similar, la variación de tamaño por debajo de $r_k \approx 2.35$ es escalo-dependiente.

Los diagramas bi-log de las microestructuras observadas en las imágenes-CCL también presentan buenos ajustes lineales, aunque con rupturas de pendiente r_k diferentes en cada unidad (Figura 11). La unidad de Punta Balandra tienen un $r_k = 1.76$ y las muestras de la unidad de Santa Bárbara tienen un $r_k = 1.6$, lo que indica que el proceso de fragmentación relacionado con la cataclasis relictas está mejor preservado en las microestructuras de la unidad de Santa Bárbara que en las de Punta Balandra. Los valores $D_2 = 2.43$ de la unidad de Punta Balandra son inferiores a los $D_2 = 2.72$ de la unidad de Santa Bárbara y también están dentro del rango habitual de los obtenidos en cataclásticas carbonatadas (Storti *et al.* 2003; Billi y Storti, 2004; Billi, 2007). Ambos valores D_2 son inferiores a los obtenidos utilizando las imágenes-OM. Los valores $D_1 < 1$ de ambas unidades también presentan valores muy bajos, por lo que se interpreta que no están relacionados con los procesos de fragmentación cataclástica, sino con mecanismos de deformación escalo-dependientes que tienden a producir una

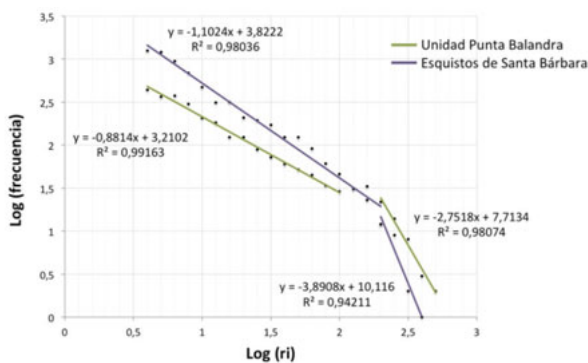


Figura 10. Proyección bi-logarítmica de frecuencia frente a radio equivalente a partir de imágenes-OM. Muestras de Punta Balandra (línea verde), muestras de Santa Bárbara (línea púrpura).

Figure 10. Bi-logarithmic plot of frequency versus equivalent radius from OM-images. Punta Balandra samples (green line), Santa Bárbara samples (purple line).

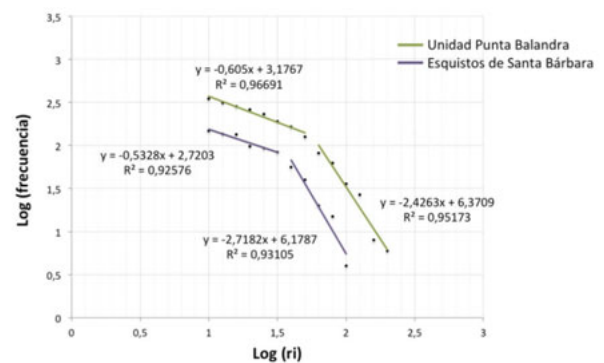


Figura 11. Proyección bi-logarítmica de frecuencia frente a radio equivalente a partir de imágenes-CCL. Muestras de Punta Balandra (línea verde), muestras de Santa Bárbara (línea púrpura).

Figure 11. Bi-logarithmic plot of frequency versus equivalent radius from CCL-images. Punta Balandra samples (green line), Santa Bárbara samples (purple line).

homogeneización en el tamaño de grano de la fábrica durante el proceso de deformación.

Discusión

Las imágenes-CCL de las fábricas tectónicas- F_2 desarrolladas en los mármoles y calco-esquistos durante la exhumación de las unidades de más alta presión del complejo de Samaná presentan microestructuras cataclásticas que no se detectan en las imágenes de microscopía óptica convencional tomadas sobre las mismas áreas. Como estas microestructuras cataclásticas se localizan distribuidas en bandas paralelas a la foliación- S_2 y son anteriores al desarrollo de deformación por disolución-precipitación y de la deformación plástica, la cataclasis se produjo con anterioridad al desarrollo de la foliación blastomilonítica y al desarrollo del bandeo definido por la concentración de opacos e insolubles (Figuras 5, 6, 7). A pesar de que la deformación frágil se inhibe en profundidad a favor de otros mecanismos de deformación que son más dependientes de la temperatura como la deformación plástica intracristalina o el flujo por transferencia de masa por difusión (p.ej. Rutter y Brodie, 1992), este comportamiento general puede variar debido a condiciones específicas que se deriven del contexto tectónico donde se desarrolla la deformación (p.ej. Isacks *et al.*, 1968). Fernández *et al.* (en este volumen) concluyen que la exhumación de la plataforma carbonatada subducida se produjo en un contexto de exhumación tectónica forzada del canal de subducción, donde un ligero aumento de la presión de fluidos ($w.t.H_2O < 1.8\%$) provocado por las reacciones de deshidratación, rebajó suficientemente la resistencia de los mármoles y calco-esquistos para producir flujo cataclástico. Las microestructuras desarrolladas en las fábricas tectónicas F_2 muestran también que sobre la cataclasis se impusieron de forma dominante otros mecanismos de deformación como el *creep* de disolución-precipitación y la deformación plástica intracristalina (Fernández *et al.*, en este volumen; Figuras 3, 4, 5, 6).

Los estudios de fractalidad en rocas cataclásticas carbonatadas (Billi *et al.*, 2003; Storti *et al.*, 2003; Billi y Storti, 2004; Billi, 2007) involucran rocas de falla producidas en condiciones de baja presión y temperatura. En estos trabajos se obtienen valores de D que aumentan desde 2 a 3.5 a medida que aumenta la intensidad de la trituración de las cataclasitas. El aumento de los valores de D se puede deber a que la fragmentación preferente de las partículas de mayor tamaño (Blenkinshop, 1991) produce una molienda por abrasión y rotación durante la deformación por

cizalla (Morgan, *et al.* 1997), lo que provoca una ruptura de pendiente en los diagramas bi-log y dos valores de la dimensión fractal D_1 y D_2 . Los valores D_2 más bajos se registran siempre en la unidad de Punta Balandra que se exhumó desde condiciones más profundas que la unidad de Santa Bárbara y por lo tanto está de acuerdo con que la intensidad de la cataclasis sea mayor en esta unidad.

La fracción de tamaño $r_i > 40 \mu\text{m}$ presenta valores de D_2 de 2.4 y 2.7 en las fábricas tectónicas de las imágenes-CCL de las unidades de Punta Balandra y Santa Bárbara respectivamente (Figura 11). La forma de las calcitas se ha representado con respecto su elipticidad y al radio equivalente (Figuras 12, 13). Las fábricas tectónicas de las imágenes-OM muestran una variación previsible con aumento de irregularidad de borde de grano conforme aumenta el tamaño de grano. Sin embargo, la elipticidad de los cristales se mantiene constante en las muestras de la unidad de Punta Balandra (≈ 2), mientras que en las fracciones gruesas de la unidad de Santa Bárbara la elipticidad de los fenoblastos aumenta con el aumento de tamaño e indica que la deformación plástica por migración de borde de grano aumentó la elipticidad de los fenoblastos de calcita sólo en los esquistos de Santa Bárbara. Por otra parte, las poblaciones de granos recristalizados por migración de bordes de grano de ambas unidades (*f.f.2*) tienen un parámetro de forma $S \approx 0.64$ similar, indicando que el aumento de elipticidad de la fracción gruesa no es un proceso posterior al de recristalización dinámica. Sin embargo, aunque las fracciones finas *f.f.1* y *f.f.2* de las fábricas de las imágenes-CCL también tienen formas similares, los clastos de la matriz son menos irregulares ($S \approx 0.75$) que las fracciones finas de las imágenes-OM, lo que sugiere una modificación de la forma las fracciones finas posterior al proceso cataclástico. La menor irregularidad de la forma de los fenoclastos de las fracciones medias *p.f.* en las fábricas-CCL ($S \approx 0.61$) se ha interpretado que podría corresponder a la forma original de los fenoclastos fragmentados. Esta interpretación se sustenta en que el parámetro de forma S apenas presenta variación en las fracciones medias *p.f.* y *f.g.1* de las fábricas-CCL, mientras que la misma población *p.f.* de granos en las fábricas-OM muestra valores de S que varían entre 0.47 y 0.41. Estos valores más bajos indican un aumento de irregularidad de borde de grano durante la deformación posterior a la fragmentación cataclástica (Figura 13).

Las microestructuras cataclásticas de las imágenes-CCL se corresponden generalmente con poblaciones de clastos de las fracciones finas $r_i < r_k$. Sin embargo la dimensión fractal de estas poblaciones D_1 varía entre 0.88 y 0.98 en las fábricas-CCL y es aún menor

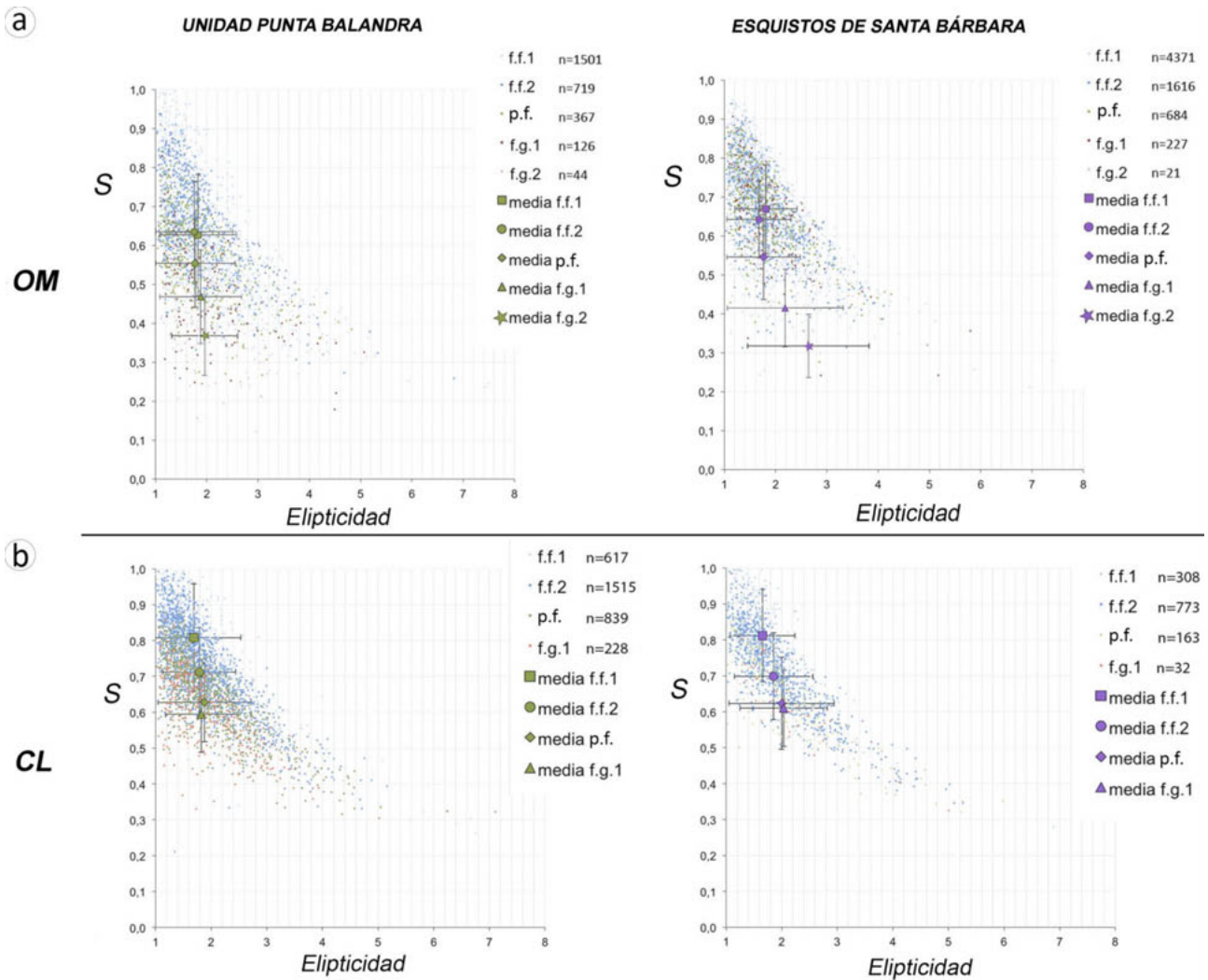


Figura 12. Diagramas de parámetro de forma *S* versus elipticidad para los valores medios de cada una de las fracciones de tamaño. (a) A partir de imágenes-OM. (b) A partir de imágenes-CCL.

Figure 12. Shape parameter *S*-diagrams versus ellipticity showing the mean values of each grain size fraction. (a) From OM-images. (b) From CCL-images.

en las fábricas-OM (Figuras 10, 11). Estos valores están fuera del rango de *D* que caracteriza los procesos de fragmentación cataclástica en las rocas carbonatadas (Billi *et al.*, 2003; Storti *et al.*, 2003; Billi y Storti, 2004; Billi, 2007). Tanto los mecanismos de deformación cataclástica posterior al proceso de fragmentación que se pudieron activar, tales como el refinado de grano por molienda (p.ej. Keulen *et al.*, 2007), como los mecanismos de deformación que dominaron con posterioridad al flujo cataclástico, tales como el *creep* de disolución-precipitación y la deformación plástica acomodada por recristalización dinámica (Fernández *et al.*, en este volumen), son mecanismos escalodependientes y tienden a producir una homogeneización de la GSD en las fracciones más finas. En conse-

cuencia, se ha interpretado que el tamaño de grano r_k , en el que se produce la ruptura de pendiente, define un límite en la GSD entre la distribución controlada por el proceso relicto cataclástico (D_2) de las imágenes-CCL y la controlada por otros mecanismos escalodependientes como la molienda o la disolución de los cristales más finos de la matriz cataclástica durante el *creep* de disolución-precipitación. Todos estos procesos tienden a homogeneizar la distribución de las fracciones finas y se caracterizan por valores de D_1 entre 0.5 y 0.6 (Figura 11). Sin embargo, la distribución de todas las poblaciones finas identificadas en las fábricas-CCL está homogeneizada en las fábricas-OM y producen una distribución D_1 que varía entre 0.9 y 1.1 (Figura 10). Esta redistribución de la GSD en las fábricas-

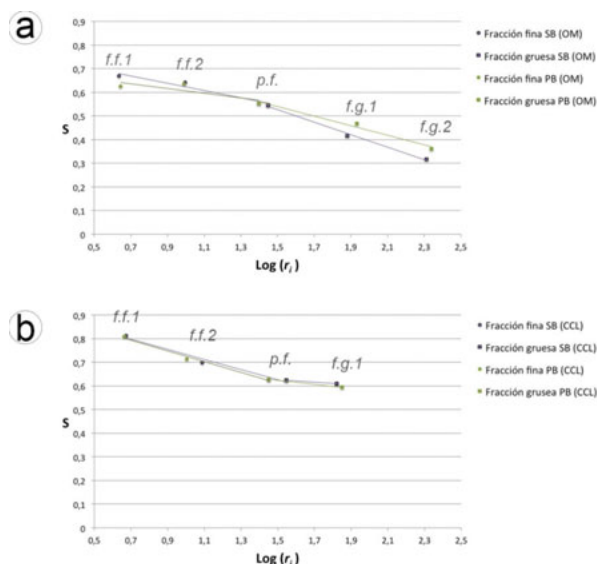


Figura 13. Diagramas de parámetro de forma S versus tamaño ($\log(r_i)$) para los valores medios de cada una de las fracciones de tamaño. (a) A partir de imágenes-OM. (b) A partir de imágenes-CCL. Se diferencian las unidades de Santa Bárbara (línea morada) y Punta Balandra (línea verde). Se representa la fracción fina con círculos y la fracción gruesa con cuadrados.

Figure 13. Shape parameter S -diagrams versus size ($\log(r_i)$) showing the mean values of each grain size fraction. (a) From OM-images. (b) From CCL-images. Santa Bárbara (purple line) and Punta Balandra (green line) units are distinct. Circles represent the fine-grain size fractions and the coarse-grain size fraction is represented by squares).

cas-OM es consecuencia de la deformación plástica intracrystalina y sus mecanismos de acomodación por recristalización dinámica y sugieren un aumento progresivo de los esfuerzos diferenciales durante el proceso de exhumación que generaría la fracción más fina *f.f.1*. La distribución D_2 corresponde a la fracción más gruesa *f.g.2*, que no está presente en las fábricas-CCL y que muestra claras evidencias de deformación plástica intracrystalina por migración de bordes de grano. Como esta población de granos creció a partir de los fenoclastos *p.f.* y *f.g.1* de las fábricas-CCL cataclásticas, mantiene unos valores D dentro del rango de las distribuciones cataclásticas típico de rocas carbonatas.

Conclusiones

Las microestructuras cataclásticas desarrolladas en los primeros estadios de la exhumación de las unidades del complejo de Samaná desde condiciones de *HP/T* han quedado registradas en las imágenes-CCL de microscopía de los mármoles y calco-esquistos de las unidades de Punta Balandra y Santa Bárbara.

La distribución de tamaño de granos de la fábrica tectónica S_2 de las imágenes-CCL es auto-similar de tipo potencial. Su proyección bi-logarítmica se caracteriza por presentar una ruptura de pendiente $r_x=1.7$. La fracción de mayor tamaño ($1.7 < \log(r_i) < 2.4$) se caracteriza por una dimensión fractal $D_2=2.43$ y 2.72 para las fábricas tectónicas de calcita de las muestras de las unidades de Punta Balandra y Santa Bárbara respectivamente. Estos valores son habituales de las cataclasis carbonatadas. Estas fracciones presentan bordes rectos poligonales con un parámetro de forma $S \approx 0.61$ y una elipticidad por debajo de 2. La fracción de tamaño fino ($0.9 < \log(r_i) < 1.7$) es también de tipo potencial, pero $D_1 < 1$ está por debajo del rango de las distribuciones fractales típica de las fábricas cataclásticas de rocas carbonatadas. D_2 caracteriza un proceso de fragmentación, mientras que la distribución D_1 caracteriza la suma de los procesos escalo-dependientes que se activan durante la reducción del tamaño de grano por los diferentes mecanismos de deformación. Así, la molienda que sucedió a la fragmentación inicial y la disolución de los cristales más finos durante el *creep* de disolución-precipitación, homogeneizaron la distribución D_1 a valores entre 0.5 y 0.6.

Los patrones de GSD de las imágenes-OM de la fábrica tectónica reflejan la superposición del *creep* de disolución-precipitación y de la deformación plástica acomodada por procesos de recristalización dinámica a la fábrica tectónica cataclástica, de manera que todas las fracciones de tamaño de granos diferenciadas en las imágenes-CCL ajustan a distribuciones $D_1 \approx 1$ en las imágenes-OM. Además aparece una distribución D_2 que varía entre valores de 2.7 y 3.8 y que caracteriza el efecto de deformación y crecimiento de las fracciones gruesas durante la deformación plástica intracrystalina. Esta interpretación es consistente con las diferencias observadas entre los parámetros de forma S y elipticidad medidos en cada población de granos de las imágenes-CCL respecto a las imágenes-OM de estas fábricas tectónicas.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimientos a Idoia Rosales, investigadora del departamento de Recursos Minerales del IGME-Madrid, por su ayuda con el equipo de catodoluminiscencia. Los comentarios y sugerencias realizados por un revisor anónimo y F. Bastida han ayudado a mejorar la versión definitiva de este texto. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación CGL2010-14890 y CGL2011-23628,

auspiciados por el plan nacional I+D+i del Ministerio de Educación del Gobierno de España.

Referencias

- Adams, F. D. and Nicolson, J. T., 1900. An Experimental Investigation into the Flow of Marble. *Proceedings of the Royal Society of London* 67, 228-234.
- Austin, N.J. and Evans, B., 2007. Paleowattmeters: a scaling relation for dynamically recrystallized grain size. *Geology* 35, 343-346.
- Billi, A., 2007. On the extent of size range and power law scaling for particles of natural carbonate fault cores. *Journal of Structural Geology* 29, 1512-1521.
- Billi, A., 2010. Microtectonics of low-*P* low-*T* carbonate fault rocks. *Journal of Structural Geology* 32, 1392-1402.
- Billi, A., Salvini, F. and Storti, F., 2003a. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25, 1779-1794.
- Billi, A., Storti, F. and Salvini, F., 2003b. Particle size distributions of fault rocks and fault transpression: are they related? *Terra Nova* 15, 61-66.
- Billi, A. and Storti, F., 2004. Fractal distribution of particle size in carbonate cataclastic rocks from the core of a regional strike-slip fault zone. *Tectonophysics* 384, 115-128.
- Blenkinsop, T. G., 1991. Cataclasis and processes of particle size reduction. *Pure and Applied Geophysics* 136, 59-86.
- Burkhard, M., 1993. Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Journal of Structural Geology* 15, 351-368.
- Catlos, E. J. and Sorensen, S.S., 2003. Phengite -based chronology of K- and Ba-rich fluid flow in two paleosubduction zones. *Science* 299, 92-95.
- Draper, G., Mann, P. and Lewis, J.F., 1994. Hispaniola. En: Donovan S.K. y Jackson, T.A. (ed.), *Caribbean Geology: An Introduction*. University of the West Indies Publishers Association, Kingston, Jamaica, 129-150.
- Elliott, D., 1973. Diffusion flow laws in metamorphic rocks. *Geological Society of America Bulletin* 84, 2645-2664.
- Epstein, B., 1947. The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmic normal distribution. *Journal of the Franklin Institute* 244, 471-477.
- Escuder Viruete, J., 2004. Petrología y Geoquímica de Rocas Ígneas y Metamórficas del Proyecto K (Sysmin): Hojas de Dajabón, Martín García, Loma de Cabrera, Santiago Rodríguez, Monción, Restauración, Jicomé, Bánica, Arroyo Limón y Lamedero. Informe Complementario al Mapa Geológico de la República Dominicana a E. 1:50.000. *IGME-BRGM-INYPSA*, Santo Domingo, 130 pp.
- Escuder-Viruete, J. and Pérez-Estaún, A., 2006. Subduction-related P-T path for eclogites and garnet glaucophanites from the Samaná Peninsula basement complex, northern Hispaniola. *International Journal of Earth Sciences* 95 (6), 995-1017.
- Escuder-Viruete, J., 2008. Mapa Geológico de la República Dominicana E. 1:50.000, Santa Bárbara de Samaná (6373-IV). *Dirección General Minería, Santo Domingo*, 197 pp.
- Escuder-Viruete, J., Pérez-Estaún, A., Booth-Rea, G. and Valverde-Vaquero, P., 2011a. Tectonometamorphic evolution of the Samaná complex, northern Hispaniola: Implications for the burial and exhumation of high-pressure rocks in a collisional accretionary wedge. *Lithos* 125, 190-210.
- Escuder-Viruete J., Pérez-Estaún A., Gabites J. and Suárez-Rodríguez A., 2011b. Structural development of a high-pressure collisional accretionary wedge: The Samaná complex, Northern Hispaniola. *Journal of Structural Geology* 33, 928-950.
- Escuder-Viruete, J. and Pérez-Estaún, A., 2013. Contrasting exhumation P-T paths followed by high-P rocks in the northern Caribbean subduction-accretionary complex: Insights from the structural geology, microtextures and equilibrium assemblage diagrams. *Lithos* 160-161, 177-144.
- Fernández, F.J., Menéndez-Duarte, R., Aller, J. and Bastida, F., 2005. Application of geographical information system to shape-fabric analysis. In: Microrstructural evolution and physical properties in high-strain zones (I. Burlini and Bruhn eds.) *Geological Society of London Special Publications* 245, 409-420.
- Fernández, F.J., Rutter, E.H., Prior, D. y García-Cuevas, C., 2011. Análisis e interpretación de fábricas tectónicas en rocas carbonatadas cálcicas. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 24 (1-2), 9-30.
- Fernández, F.J., Rodríguez, I., Escuder-Viruete, J., Pérez-Estaún, A., Mariani, E. y Prior D. 2015. Inversión Mecánica durante la exhumación de los Mármoles de alta presión, complejo de Samaná, Norte de la Española. *Boletín Geológico y Minero*, XX, XX-XX.
- Ferrill, D.A., Morris, A.P., Evans, M.A., Burkhard, M., Groshong, R.H. and Onasch C.M., 2004. Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer. *Journal of Structural Geology* 26, 1521-1529.
- Gonçalves, Ph., Guillot, S., Lardeaux, J.M., Nicollet, C. and Mercier de Lépinay, B., 2000. Thrusting and sinistral wrenching in a pre-Eocene HPLT Caribbean accretionary wedge (Samaná Peninsula, Dominican Republic). *Geodinamica Acta* 13, 119-132.
- Griggs, D.T., Turner, F. J. and Heard, H., 1960. Deformation of rocks at 500° to 800°C. In: Rock Deformation (Griggs, D. and Handin, J. eds.). Geological Society of America Memoirs 79, 34-104.
- Hermann, J., Spandler, C., Hack, A. and Korsakov, A.V., 2006. Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultrahigh-pressure rocks: implications for element transfer in subduction zones. *Lithos* 92, 399-441.
- Isacks, B., Oliver, J. and Sykes, L. R., 1968. Seismology and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 73 (18), 5855-5899.
- Jamtveit, B., Austrheim, H. and Malthe-Sorensen, A., 2000. Accelerated hydration of the Earth's deep crust induced by stress perturbations. *Nature* 408, 75-78.
- Joyce, J., 1991. Blueschist metamorphism and deformation

- on the Samaná Peninsula: a record of subduction and collision in the Greater Antilles. En: Mann P., Draper G. y Lewis J. (ed.), *Tectonic Development of the North America-Caribbean Plate Boundary Zone in Hispaniola: Geological Society America Special Paper* 262, 47-75.
- Keulen, N., Heilbronner, R., Stünitz, H., Boullier, AM. and Ito, H., 2007. Grain size distributions of fault rocks: A comparison between experimentally and naturally deformed granitoids. *Journal and Structural Geology* 29, 1282-1300.
- Long, J.V.P. and Agrell S.O., 1965. The cathodoluminescence of minerals in thin section. *Mineralogical Magazine* 34, 318-326.
- Mancktelow, N., 1995. Non lithostatic pressure during sediment subduction and the development and exhumation of high pressure metamorphic rocks. *Journal of Geophysical Research* 100, 571-583.
- Marshall, J.D., 1988. Cathodoluminescence of geological materials. *Unwin Hyman*, 146 pp.
- Morgan, J.K., Cladouhos, T.T., Scharer, K.M., Cowan, D.S. and Vrolijk, P., 1997. Fractal particle size distributions in Death Valley fault zones: Controls on mechanics and kinematics of fault rocks, Geological Society of America, Abstract with Programs 29.
- Paterson, M. S., 1990. Superplasticity in geological materials. *Materials Research Society Symposium Proceedings* 196, 303 - 312.
- Pérez-Estaún, A., Hernaiz, P. P., Lopera, E., Joubert, M. y grupo SISMYN (Escuder-Virueite, J., Diaz, A., Monthel, J., García-Senz, J., Ubrien, P., Contreras, F., Bernárdez, E., Stein, G., Deschamps, I., García-Lobón, J. L. y Ayala, C., 2007. Geología de la República Dominicana: de la construcción de arco-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero* 118, 157-174.
- Petrini, K. and Podladchikov, Y., 2000. Lithospheric pressure-depth relationship in compressive regions of thickened crust. *Journal of Metamorphic Geology* 18, 67-77.
- Rutter, E. H., 1976. The kinetics of rock deformation by pressure solution. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 283 (A), 203-219.
- Rutter, E. H., 1983. Pressure solution in nature, theory and experiment. *Journal of the Geological Society* 140, 725-740.
- Rutter, E.H., 1995. Experimental study of the influence of stress, temperature, and strain on the dynamic recrystallization of Carrara marble. *Journal of Geophysical Research* 100(B12), 24651-24663.
- Rutter, E. H. and Brodie, K. H., 1992. Rheology of the lower crust. In *Continental Lower Crust*, ed. Fountain, D. M., Arculus, R. and Kay, R. W. Amsterdam: Elsevier, 201-267.
- Sommer, S.E., 1972. Cathodoluminescence of carbonates, 1 Characterization of cathodoluminescence from carbonate solid solutions. *Chemical Geology* 9, 257-273.
- Spiers, C. J., 1982. The Development of Deformation Textures in Calcite Rocks. Ph.D. thesis, Imperial College of Science and Technology, London, 251pp.
- Storti, F., Billi, A. and Salvini, F., 2003. Particle size distribution in natural carbonate fault rocks: insights for non-self-similar cataclasis. *Earth and Planetary Science Letters* 206, 173-186.
- Turcotte, D.L., 1986. Fractals and Fragmentation. *Journal of Geophysical Research* 91(B2), 1921-1926.
- Turner, F. J., T Griggs, D. and Heard, H., 1954. Experimental deformation of calcite crystals. *Geological Society of America Bulletin* 65, 883-934.
- Wassmann, S. and Stöckhert, B., 2013. Rheology of the plate interface-Dissolution precipitation creep in high pressure metamorphic rocks. *Tectonophysics* 608, 1-29.
- Zhang, Z.M., Shen, K., Sun, W.D., Liu, Y.S., Liou, J.D., Shi, C. and Wang, J.L., 2008. Fluids in deeply subducted continental crust: petrology, mineral chemistry and fluid inclusion in UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 3200-3228.

Recibido: abril 2015

Revisado: junio 2015

Aceptado: julio 2015

Publicado: septiembre 2017