



## *Fábricas sin-metamórficas, mecanismos y régimen de la deformación en las granulitas de alta presión de Cabo Ortegal (NO de España): Réplica*

*(Geogaceta, 45: 15-18 / 2008)*

Pablo Puelles y Benito Ábalos

Departamento de Geodinámica, Universidad del País Vasco, Apdo. 644, 48080 Bilbao.  
pablo.puelles@ehu.es

Agradecemos a los Editores de Geogaceta su invitación para participar en la sección «GEOGACETA DEBATE», que abre la posibilidad de intercambiar ideas científicas a través de comentarios y réplicas. Sin embargo, creemos que en este caso el debate no se inicia como tal, ya que nuestro trabajo se considera invalidado por las imprecisiones, errores y contradicciones que supuestamente contiene. En esta contestación rebatiremos los comentarios de F.J. Fernández (FJF) en el orden en que los presenta.

FJF comienza «pasando por alto» la interpretación correcta de la orientación cristalográfica preferente (OCP) del anfíbol y la plagioclasa utilizando la difracción de electrones retro-dispersados (EBSD). Esto puede dar la impresión errónea de que estamos ante algo carente de rigor científico. Como muestra el autor con sus citas bibliográficas, ése era un problema no resuelto hace una década, cuando estaban pendientes caracterizar e indexar las bandas de difracción de muchas fases minerales complejas (soluciones sólidas). Actualmente, los sistemas automatizados de EBSD como el utilizado en nuestro estudio («Channel5», «HKL») incorporan bases de datos que permiten superar el problema mediante la introducción de datos composicionales de las fases que serán analizadas, o bien permiten introducir manualmente listados de reflectores, permitiendo una indexación más rigurosa y exacta. En nuestro estudio se disponía de dicha información y, lógicamente, fue utilizada para determinar las OCPs.

En el «Contexto geológico» no se atribuye a Martínez-Catalán *et al.* (1997) el carácter alóctono de los Complejos del Noroeste Ibérico. Se presenta una frase acompañada de una cita que describe de modo satisfactorio el concepto moderno de los mencionados complejos, que incluyen entre otras las unidades «catazonales» de Ries y Shackleton (1971).

FJF continúa con un apartado («imprecisiones y errores») en el que se refiere a la localización de las muestras. Es cierto que la figura 1 carece de ella. Este hecho tiene su explicación, sin que sirva de excusa, en los problemas de compatibilidad y el trasiego de ficheros informáticos que siguieron a la presentación oral del trabajo (en la que sí se mostró su localización) para su ulterior edición. En consecuencia, aclaramos aquí lo que debería mostrar la figura. Las muestras estudiadas fueron siete, todas recogidas cerca del contacto basal de las granulitas con las eclogitas, a lo largo de un segmento de casi 15 km de longitud. Por otra parte, las secciones estudiadas fueron en todos los casos las convencionales en los estudios de petrofábrica: secciones paralelas a la

lineación y perpendiculares a la foliación (secciones XZ). Se analizaron en el microscopio electrónico de barrido (MEB) utilizando un mallaado con espaciados nodales de entre 10 y 30  $\mu\text{m}$  e indexando las principales fases minerales presentes, de modo que para cada muestra fue posible obtener OCPs de varios minerales por separado. Las OCPs de la figura 3 corresponden a una selección de seis minerales diferentes que pueden pertenecer o no a una misma muestra. En ningún caso son fábricas resultantes de la agrupación de una misma fase mineral presente en varias muestras. La interpretación cinemática a la que se refiere FJF es independiente de los resultados de este estudio (que, no obstante, la corroboran) y se basa en observaciones que es posible realizar en secciones adecuadas (XZ) sobre el terreno o utilizando láminas delgadas. Las lineaciones (dirección X) de la zona de cizalla dúctil del contacto entre granulitas y eclogitas son subparalelas a las presentes en el resto de la unidad granulítica y a las observadas en todo el Complejo de Cabo Ortegal. Estas estructuras son subhorizontales en las granulitas, con una dirección media N015°E, parecida a la de otras unidades del Complejo, (N005°E-N025°E; Ábalos *et al.*, 2003). Los criterios cinemáticos reconocidos indican de modo consistente un desplazamiento relativo de los bloques de techo hacia el NNE. No existen discrepancias con trabajos ya publicados (como sugiere FJF). A diferencia de lo expresado por FJF al final del mismo párrafo, las CPOs de la figura 3 son claramente asimétricas en todos los casos excepto en los del granate y la plagioclasa. Todas ellas presentan la misma vorticidad (dextra), por lo que resulta incomprensible cómo interpreta que la del cuarzo implica movimiento del bloque de techo al NNE mientras que la del anfíbol lo implica al WNW.

La morfología descrita de los cristales de granate es sigmoidal o lenticular, a veces con zonas adelgazadas en las partes centrales, no son «formas prismáticas elongadas», según «deduce» FJF. Las evidencias de su deformación plástica no es posible mostrarlas con microfotografías con luz polarizada y nícoles paralelos. Para ello suele ser necesaria la microscopía electrónica de transmisión (MET), si bien existen diversos rasgos petrográficos que se considera revelan la presencia de dislocaciones (Ji y Martignole, 1984; Mainprice *et al.*, 2004). No obstante, podemos añadir que los mapas de orientación de ejes cristalográficos derivados de la MEB nos ha permitido reconocer distorsiones intra e inter-granulares que revelan la presencia de dislocaciones y demuestran la deformación plástica

intracristalina del granate (Storey y Prior, 2005; Vollbrecht *et al.*, 2006).

Por lo que respecta a la deformación del anfíbol, a FJF le resulta sorprendente que reflejemos su deformación plástica al tiempo que cita, pretendidamente como evidencia en otro sentido, un artículo de Díaz-Azpiroz *et al.* (2007) que presenta un claro ejemplo de deformación plástica intracristalina de dicho mineral en condiciones de temperatura también elevadas. Aprovechamos para aclarar, aunque FJF lo discuta en otro lugar, que los sistemas de deslizamiento intracristalino citados en la bibliografía para el anfíbol (tanto por Rooney *et al.*, 1975 como en otros trabajos publicados durante las dos décadas siguientes, que enumeran Díaz-Azpiroz *et al.*, 2007) implican flujo según la dirección cristalográfica [001] sobre planos (100) o (010).

La notación de los elementos cristalográficos de los minerales estudiados por EBSD (Fig. 3) es la proporcionada por el software utilizado (Channel 5) y sigue la notación cristalográfica convencional: los datos direccionales proyectados corresponden a los polos de familias de planos equivalentes. Dichos polos pueden corresponder a ejes cristalográficos (así ocurre con el polo del plano {0001} del cuarzo y su eje «c» [0001], o con el de la familia de planos {010} del clinopiroxeno y su eje «b», [010]). En cualquier caso, las proyecciones presentadas son las convencionales.

La opinión/interpretación manifestada por FJF al final de su sección de «imprecisiones y errores» sobre las CPOs no expresa nada que no aparezca ya señalado en nuestro artículo. Discrepamos con él en lo que se refiere a la asimetría de las fábricas de clinopiroxeno, cuarzo, anfíbol y biotita y su interpretación cinemática. Tal asimetría con respecto al referencial estructural externo resulta evidente en todos los casos, es congruente/constante entre las diversas fases minerales y permite hacer interpretaciones inmediatas como las señaladas en nuestro trabajo sobre las direcciones y los planos cristalográficos de flujo intracristalino.

La discusión continúa refiriéndose a dos supuestas «contradicciones». La primera, como el propio FJF acaba mostrando, es en realidad una manifestación de su deseo de aclaración de, por una parte, el significado del término «sin-metamórfico», que en nuestra opinión queda claramente explicado en el segundo párrafo del «contexto geológico» (donde se describen las fases metamórficas y deformacionales reconocidas) y, por otra, la ubicación de las muestras, que ya ha sido contestada.

La segunda «contradicción» constata la aparente falta de concordancia entre una frase del «abstract» y otra del apartado «discusión y conclusiones» referida a la deformación del granate. Sin embargo, ambas frases no son contradictorias. La segunda, por una parte, está sacada de su contexto (un párrafo basado en las teorías publicadas por otros autores sobre el origen de los granates con morfologías alargadas) y, por otra, establece que la ausencia de terminadas microestructuras y fábricas «podría indicar» (distinto de «indica», y según los autores citados) la ausencia de deformación plástica intracristalina. Lo que exponemos en el resumen refleja que diversas microestructuras se pueden interpretar como resultado de la deformación plástica. Mainprice *et al.*

(2004) citan catorce estudios publicados antes del año 2000 (págs. 2090-91) en los que se proporcionan evidencias de la deformación natural del granate por mecanismos de plasticidad, así como varios más en los que tal deformación se produjo experimentalmente. Ellos mismos muestran varios ejemplos de microfotografías de dislocaciones observadas mediante MET. Por lo tanto, no se sostiene la sentencia de FJF según la cual «estas formas elongadas raramente se han podido relacionar con evidencias microestructurales que indiquen deformación plástica». Por lo que respecta a los mecanismos de difusión en volumen, Vollbrecht *et al.* (2006) los propusieron para explicar la deformación (a 600-700 °C) de monocristales sigmoidales, discoidales y elongados de granate de tamaño milimétrico al tiempo que señalaron que la deformación de los agregados policristalinos se produjo por mecanismos de plasticidad. FJF no cita si se ha basado en alguna fuente para establecer que las leyes de flujo que rigen la deformación del granate por difusión en volumen son ineficaces en cristales del tamaño que señala.

FJF señala que «...de acuerdo con los datos aportados por los autores, se propone una interpretación alternativa para la fábrica de estas rocas». Quizá corresponda a esto el párrafo final de su discusión. Sin embargo, lo que contiene dicho párrafo son, por una parte, una apreciación errónea del significado del índice textural J y, por otra, disquisiciones varias sobre qué se podría estudiar para profundizar en el conocimiento de los cristales elongados de granate. En el primer caso, se hace necesario aclarar que el índice J describe cuantitativamente la intensidad de las CPOs, pero no permite reconocer mecanismos de deformación. Del mismo modo, la ausencia de valores elevados de este índice tampoco indica que la deformación no haya sido intensa o que no hayan actuado determinados mecanismos de deformación (tal como ocurre con la superplasticidad o en la deformación plástica de minerales de elevada simetría con un gran número de sistemas de deslizamiento intracristalino operativos simultáneamente).

## Referencias

- Ábalos, B. Puelles, P. y Gil-Ibarguchi, J.I. (2003). *Tectonics*, 22 (2), 1-21.
- Díaz-Azpiroz, M., Lloyd, G.E. y Fernández, C. (2007). *Journal of Structural Geology*, 29, 629-645.
- Ji, S. y Martignole, J. (1994). *Journal of Structural Geology*, 16, 985-996.
- Mainprice, D., Bascou, J., Cordier, P. y Tommasi, A. (2004). *Journal of Structural Geology*, 26, 2089-2102.
- Martínez Catalán, J.R., Arenas, R., Díaz-García, F. y Abati, J. (1997). *Geology*, 25, 1103-1106.
- Ries, A. C. y Shackleton, R. M. (1971). *Nature Physical Science*, 234, 65-68.
- Rooney, T.P., Riecker, R.E. y Gavasci, A.T. (1975). *Geology*, 3, 364-366.
- Storey, C.D. y Prior, D.J. (2005). *Journal of Petrology*, 46, 2593-2613.
- Vollbrecht, A. Pawloski, J., Leiss, B. Heinrichs, T. Seidel, M. y Kronz, A. (2006). *Tectonophysics*, 427, 153-170.