

# Determinación de direcciones principales de esfuerzos neotectónicos mediante el análisis del maclado mecánico de la calcita

*Neotectonic principal stresses orientation revealed by calcite e-twin analysis*

J. M. González-Casado <sup>(1)</sup>, J.L. Giner-Robles <sup>(2)</sup>, P. Gumiel <sup>(3)</sup>, C. García-Cuevas <sup>(1)</sup> y A. Moreno <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. de Q.A., Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid (g.casado@uam.es).

<sup>(2)</sup> Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

<sup>(3)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.

## ABSTRACT

Pleistocene karstic deposits developed into Upper Cretaceous limestones of the Prebetic zone, in the boundary region between the Iberian and Betic chains, were sampled in order to investigate the calcite e-twin occurrence in these modern sediments. Amazingly, sparry calcite grains from the karstic coating have mechanical twins, and they are very abundant in these grains close to recent faults (twin density of 5.7 twins/mm). Analysis of calcite e-twinning by inverse methods reveal that the region has undergone an extensional regime with maximum shortening direction NE-SW. Similar results were obtained from fault population analysis. Which points out that calcite e-twin analysis are useful to establish the neotectonic principal stresses orientation in this region. The e-twin analysis techniques based on strain determinations also yield good results.

**Key words:** principal stresses, calcite e-twins, neotectonics, Quaternary, karst, Prebetic.

Geogaceta, 36 (2004), 59-62  
ISSN:0213683X

## Introducción

En las últimas décadas se han desarrollado varios métodos que permiten determinar, a partir del análisis del maclado mecánico de la calcita, las características del tensor de esfuerzos que originó las maclas (e.g. Laurent *et al.*, 1981; Laurent, 1984) y del tensor de deformación que resulta de ellas (e.g. Groshong, 1972). Habitualmente este tipo de análisis se ha realizado en las zonas internas de las cadenas de montañas, generalmente en rocas deformadas en áreas con una importante tectónica compresiva (e.g. Groshong *et al.*, 1984; Ferrill, 1991; Rocher *et al.*, 1996; Craddock *et al.*, 2000; González-Casado y García-Cuevas, 2002), es decir, en niveles relativamente profundos. Por el contrario, existen muy pocos trabajos sobre análisis del maclado en rocas deformadas en un régimen tectónico extensional (e.g. Friedman y Heard, 1974) o en niveles superficiales de la corteza. Este hecho puede ser debido a que teóricamente las maclas sólo se desarrollan cuando el valor del esfuerzo de cizalla resuelto en el plano de macla ( $\tau_c$ ) supera los 10 MPa, es decir, en ni-

veles relativamente profundos. Sin embargo, recientemente se han publicado algunos trabajos donde se muestra el desarrollo de maclado mecánico en cristales de calcita procedentes de rocas cuaternarias, en concreto en rellenos cársticos (e.g. Rocher *et al.*, 2003), aunque, en este caso, las densidades de maclado son muy bajas. También se ha demostrado la existencia de maclas mecánicas en los granos de calcita que rellenan venas y amígdalas dentro de las series volcánicas recientes de Islandia, formadas en un contexto extensional (Craddock *et al.*, 2004), en este caso con importantes densidades de maclado. La justificación de la existencia de procesos de maclado mecánico en estos materiales puede estar en que el valor del esfuerzo de cizalla resuelto en el plano de macla ( $\tau_c$ ) no es fijo y puede variar, por ejemplo, en función de la temperatura, grado de deformación, etc. (e.g. Lacombe, 2001).

Por consiguiente, el objetivo principal de este trabajo es comprobar si materiales carbonatados cuaternarios, procedentes de un área donde las deformaciones recientes son relativamente importantes (Prebético) contienen

maclas. Para ello se han elegido los depósitos cársticos de las sierras costeras del sur de la provincia de Valencia y norte de Alicante. Además, en este caso

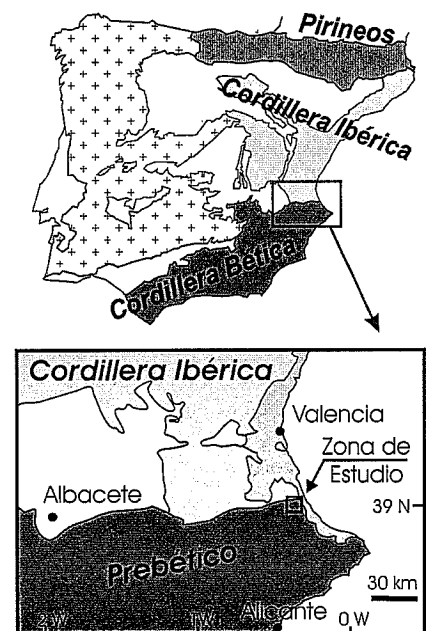
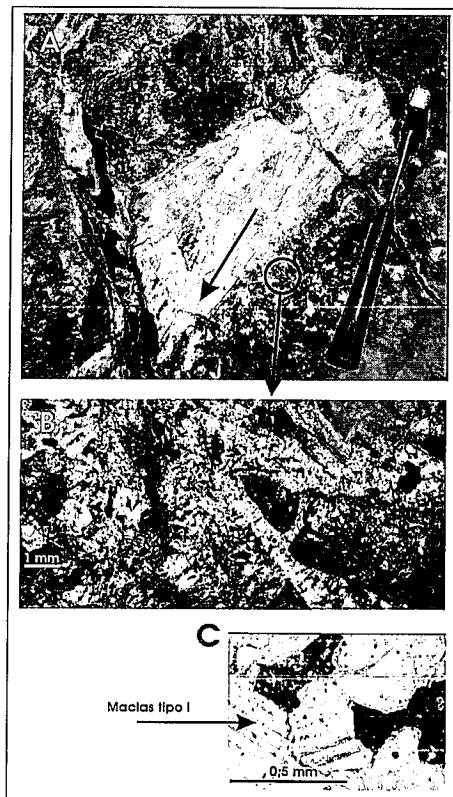


Fig. 1.- Localización de la zona de estudio.

Fig. 1.- Location maps of studied region.



**Fig. 2.-** Afloramiento estudiado. A) Fallas normales afectando a travertinos en cuya proximidad se han tomado las muestras. B) Microfotografía de un relleno cárstico afectado por pequeñas zonas de falla (bandas oscuras de grano fino), venas de tensión y cristales esparíticos maclados. C) Cristales esparíticos con maclas de Tipo I (~ 0,5  $\mu\text{m}$ ).

*Fig. 2.- Studied outcrop details. A) Normal faults that cross-cutting travertine deposits that has been sampled. B) Karstic deposit photomicrograph (parallel polars) with small faults gauges, tension gashes and sparitic twinned crystals. C) Detail of a sparitic twinned grain, twins are type I (~ 0,5  $\mu\text{m}$ ).*

las condiciones tectónicas son extensionales, por lo que también se pretende evaluar la posibilidad de desarrollo en este contexto. Por último, una vez establecida la existencia de maclas, se han comparado los resultados del análisis paleopiezométrico de éstas con los datos procedentes de las fallas recientes de la región para valorar la precisión de los datos obtenidos.

### Situación Geológica

La región estudiada está localizada en el límite sur de la provincia de Valencia, en las sierras de los alrededores de Gandía, comarca de La Safor (Fig. 1). Desde el punto de vista geológico esta región corresponde al límite meridional entre la Cordillera Ibérica y las Cordilleras Béticas y coincide también

con la terminación hacia la costa del Surco de Valencia. Esta zona está afectada por numerosas fracturas recientes con sismicidad asociada (e.g. Herraiz *et al.*, 2000; Rueda y Mezcuá, 2003). En líneas generales se pueden definir dos conjuntos de fracturas, el más numeroso tiene orientaciones ENE-OSO (Bética) y está probablemente relacionado con la formación del Surco de Valencia. El otro conjunto tiene orientaciones NO-SE, es decir, subparalelas a la línea de costa (Fig. 3 y 3A).

El área de trabajo se ha centrado en un anticlinal de amplia longitud de onda (aproximadamente 5 km), con orientación ENE-OSO (orientación Bética) y desarrollado en las series carbonáticas del Cretácico, cuyos flancos se localizan entre Tabernas de Valldigna y Gandía. En esta región los procesos cársticos ligados con las variaciones cuaternarias del nivel del mar son muy marcados y por consiguiente, los depósitos cársticos de todo tipo son muy frecuentes. Además, muchos de estos depósitos están afectados por fracturas y son fácilmente accesibles por lo que son idóneos para la toma de datos.

### Resultados

Las muestras que se han analizado proceden de varios depósitos travertínicos, con un espesor variable, entre unos pocos centímetros hasta varios metros, desarrollados en las series del Cretácico Superior y localizados a cotas entre 100 y 700 m en el entorno del monte Mondúver (840 m). Estos depósitos cársticos han sido datados radiométricamente mediante el método (U/Th) en  $207 \pm 14$  ka y están afectados por numerosas fallas normales de pequeño salto (Fig. 2A).

En este trabajo se presentan los resultados de las muestras donde se ha encontrado la mayor densidad de maclado, que corresponden a un travertino de 1 m de potencia media, el cual está afectado por varias fallas de pequeño salto (Fig. 2A). Como se puede observar en la microfotografía de la figura 2B, en las muestras se observan pequeñas bandas donde la calcita tiene un tamaño de grano muy fino (zonas de falla), que cortan zonas de cristales esparíticos de pequeño tamaño (~ 1 mm) maclados, además se observan pequeñas venas de tensión rellenas de microcristales esparíticos con hábitos de crecimiento sintaxial. Las maclas observadas (Fig. 2C) son siempre rectas

y delgadas ~ 0,5  $\mu\text{m}$  (i.e. maclas de Tipo I de baja temperatura, < 200°C; Burkhard, 1993). Existe una elevada proporción de cristales con 2 sistemas de maclas (~ 30 %), no habiéndose observado cristales con los tres sistemas de maclas posibles. La densidad lineal de maclas, ~ 6 maclas/mm, como cabe esperar es relativamente baja. La aplicación del paleopiezómetro de Rowe y Rutter (1990) para el cálculo del esfuerzo diferencial ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) asociado con el maclado da valores muy altos (99 MPa) para rocas deformadas muy cerca de la superficie (< 1 km,  $\sigma_1 \sim 2,65$  MPa).

Las maclas se han analizado para determinar el tensor de esfuerzos mediante el método numérico inverso de Etchecopar (Laurent *et al.*, 1981) que tiene en cuenta, tanto los planos de macla activos como los inactivos. Los resultados indican una disposición de  $\sigma_1$  vertical,  $\sigma_3$  subhorizontal con orientación NO-SE y  $\sigma_2$  subhorizontal con orientación NE-SO (Fig. 4) y un valor de  $R = 0,3$ . Estas orientaciones coinciden con las que resultan del análisis de las fallas (Fig. 3C y 4).

También se han analizado las maclas desde el punto de vista de la deformación mediante el método de Groshong, obteniéndose una orientación de los ejes de esfuerzo principales análoga a las de los ejes de esfuerzo (Fig. 4), aunque no coinciden las orientaciones de los ejes de acortamiento máximo ( $e_3$ ) y mínimo ( $e_1$ ) con las posiciones de los ejes  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  (deformación coaxial). Lo que puede ser debido al bajo valor de la deformación por maclado y al pequeño número de cristales considerados (< 50). El análisis de estas maclas mediante el método numérico dinámico de Spang (1972) proporciona resultados similares (Fig. 4).

Al igual que algunos métodos de análisis poblacionales de fallas, los dos métodos de análisis del maclado utilizados en este trabajo (Etchecopar y Groshong) ajustan un determinado porcentaje de las maclas medidas a los tensores solución, el conjunto de maclas no considerado o rechazado en este ajuste, se puede utilizar para calcular otra solución. Lo que permitiría teóricamente determinar la existencia de otra etapa de deformación con distintas características, i.e. orientaciones de los ejes principales. En este caso, aunque el porcentaje de datos es muy reducido, los resultados de realizar este segundo cálculo no aportan nuevos tensores, sino pequeñas variaciones en orientación y magnitud de los tensores determinados en la pri-

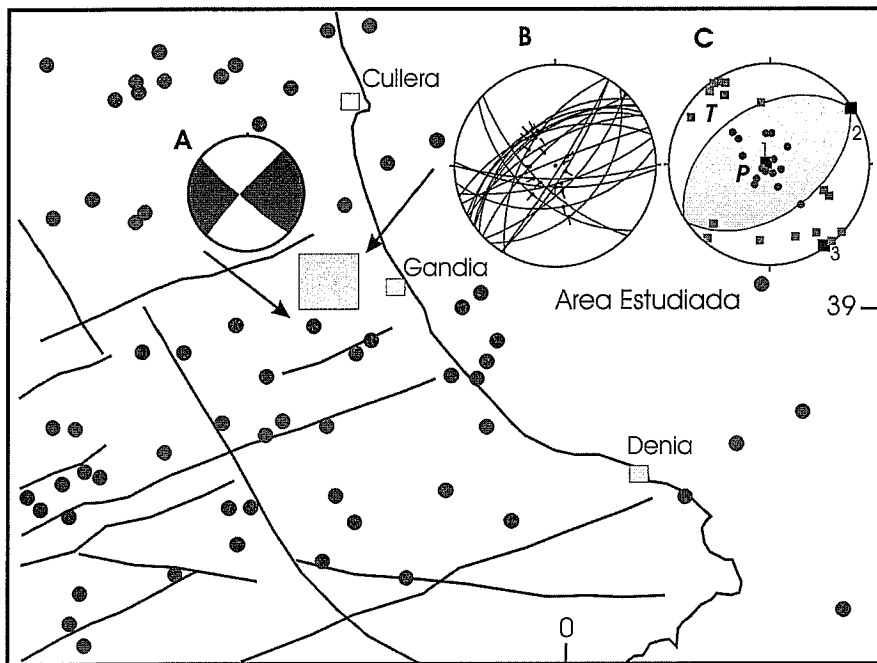


Fig. 3.- Mapa de situación del área estudiada donde se han representado los principales fracturas activas y los epicentros de terremotos (modificado de Rueda y Mezcua, 2003). A) Mecanismo focal de un sísmico con epicentro en la zona estudiada cuyos planos nodales coinciden con las dos direcciones principales de fracturación. B) Orientación de las fallas y estrías en el afloramiento estudiado. C) Diagrama P/T deducido para las fallas del afloramiento anterior.

Fig. 3.- Fracture and lineation map of the studied region. The instrumental earthquake epicenters have been plotting in this map (modified from Rueda and Mezcua, 2003). A- Earthquake focal mechanism from the studied area. B.- Stereographic plot with the faults and striations measured in the studied outcrop. C.- P/T diagram for the previous faults. A normal focal mechanism is deduced, concordant with the opening of the Valencia Trough.

mera etapa, lo que parece indicar que los materiales analizados no registran deformaciones superpuestas.

El análisis poblacional de las fallas del mismo afloramiento del que proceden las muestras macladas revela la existencia de los dos sistemas de fallas descritos anteriormente (ENE-OSO y NO-SE). Todas ellas son fallas normales (Fig. 3C) de pequeño salto. Se ha calculado mediante el método de Angelier y Mechler (1977). La posición de los ejes P y T para cada una de las fallas analizadas y un diagrama focal sintético para todas ellas, el resultado indica máxima compresión vertical, máxima extensión subhorizontal NO-SE y la posición del eje intermedio NE-SO. Estas orientaciones están probablemente relacionadas con la apertura reciente del Surco de Valencia y son compatibles con los mecanismos focales de terremotos de esta zona. Y aunque no coinciden con las trayectorias de esfuerzos recientes propuestas por Herraiz *et al.* (2000) para esa zona presenta una dirección ortogonal a la misma, lo que indica un mecanismo genético común.

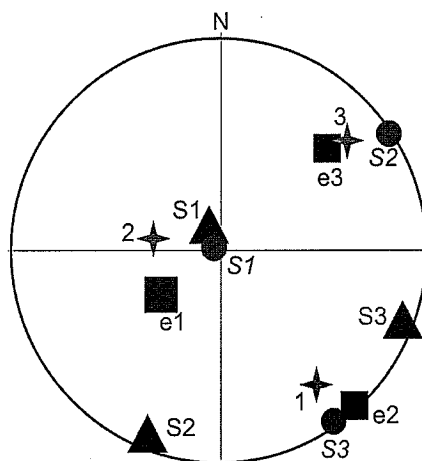


Fig.4.- Proyección estereográfica con las orientaciones de los ejes principales de esfuerzos deducidos del análisis de maclado (triángulos) y del análisis poblacional de fallas (círculos). También se han representado los resultados del análisis de la deformación mediante el método de Goshong (cuadrados) y Spang (estrellas).

Fig.4.- Stereographic plot with the principal stresses orientations deduced from fault analysis (circles) and from the e-twin analysis (triangles). The orientation of the principal strains has also been plotted; squares, results of the Goshong method and stars, results of the Spang numeric dynamic method.

Discusión y conclusiones

De la comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis poblacional de fallas y el análisis de las maclas mecánicas de calcita (Fig. 4) se puede deducir que los métodos de análisis del maclado permiten reconstruir con precisión las direcciones de los esfuerzos principales, incluso con escaso número de datos. Por otro lado, en regiones donde las deformaciones recientes tienen una cierta entidad, el análisis del maclado puede resultar un método interesante para determinar el tensor de esfuerzos reciente. En este sentido se está investigando si los depósitos cársticos alejados de zonas de falla contienen un número suficiente de cristales maclados para hacer este tipo de determinaciones. Si se comprueba este último punto, las maclas podrían ser una herramienta muy útil para establecer con precisión la orientación y forma del tensor de esfuerzos regional en zonas donde no se aprecien otras estructuras tectónicas, como fallas.

Agradecimientos

Agradecemos la ayuda prestada por M. Rocher para el análisis de datos mediante el método inverso de Etchecopar. Este trabajo ha sido financiado y forma parte de los objetivos del Proyecto BTE2002-01742 del MCyT.

Referencias

Angelier, J., Mechler, P. (1977): *Bull. Soc. Geol. France*, 19, 1309-1318.  
 Burkhard, M. (1993): *Jour. Struct. Geol.*, 15, 351-368.  
 Craddock, J.P., Nielson, K.J., Malone, D.H. (2000): *Jour. Struct. Geol.*, 22, 983-991.  
 Craddock, J.P. Farris, D.W., Roberson, A. (2004): *Geology*, 34, 49-52.  
 Ferrill, D.A. (1991): *Jour. Struct. Geol.* 13, 667-675.  
 Friedman, M., Heard, H.C. (1974): *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 58, 71-78.  
 González Casado, J.M., García-Cuevas, C. (2002): *Jour. Struct. Geol.* 24, 1777-1788.  
 Goshong, R.H., Jr. (1972): *Bull. Geol. Soc. Am.* 83, 2025-2048.  
 Goshong, R.H., Jr.; Pfiffner, O.A., Pringle, L.R. (1984): *Jour. Struct. Geol.* 6, 19-32.  
 Herraiz, M., De Vicente, G., Lindo, R., Giner-Robles, J., Simón, J.L., Gon-

- zález-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, M., Lucini, M. (2000): *Tectonics*, 19-4, 762-786.
- Lacombe, O. (2001): *Tectonics*, 20-6, 834-849.
- Laurent, Ph., Bernard, Ph., Vasseur, G., Etchecopar, A. (1981): *Tectonophysics* 78, 651-660.
- Laurent, Ph. (1984): Les macles de la calcite en tectonique. These Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 324 pp.
- Rocher, M., Lacombe, O., Angelier, J., Chen, W.H. (1996): *Tectonics*, 15, 984-996.
- Rocher, M., Baize, S., Jaillet, S., Cushing, E.M., Lozac'h, Y., Lemeille, F. (2003): *C.R. Geoscience*, 335, 701-708.
- Rowe, K.J., Rutter, E.H. (1990): *Jour. Struct. Geol.*, 12, 1-17.
- Rueda, J., Mezcuá, J. (2003): *Rev. Soc. Geol. España*, 15 (3-4) 159-173.
- Spang, J.H. (1972). *Bull. Geol. Soc. Am.* 83, 467-472.