

# Determinación de la naturaleza de la falla de Cerro Tajo (Macizo peridotítico de Carratraca) mediante termocronología de trazas de fisión

*Assessing the nature of the Cerro Tajo fault (Carratraca peridotite massif) using fission-track thermochronology*

J.J. Esteban <sup>(1)</sup>, J. Cuevas <sup>(1)</sup>, J.M. Tubía <sup>(1)</sup> y D. Seward <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco, a.p. 644, 48080 Bilbao, Spain

<sup>(2)</sup> Department of Earth Sciences, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, Switzerland

## ABSTRACT

*Fission-track thermochronology has been applied to assess the nature of the tectonic contact of Cerro Tajo, near Carratraca (Málaga). Zircon fission-track ages support the idea of the extensional nature of the Cerro Tajo fault, coherent with its NW movement and the omission of materials. Apatite fission-track ages have helped to constraint the displacement of the fault to between 20 and 17 Ma, meanwhile the resetting of one sample located in the fault contact may be associated with heat liberated during a late fault reactivation, fluids circulation or serpentinization.*

**Key words:** Alpujarride Complex, Los Reales nappe, fission-track thermochronology, tectonic contact.

*Geogaceta, 36 (2004), 43-46*  
ISSN:0213683X

## Introducción y encuadre geológico

La aparición de fallas de bajo ángulo está ampliamente reconocida en todas las Cordilleras Béticas. Sin embargo, en muchos de estos contactos asociados al colapso Mioceno de la cadena, la identificación del movimiento plantea numerosos problemas. Los criterios, tanto cinemáticos como metamórficos, habitualmente no llegan a ser discriminantes debido a las reactivaciones y plegamientos tardíos sufridos por estas estructuras. En estos casos problemáticos, una de las nuevas técnicas utilizadas para establecer su naturaleza, es la evolución temperatura-tiempo (T-t) de los materiales, mediante la termocronología por trazas de fisión (Thomson, 1998). Esta técnica es aplicable cuando los contactos se han originado en el dominio frágil de la corteza, y en ningún caso a profundidades superiores al de la isoterma de  $300 \pm 50^\circ\text{C}$ , que es la temperatura de bloqueo estimada para las trazas de fisión, en los circones de materiales con altas tasas de enfriamiento.

En este trabajo hemos aplicado técnicas de termocronología de baja temperatura en la determinación de la naturaleza del contacto de Cerro Tajo, situado en el macizo de Carratraca (Málaga) y que afecta a materiales del Complejo Alpujarride de las Zonas Internas de las

Cordilleras Béticas. A pesar del gran número de análisis geotermométricos realizados en los materiales de los Alpujarrides occidentales, la finalidad de éstos no ha sido otra que la de la determinación de sus tasas de enfriamiento, enfocadas a la modelización de su evolución P-T-t (Monié *et al.*, 1994; Sossion *et al.*, 1998; Sánchez-Rodríguez, 1998; Platt *et al.*, 2003). Por tanto, este trabajo representa el inicio con fines puramente estructurales, en la aplicación de las trazas de fisión al análisis cinemático de contactos mecánicos.

El Complejo Alpujarride está formado por un número variable de unidades tectónicas que, en función de la intensidad de su metamorfismo y de las características litológicas, ha sido agrupado en mantos inferiores, intermedios y superiores (Tubía *et al.*, 1992). El contacto de Cerro Tajo, situado a lo largo de la carretera A-357 (Fig. 1A) entre los municipios de Álora y Carratraca, constituye el borde meridional del macizo de Sierra de Aguas, uno de los dos macizos de peridotitas de los que se compone el macizo ultramáfico de Carratraca (Fig. 1A). Los macizos de peridotitas de Ronda forman la base del manto de Los Reales (Navarro-Vilá y Tubía, 1983). Estos macizos están cubiertos por un delgado nivel de kinzigitas y por una secuencia metapelíti-

ca (migmatitas, gneises, esquistos y filitas) con grados metamórficos variables, decrecientes hacia techo.

La falla de Cerro Tajo (Fig. 1B) actualmente muestra una dirección N40°E y un buzamiento de 40° hacia el SE. Las estructuras C-S desarrolladas en las serpentinitas de la zona de falla, señalan que el movimiento del bloque de techo fue hacia el norte (Argles, 1996; Esteban, 2003). La falla omite (Fig. 1A y B) la franja de kinzigitas característica de la secuencia metamórfica del manto de Los Reales y las peridotitas con granate, poniendo en contacto peridotitas con espinela de texturas porfiroclásticas en el bloque de muro y migmatitas brechificadas en el bloque de techo (Fig. 1B). Un interés suplementario del estudio del corte de Cerro Tajo es que en él se han reconocido por primera vez rodingitas en las peridotitas de Ronda (Esteban *et al.*, 2003a) datadas en 16,8 Ma (Esteban *et al.*, 2003b) y formadas a partir de los diques intruidos en las serpentinitas desarrolladas en el bloque de muro.

## Localización de las muestras y metodología

Las muestras estudiadas se recogieron a distancias entre cero y trescientos

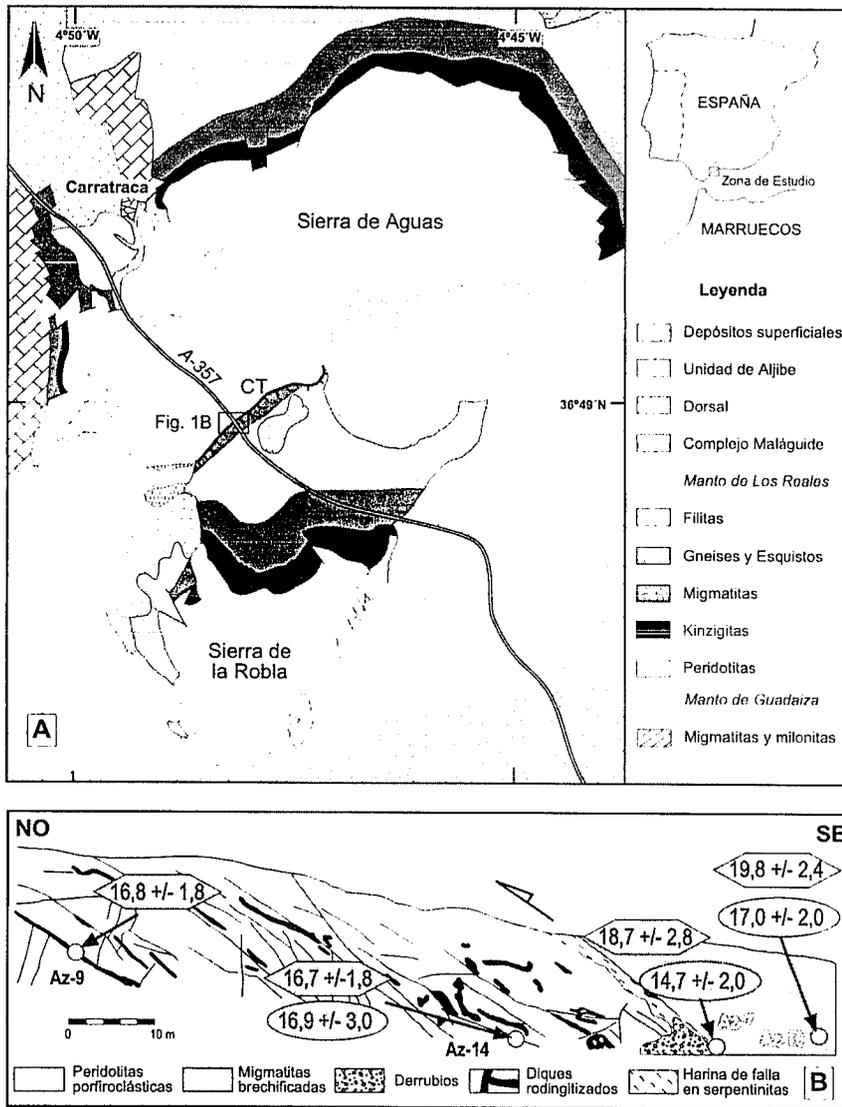


Fig. 1.- A) Localización geográfica y geológica del contacto de Cerro Tajo (CT) (Modificada de Argles *et al.*, 1999). B) Corte detallado de la falla de Cerro Tajo, incluyendo la localización y las edades de fisión obtenidas de las muestras estudiadas (hexágono: edad de fisión de los circones; elipse: edad de fisión de los apatitos; la localización de la muestra Az-14 se encuentra 280 m. hacia el norte desde la posición señalada).

Fig. 1.- A) Geographic and geological setting of the Cerro Tajo fault (CT) (Modified from Argles *et al.*, 1999). B) Detailed cross-section of the Cerro Tajo fault, including the location and fission tracks ages of the studied samples (hexagon: zircon fission track ages; ellipse: apatite fission track age; Az-14 sample location its located 280 m. toward the NW from its position).

metros del contacto de Cerro Tajo, tanto en el bloque de techo (Az-7; Az-10) como en el de muro (Az-9; Az-14) (Fig. 1B; Tabla 1). Los circones y los apatitos fueron obtenidos a partir de unos de 5 a 6 Kg. de muestra inicial, mediante técnicas convencionales de separación mineral. Una vez separadas las fases minerales, los apatitos y los circones fueron preparados para su análisis mediante trazas de fisión, según el método del detector externo (Fleischer *et al.*, 1975), usando los procedimientos rutinarios del laboratorio de trazas de fisión del ETH (Suiza) (Seward, 1989). Las muestras se irradiaron en el reactor nuclear de Ansto

(Australia). Para el cálculo de las edades de fisión se utilizaron valores de zeta de  $293,13 \pm 10,87$  para los apatitos y de  $100,48 \pm 2,71$  para los circones. Las trazas espontáneas e inducidas fueron contadas con un microscopio ZEISS con aumentos de 1250X para los apatitos y 1600X para los circones. Las edades presentadas se dan como edades centrales con un error de  $2\sigma$  (Galbraith, 1981).

**Resultados**

Se han obtenido tres edades de fisión en apatito y cuatro en circón para las

muestras estudiadas. Los apatitos presentan edades comprendidas entre  $14,7 \pm 2,0$  ( $2\sigma$ ) y  $17,0 \pm 2,0$  Ma ( $2\sigma$ ) y los circones entre  $16,7 \pm 1,8$  ( $2\sigma$ ) y  $19,8 \pm 2,4$  Ma ( $2\sigma$ ). Si se comparan las edades de fisión obtenidas con su situación en el techo y en el muro del contacto, se puede apreciar el notorio salto en las edades de fisión de los circones, observándose cómo en el bloque de techo siempre se obtienen edades de fisión más antiguas (19,8 y 18,7) que las procedentes del bloque de muro (16,8 y 16,7), aunque concordantes todas ellas con sus límites de error (Fig. 1B). Por su parte, las edades de fisión obtenidas en los apatitos apenas muestran saltos significativos en sus edades con respecto a su procedencia del techo y del muro, apreciándose únicamente una pequeña diferencia de edad en la muestra recogida en el propio contacto (Az-7). En esta muestra se ha obtenido una edad de  $14,7 \pm 2,0$  Ma ( $2\sigma$ ), ligeramente más joven que las demás (17,0 y 16,9 Ma).

La modelización cuantitativa de las trayectorias T-t para los parámetros obtenidos en los apatitos (edad de fisión, longitud media de las trazas horizontales y confinadas) se ha realizado mediante el programa Monte Trax (Gallagher, 1995) en combinación con las edades de fisión de los circones. Únicamente se han podido realizar en las muestras Az-7 y Az-10, debido a la imposibilidad de la obtención de un número significativo de trazas horizontales y confinadas en las muestras Az-9 y Az-14 (Fig. 2). Las dos modelizaciones realizadas muestran patrones dispares, aunque proceden de litologías similares distanciadas unos pocos de metros, lo que implica que el contacto de Cerro Tajo debió de contribuir a tal diferenciación (Fig. 2). Debido a que el programa Monte Trax únicamente modeliza las trayectorias T-t comprendidas en el intervalo de temperatura entre  $110^\circ$  y  $60^\circ\text{C}$  (zona de asimilación parcial del apatito), el resto de las trayectorias deberán de interpretarse con cautela. La muestra más alejada del contacto (Fig. 2A) presenta tasas de enfriamiento del orden de  $100^\circ\text{C}/\text{Ma}$ , en el intervalo de tiempo comprendido entre 20 y 17,5 Ma aproximadamente, similares a otras obtenidas en los mantos Alpujarrides occidentales (Monié *et al.*, 1994; Sánchez-Rodríguez, 1998). Le sigue una evolución T-t marcada por un ligero recalentamiento, y posteriormente, otra con tasas de enfriamiento inferiores a  $10^\circ\text{C}/\text{Ma}$ . En contraposición, la evolución T-t de la muestra más cercana al contacto dentro de la zona de asimilación parcial del apatito, se caracteriza por presentar tasas de enfriamiento inferiores a

Muestra	Litología	Mineral	Distancia del contacto (m)	Nº de granos	$\rho_d (N_d)$ ( $10^6 \text{ t/cm}^2$ )	$\rho_s (N_s)$ ( $10^6 \text{ t/cm}^2$ )	$\rho_i (N_i)$ ( $10^6 \text{ t/cm}^2$ )	U (ppm)	PX <sup>2</sup> (%)	Var (%)	Edad central $\pm 2\sigma$ (Ma)	Longitud media $\pm 1\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	D. Est. ( $\mu\text{m}$ )
AZ-7	Migmatita	Apatito	0	24	1,178 (7422)	0,1953 (282)	2,286 (3301,0)	24,3	56,7	10,26	14,7 $\pm$ 2,0	14,04 $\pm$ 0,16 (98)	1,40
AZ-10	Migmatita	Apatito	25 al SE	29	1,316 (7422)	0,2635 (363)	3,003 (4136,3)	28,5	46,7	9,04	17,0 $\pm$ 2,0	14,16 $\pm$ 0,13 (93)	1,26
AZ-14	Dique	Apatito	300 al NW	14	1,270 (7422)	0,362 (144)	3,969 (1581)	39,1	98,0	0,00	16,9 $\pm$ 3,0	14,26 $\pm$ 0,23 (46)	1,58

Muestra	Litología	Mineral	Distancia del contacto (m)	Nº de granos	$\rho_d (N_d)$ ( $10^6 \text{ t/cm}^2$ )	$\rho_s (N_s)$ ( $10^6 \text{ t/cm}^2$ )	$\rho_i (N_i)$ ( $10^6 \text{ t/cm}^2$ )	U (ppm)	PX <sup>2</sup> (%)	Var (%)	Edad Central $\pm 2\sigma$ (Ma)
AZ-7	Migmatita	Circón	0	16	0,3604 (2175)	4,081 (403)	3,951 (390,2)	438,5	73,6	0,29	18,7 $\pm$ 2,8
AZ-9	Dique	Circón	100 al NW	20	0,3462 (2175)	3,642 (763)	3,768 (809,9)	435,3	50,3	3,49	16,8 $\pm$ 1,8
AZ-10	Migmatita	Circón	25 al SE	23	0,3367 (2175)	4,050 (670)	3,450 (570,7)	409,8	99,4	0,01	19,8 $\pm$ 2,4
AZ-14	Dique	Circón	300 al NW	19	0,3130 (2175)	3,785 (760)	3,561 (715,0)	455,1	77,5	2,73	16,7 $\pm$ 1,8

$\rho_d$ : Densidad de trazas en el patrón.

$\rho_s$ : Densidad de trazas espontáneas.

$\rho_i$ : Densidad de trazas inducidas.

U: Concentración de uranio en la muestra.

PX<sup>2</sup>: Test de probabilidad de encontrar más de una población de cristales (Galbraith, 1981).

Var.: Varianza.

D. St.: Desviación estándar.

Todas las edades se dan como edades centrales (Galbraith, 1981). Las edades de los apatitos fueron utilizadas usando el patrón CN-5 con un factor  $\zeta$  de 293,13, mientras que para el cálculo de las edades de los circones se utilizó el patrón CN-1 y un valor de  $\zeta$  de 100,48. Las muestras se irradiaron en ANSTO, Lucas Heights, Australia.

$N_d$ : Número de trazas contadas en el patrón.

$N_s$ : Número de trazas espontáneas contadas.

$N_i$ : Número de trazas inducidas contadas.

Tabla I.- Datos analíticos de trazas de fisión de las muestras recogidas a lo largo de la falla de Cerro Tajo.

Table I.- Fission track data from the samples taken along the Cerro Tajo fault.

10°C/Ma (Fig. 2B), similar a la evidenciada por la modelización anterior.

## Discusión

La existencia de contactos extensionales plegados ya ha sido evidenciada anteriormente dentro del manto de Los Reales, por Tubía (1994), en el borde nororiental del macizo ultramáfico de Sierra Alpujata. Los datos estructurales de los que se dispone para el contacto de Cerro Tajo permiten sugerir dos posibles soluciones geométricas a la cinemática y a la omisión de parte de la secuencia inferior del manto de Los Reales: a) un contacto extensional plegado, o b) un cabalgamiento fuera de secuencia.

Los presencia de rocas con edades de fisión de circones más antiguas en el bloque de techo que en el de muro apoyan la idea de la naturaleza extensional del contacto, delimitando en 20-19 Ma, la edad máxima para su desarrollo. Esta edad es coherente con las dataciones previas (aprox. 22 Ma) presentes en las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas para el metamorfismo alpino de alta temperatura y para el emplazamiento de mantos (e.j.:

Platt y Whitehouse, 1999; Sánchez-Rodríguez y Gebauer, 2000). La similitud entre las edades de fisión de los apatitos en ambos bloques exceptuando la muestra Az-7, indica que las dos muestras (Az-10 y Az-14) alcanzaron a la vez la temperatura de cierre para las trazas de fisión, y que por lo tanto, la edad de 17-16,7 Ma, ha de corresponder a la edad mínima para su funcionamiento extensional. La edad de los apatitos de la muestra Az-7 y su modelización térmica (Fig. 2B), podrían explicarse por un rejuvenecimiento de la muestra en torno a 15 Ma, asociado a ascensos de temperaturas locales, mayores de 110°C (temperatura de cierre de los apatitos) y nunca superiores a los 300°C (temperatura de cierre de los circones), debido a que los apatitos se ven rejuvenecidos en contraposición a los circones. Además, el análisis de difracción de rayos X de las harinas de falla en las serpentinitas ha confirmado que el único polimorfo de la serpentina existente es la lizardita (Esteban, 2003), quedando delimitada la temperatura máxima de la formación de ésta en 350°-400°C (e.j.: Peacock, 1987). Estas elevaciones de

temperatura están acotadas espacialmente, ya que las muestras situadas en las proximidades del contacto únicamente registran un ligero aumento de temperatura en sus trayectorias T-t (Fig. 2A), ligadas probablemente al calor de fricción liberado durante posibles reactivaciones tardías no detectadas en el contacto, circulación de fluidos hidrotermales o incluso debido al calor liberado durante la serpentización, ya que ésta forma parte de un proceso exotérmico (O'Hanley, 1992).

## Conclusiones

Las edades obtenidas en este trabajo mediante termocronología de trazas de fisión han permitido: a) confirmar la naturaleza extensional para la falla de Cerro Tajo, y b) delimitar su periodo de actividad entre 20-16,7 Ma. Asimismo, la presencia de una muestra recogida en la zona de contacto, con edades sensiblemente inferiores a las de bloque de techo y muro, plantea la hipótesis de la existencia de procesos de rejuvenecimiento de las edades de fisión asociadas a incrementos de temperatura inferiores a 300°C.

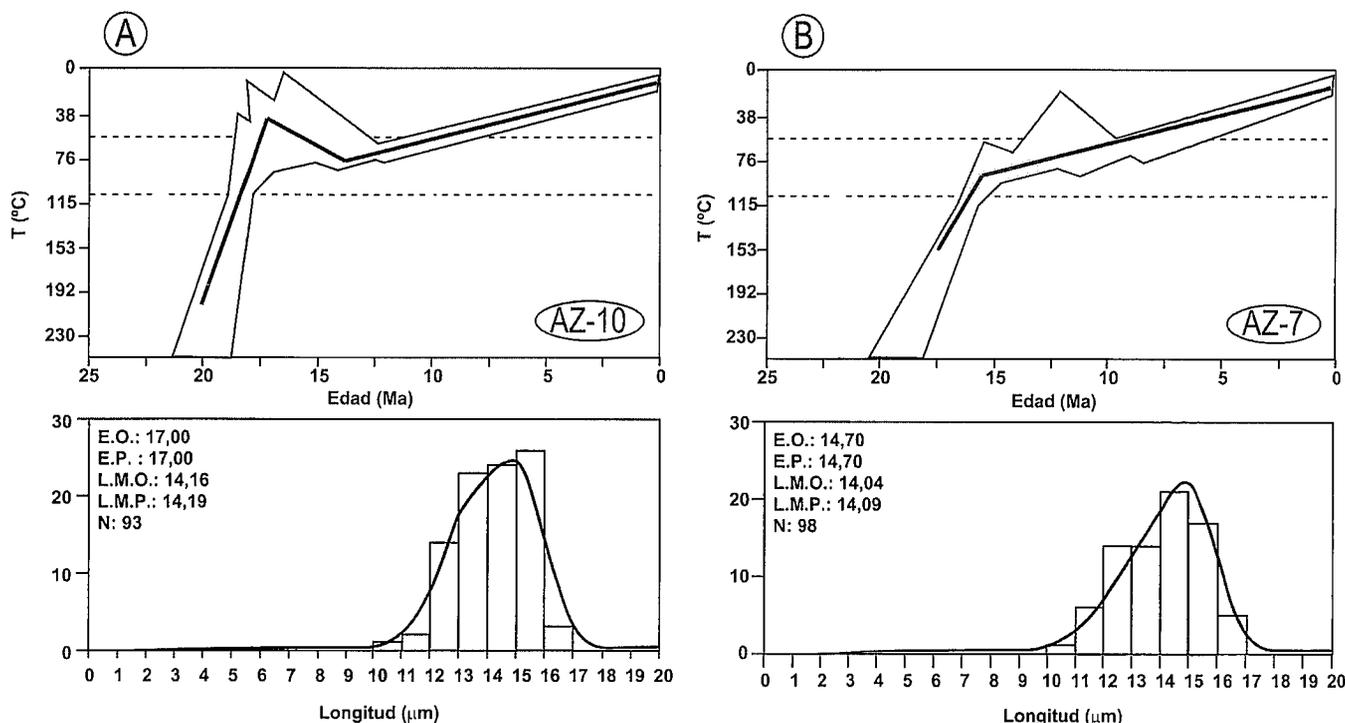


Fig. 2.- Modelizaciones térmicas realizadas para los apatitos de las muestras estudiadas usando el algoritmo Monte Carlo (Gallagher, 1995). La línea oscura de la trayectoria T-t representa la mejor trayectoria teórica obtenida, mientras que el área sombreada representa las mejores cincuenta soluciones. La distribución de la longitud de las trazas horizontales y confinadas viene representada por los histogramas. A) Muestra Az-10, B) Muestra Az-7 (E.O.: edad observada; E.P.: edad predecida; L.M.O.: longitud media observada; L.M.P.: longitud media predecida).

Fig. 2.- Apatite thermal modelling using Monte Carlo algorithm (Gallagher, 1995). The dark line in the T-t plots represents the best-fit solution, since the shaded area represents the 50 best-fit solutions. The histogram shows the track length distribution. A) Az-10 sample, B) Az-7 sample (E.O.: observed age; E.P.: predicted age; L.M.O.: observed mean length; L.M.P.: predicted mean length; N: number of confined and horizontal tracks).

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación BTE 2001-0634 (Ministerio de Ciencia y Tecnología) y U.P.V. 0001.310-14478/2002.

**Referencias**

Argles, T.W. (1996): *Tesis Doctoral*. Univ. Oxford, 242 p.

Argles, T.W. Platt, J.P. y Waters, D.J., (1999): *J. Geol. Soc. London*, 156, 149-162.

Esteban, J.J. (2003). *Tesis Doctoral*. Univ. del País Vasco, 322 p.

Esteban, J.J. Cuevas, J., Tubía J.M. y Yusta I. (2003a): *Can. Mineral.*, 41, 161-170.

Esteban, J.J. Cuevas, J., Seward, D. y J.M. Tubía. (2003b): *Geogaceta*, 34, 23-26.

Fleischer, R.L., Price, P.B. y Walker, R.M. (1975): *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Application*. Univ. California, Berkeley, 605 p.

Galbraith, R.F. (1981): *Mathematical Geology*, 13, 471-478.

Gallagher, K. (1995): *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136, 421-435.

Monié, P., Torres-Roldán, R.L. y García-Casco, A. (1994): *Tectonophysics*, 238, 353-379.

Navarro-Vilá, F. y Tubía, J.M. (1983): *C. R. Acad. Sci. París*, 296, 111-114.

O'Hanley, D.S. (1996): *Serpentinites. Records of Tectonic and Petrological History*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 34, Oxford University Press, 277 p.

Peacock, J.M. (1987): *Contr. Mineral. Petrol.*, 95, 55-70.

Platt, J.P. y Whitehouse, M.J. (1999): *Earth Planet. Sci. Lett.* 171, 591-605.

Platt, J.P., Whitehouse, M.J., Kelley, S.P., Carter, A. y Hollick, L. (2003): *Geology*, 31, 251-254.

Sánchez-Rodríguez, L. (1998): *Tesis Doctoral*. Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETH), 168 p.

Sánchez-Rodríguez, L. y Gebauer D. (2000): *Tectonophysics*, 316, 19-44.

Seward, D. (1989): *Chem. Geol.*, 79, 501-531.

Sosson, M., Morillon, A., Bourgois, J., Feraud, G., Poupeau, G. y Saint-Marc, P. (1998): *Tectonophysics*, 285, 253-273.

Thomson, S.N. (1998): *Terra Nova*, 10, 32-36

Tubía, J.M. (1994): *Tectonophysics*, 238, 381-398.

Tubía, J.M., Cuevas, J., Navarro-Vilá, F., Alvarez, F. y Aldaya, F. (1992): *J. Struc. Geol.*, 14, 193-203.