

# Análisis de la fracturación en los afloramientos mesozoicos del suroeste español

## Fracture analysis in the Mesozoic outcrops of southwestern Spain

E. García Navarro, M. V. Perelló Lull y C. Fernández Rodríguez

Departamento de Geología, Universidad de Huelva. Campus de La Rábida, 21819-Palos de la Frontera (Huelva)

### ABSTRACT

The Mesozoic outcrops of southwestern Spain show a complex succession of sedimentary and volcanic rocks. Their deposition is related to the first episodes of rifting between Africa and Iberia that took place from the Late Triassic to the Early Jurassic. Subsequent tectonic events generated brittle post-lithification structures, mainly normal faults and joints. The use of inverse methods of fault analysis to evaluate the stress and strain tensors that originated these structures, reveals a first episode of N-S extension, closely followed by an E-W extension. This tectonic evolution, tentatively dated as Early Cretaceous, can be explained in the context of the eastwards movement of the African plate with respect to Iberia along a transtensional, sinistral shear band.

**Key words:** fault analysis, Mesozoic, SW Spain.

Geogaceta, 18 (1995), 7-10  
ISSN: 0213683X

### Introducción y situación geológica

Las rocas de edad mesozoica que aparecen en el borde noroccidental de la Cuenca del Guadalquivir, están ligadas a dos afloramientos de escasas dimensiones, que se encuentran en las proximidades de dos localidades de la provincia de Huelva: Ayamonte y Niebla (fig. 1). Las secuencias estratigráficas de ambas áreas han sido correlacionadas entre sí por sus similares características litoestratigráficas (Leyva y Ramírez, 1979; Ramírez y Leyva, 1979), si bien la ausencia de fauna no ha permitido una datación paleontológica precisa. El sustrato, sobre el que descansan de forma discordante, lo constituyen materiales de edad carbonífera deformados durante la orogenia hercínica. Las distintas unidades rocosas que conforman estos dos afloramientos muestran orientaciones parecidas con direcciones próximas a la E-W y buzamientos al Sur en torno a 20°-30° (Fig. 1).

Las rocas mesozoicas de Ayamonte representan el afloramiento más oriental de la Cuenca del Algarve. En la sucesión estratigráfica de dicha área, con una potencia aproximada de 1000 m, pueden distinguirse de muro a techo las siguientes unidades litológicas:

-Un conjunto formado por areniscas rojas y conglomerados. Su edad es atribuible al Triásico superior por correlación estratigráfica con la Formación Areniscas de Sil-

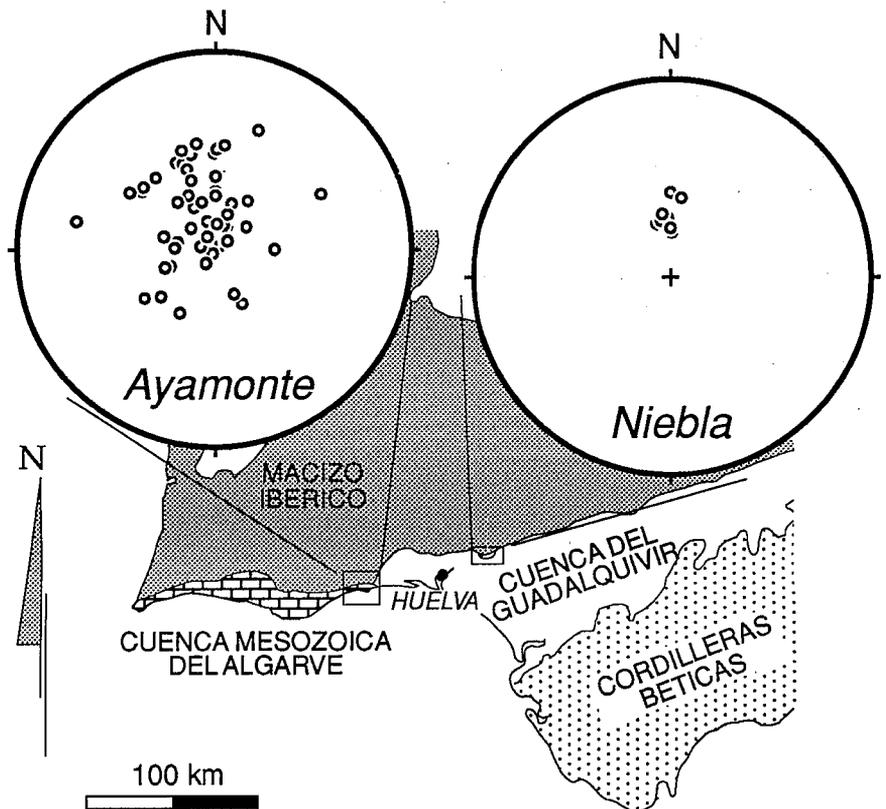


Fig. 1.- Situación geológica de los afloramientos estudiados. Diagramas de proyección equiareal, en el hemisferio inferior, de polos de planos de estratificación. Ayamonte: 75 polos. Niebla: 10 polos.

Fig. 1.- Geological setting of the studied outcrops. Equal-area, lower-hemisphere projection of poles to bedding. Ayamonte: 75 poles. Niebla: 10 poles.

ves (Palain, 1976).

-Una serie alternante de lavas basálticas, rocas piroclásticas de extrema variabilidad, y calizas intercaladas.

-Una formación carbonatada que se encuentra casi totalmente brechificada. Su techo se encuentra cubierto por las sucesiones neógenas de la Cuenca del Guadalquivir.

A estas dos últimas unidades se les asigna en este trabajo una edad Triásico superior-Jurásico inferior por comparación con sucesiones equivalentes del sureste de la cuenca del Algarve (Oliveira, 1989).

En el área de Niebla la potencia de la sucesión mesozoica aflorante no sobrepasa los 25m. En ella puede distinguirse una unidad inferior esencialmente carbonatada que de muro a techo se encuentra formada por unas margas grises, un conjunto de calizas y calizas dolomíticas de color gris con abundantes estructuras sedimentarias, y por último unas dolomías rosas laminadas y bastante recrystalizadas. De acuerdo con los datos obtenidos a partir de sondeos mecánicos y mediante el uso de métodos geofísicos y de técnicas de correlación regional, Ramírez y Leyva (1979) han propuesto una edad Triásica para esta unidad, asignándola a la facies Muschelkalk. La unidad superior se haya integrada por una secuencia de materiales volcanoclásticos fundamentalmente de tamaño ceniza, sobre los que descansan lavas basálticas con estructura almohadillada. La edad de esta serie submarina ha sido atribuida genéricamente al Triásico (Ramírez y Leyva, 1979).

El origen de estos materiales está ligado al desarrollo de cuencas con una importante actividad tectónica sinsedimentaria, lo que queda reflejado por la naturaleza de los eventos magmáticos, por la complejidad de las series sedimentarias y por la presencia de diferentes tipos de estructuras debidas a deformación previa a la litificación de los sedimentos (García Navarro *et al.* en prensa). Tanto las rocas sedimentarias como las volcánicas muestran estructuras de deformación frágil posteriores a la litificación de los materiales a los que afectan, de acuerdo con los diversos criterios enunciados en el texto de Maltman (1994): no hay compactación diferencial ni cambio de potencias entre dos bloques de una misma falla, las fracturas suelen aparecer rellenas, con crecimientos fibrosos, limpios, de calcita o de yeso, y se producen roturas de granos o incluso de bloques al ser atravesados por fracturas (García Navarro *et al.* en prensa).

En este trabajo se hace un estudio del régimen de esfuerzos que originó la deformación frágil post-litificación asociada a estos dos afloramientos mesozoicos, utili-

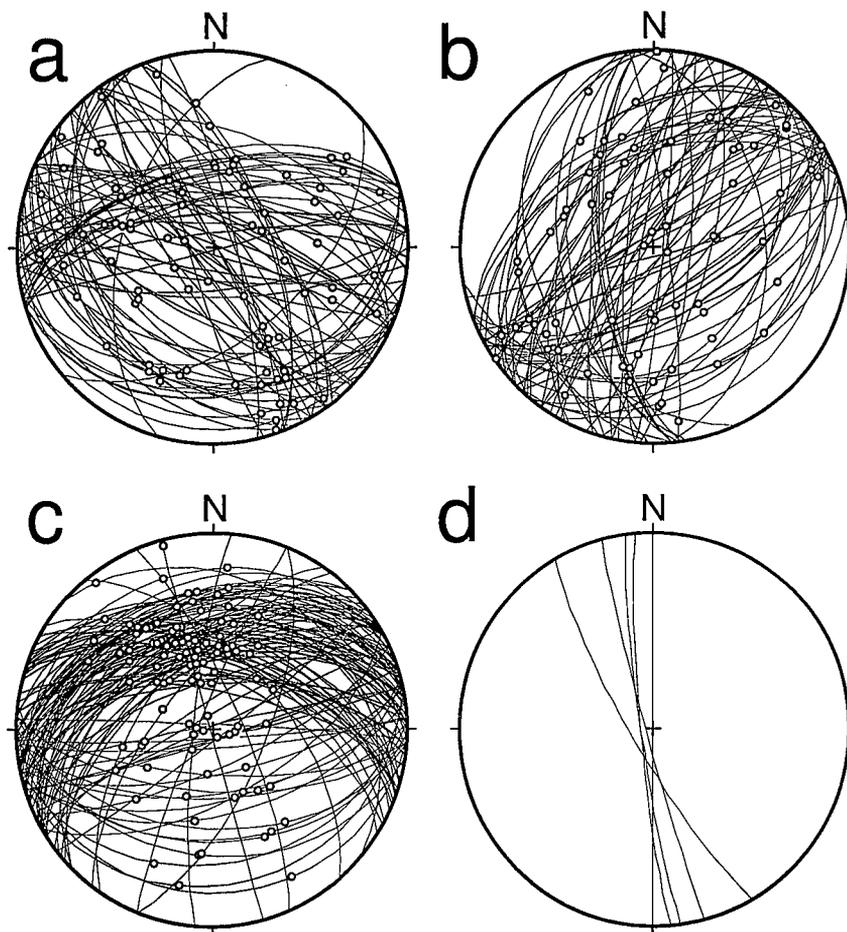


Fig. 2.- Proyección de las estructuras frágiles medidas. Los planos de las fracturas se representan mediante círculos mayores, y las estrías mediante círculos huecos. Proyección equiareal, hemisferio inferior. a) Fallas del sistema 1 de Ayamonte. 82 datos. b) Fallas del sistema 2 de Ayamonte. 78 planos de falla y 71 estrías. c) Fallas de Niebla. 117 planos de falla y 112 estrías. d) Diaclasas del área de Niebla. 5 datos.

Fig. 2.- Diagrams showing the brittle structures in the studied area. Great circles correspond to fault or joint planes, and the small open circles to slickenside striations. Equal-area, lower-hemisphere projections. a) System -1 faults of the Ayamonte area. 82 data. b) System-2 faults of the Ayamonte area. 78 fault planes, and 71 striae. c) Faults of the Niebla area. 117 fault planes and 112 striae. d) Joints in the Niebla area. 5 data.

zando diversos métodos de análisis poblacional de fallas. Con ello se aporta nueva información que sirve para precisar los acontecimientos tectónicos ocurridos durante los primeros momentos del Ciclo Alpino en el sector suroccidental de Iberia.

#### Descripción de las estructuras de eformación frágil posteriores a la itificación

En ambas áreas se ha realizado una medida sistemática de fallas y diaclasas. En todos los casos se han considerado fallas con desplazamientos pequeños, evitándose las zonas cercanas a grandes fallas cuya presencia puede provocar una perturbación local del campo de esfuerzos. Los principales criterios cinemáticos utilizados han sido

los escalones de recrystalización (Hancock, 1985) y el desplazamiento de capas de distinta composición.

En la zona de Ayamonte todas las fallas son fundamentalmente normales, con una componente menor de movimiento en dirección. Se han podido distinguir dos sistemas de fallas. Sistema 1: fallas de dirección WNW-ESE y con buzamientos tanto al N como al S (Fig. 2a). Sistema 2: fallas orientadas en dirección NE-SW, mostrando buzamientos al SE y al NW (Fig. 2b). Los planos de este segundo sistema cortan y desplazan estadísticamente a los del sistema WNW-ESE, por lo que su generación debió ser posterior. No obstante, se encuentran ejemplos locales de relaciones de corte contrarias. Esto, junto con la similitud geométrica y cinemática de ambos sistemas, su-

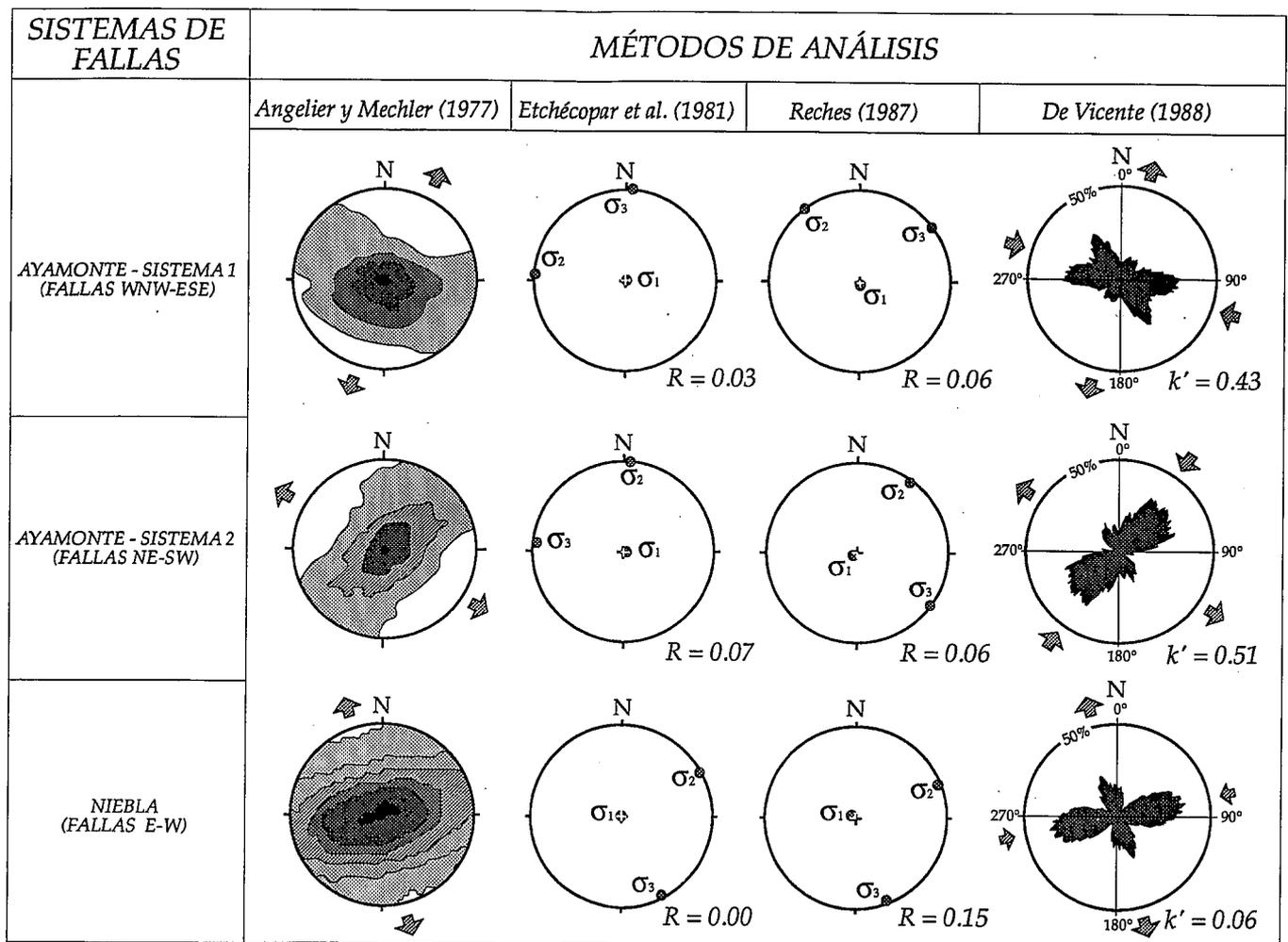


Fig. 3.- Resultados gráficos del análisis poblacional de fallas mediante los distintos métodos empleados. Proyección equiareal y en el hemisferio inferior. El significado de  $R$  y  $k'$  se indica en el texto. Las tramas de los diagramas de diedros rectos (Angelier y Mechler, 1977) varían desde 100% de distensión (áreas en blanco) hasta 100% de compresión (áreas en negro). Los resultados por el método de De Vicente (1988) representan rosas de direcciones de  $e_y$  (dirección de máximo acortamiento en la horizontal).

Fig. 3.- Results of the stress and strain determination from the fault striation analysis. Equal-area, lower-hemisphere projection. See text for the significance of  $R$  and  $k'$ . Patterns in the right-dihedra diagrams (Angelier and Mechler, 1977) range from the 100%-tension (white) to the 100%-compression (black). The results of the De Vicente (1988) method are represented as rose diagrams of  $e_y$  (azimuth of the maximum shortening axis in the horizontal).

giere una evolución compleja de la fracturación en el espacio y en el tiempo, con una actividad inicial del sistema 1, y un aumento progresivo de la importancia del sistema 2.

En el área de Niebla sólo aparece un sistema que sigue la dirección aproximada E-W, con buzamientos al norte y al sur. Se trata de fallas normales con estrías que presentan cabeceos altos (Fig. 2c). Este sistema provoca la activación como fallas de los planos de estratificación, que se llegan a presentar brechificados. Otro rasgo característico de la zona es la presencia de un diaclasado de orientación muy constante, próxima a la N-S, que afecta a los carbonatos de la unidad inferior (Fig. 2d). Estas diaclasas, pueden presentar aberturas centimétricas, en cuyo caso se encuentran rellenas por el material volcánico suprayacente.

### Metodología del análisis poblacional

Para determinar el régimen de esfuerzos que originó el deslizamiento en estos sistemas de fallas, se aplicaron diversos métodos de análisis poblacional de entre los numerosos existentes. En este trabajo se asume el siguiente convenio para la magnitud relativa de los esfuerzos principales:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Como una primera aproximación a la determinación de las direcciones de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , se utilizó el método de los diedros rectos, de Angelier y Mechler (1977).

Del grupo de métodos basados en la ecuación de Bott (1959), se han aplicado a nuestro estudio dos de ellos: el método de Etchécopar *et al.*, (1981) y el de Reches (1987). El primero de ellos calcula, mediante un proceso iterativo, la orientación de los ejes principales del esfuerzo y la

relación  $R$  entre las magnitudes de estos esfuerzos, siendo  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . El método se fundamenta en la búsqueda del resultado que minimice el error entre las estrías teóricas calculadas para un tensor de esfuerzos dado y las estrías reales medidas. El método de Reches (1987) considera además un criterio de rotura, calculando las orientaciones y magnitudes de los esfuerzos principales para coeficientes de fricción comprendidos entre 0 y 2, y aportando un valor de cohesión media relativa para cada solución. De esta forma es posible elegir la solución más adecuada dentro del rango de tensores de esfuerzo propuestos, evaluando cuál de ellos corresponde a los parámetros de rotura más realistas para un contexto geológico dado.

Por último se contrastaron estas soluciones con las obtenidas mediante el mode-

lo de deslizamiento (Reches, 1983; De Vicente, 1988). Este modelo calcula la orientación de los ejes de deformación y la relación entre ellos (parámetro  $k'$ ) partiendo de una formulación basada, entre otras premisas, en la necesidad de que los sistemas de fallas activos presenten una simetría ortorrómbica. Este requisito pretende hacer coincidir el modelo teórico con las geometrías encontradas en los experimentos de fracturación realizados por Reches y Dieterich (1983).

## Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 3. En todos los casos puede encontrarse una característica común: la dirección de  $\sigma_1$ , es decir, del máximo esfuerzo principal, es vertical o subvertical y los valores de  $R$  son próximos a cero.

Para el sistema 1 del área de Ayamonte (fallas de dirección WNW-ESE), el método de los diedros rectos indica que  $\sigma_3$  se orienta en la dirección NNE-SSW. Los métodos de Etchécopar *et al.* (1981) y de Reches (1987) confirman estos resultados. Por último, el modelo de deslizamiento desarrollado por De Vicente (1988) para establecer la dirección de acortamiento máximo en la horizontal, aporta soluciones próximas a la dirección ESE-WNW, en coincidencia con las predicciones de los métodos basados en el cálculo del tensor de esfuerzos. En el caso del sistema 2 de Ayamonte (fallas de dirección NE-SW),  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  se disponen según las direcciones NNE-SSW y WNW-ESE, respectivamente. La dirección NNE-SSW de acortamiento máximo en la horizontal, que propone el método de De Vicente (1988), es coherente con los resultados de los otros métodos. La similitud en la orientación de los ejes principales de los tensores de esfuerzo deducidos para ambos sistemas, parece indicar que el tránsito entre ambos se produjo mediante un simple intercambio entre los ejes  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . Este intercambio vendría favorecido por la forma casi radial de ambos tensores ( $R$  próximo a 0).

Para las fallas E-W de Niebla,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  se hallan en las direcciones ENE-WSW y NNW-SSE, respectivamente. Todos los métodos empleados arrojan una solución similar. La forma del tensor de esfuerzos tiende también a ser radial. Con el fin de evaluar si la fracturación se produjo con anterioridad al basculamiento mostrado por la serie mesozoica (Fig. 1), se han reproducido los resultados del método de Etchécopar *et al.*, (1981) variando la orientación del tensor de partida de la iteración, tal y como sugieren estos autores. El resultado final converge hacia la misma solución, demostrando que la fracturación es posterior al basculamiento, lo que refuerza además la hipótesis de que las fallas actuaron sobre

materiales ya litificados (Etchécopar *et al.*, 1981). La orientación de las diaclasas en esta zona (Fig. 2e) es compatible con una distensión E-W, que sería posterior a la producida por el sistema principal de fallas, puesto que el diaclasado las afecta.

## Discusión

Las semejanzas litológicas y estructurales entre los dos afloramientos estudiados son grandes. Además, la coincidencia en orientación y forma de algunos de los tensores descritos en cada zona, permiten sugerir la actuación de una extensión regional de dirección aproximada N-S (sistema 1 de Ayamonte y fallas E-W de Niebla), seguida sin solución de continuidad por una extensión E-W. Esta última estaría representada por las fallas del sistema 2 de Ayamonte y por el diaclasado de Niebla, si bien en este caso la correlación entre afloramientos no es tan clara como para los tensores anteriores.

El registro stratigráfico en los afloramientos estudiados es muy escaso (Triásico superior a Jurásico inferior), por lo que la correlación de los resultados obtenidos con los de otros sectores del suroeste de Iberia descansa esencialmente en la naturaleza y orientación de los tensores de esfuerzo y deformación. En este sentido, la extensión de dirección N-S se correspondería con la identificada por Lepvrier y Mougénot (1984) en el Algarve oriental. Estos autores consideran que dicho evento tuvo lugar durante el Cretácico inferior. En nuestro área, esta extensión evoluciona con el tiempo a otra de dirección E-W. Una evolución similar, aunque con una rotación progresiva de los ejes principales del esfuerzo, ha sido propuesta por Brede *et al.*, (1992) para los afloramientos mesozoicos del noroeste de África, y sería debida al movimiento hacia el este de la Placa Africana con respecto a la Placa Ibérica que tuvo lugar desde el Jurásico medio hasta el Oligoceno. La apertura del Atlántico central sería una importante consecuencia de este movimiento, que se produciría a lo largo de una ancha banda transtensional senestra de dirección E-W: zona de falla de Newfoundland-Gibraltar (Brede *et al.*, 1992). Las estructuras frágiles de los afloramientos estudiados conformarían por tanto el reflejo local en el sur de la Península Ibérica de la evolución tectónica transtensional de la banda de Newfoundland-Gibraltar.

## Conclusiones

Los afloramientos mesozoicos del suroeste de Iberia (parte española) reflejan un primer episodio de *rifting* durante el Triásico superior y Jurásico inferior, acompañado de una significativa actividad volcánica. Estas características son comparables a las que se desarrollaban

en el Algarve y en el noroeste de África durante el mismo período de tiempo (Ziegler, 1988). Con posterioridad, probablemente en el Cretácico inferior, se produce una importante fracturación frágil, con el desarrollo de fallas normales. El eje  $\sigma_3$  se dispondría inicialmente en la dirección N-S, sufriendo después una permutación con el eje  $\sigma_2$ , de modo que acabó actuando en la dirección E-W. Una evolución similar ha sido identificada también en el noroeste de África, y coincidiría con el movimiento transtensional senestro ligado a la apertura del Atlántico central y a la rotación hacia el este de África con respecto a Iberia.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con ayuda de los fondos del proyecto CICYT PB91-0600. Se agradecen asimismo las ayudas concedidas por la Junta de Andalucía (PAI 4108) y por la Universidad de Huelva.

## Referencias

- Angelier, J. y Mechler, P. (1977): *Bull. Soc. Geol. France*, 7, 1309-1318.
- Bott, M.H.P. (1959): *Geol. Mag.*, 96, 109-117.
- Brede, R.; Hauptmann, M. y Herbig, H.G. (1992): *Geol. Rundschau*, 81(1), 127-141.
- De Vicente, G. (1988): *Tesis Doctoral*, Universidad Complutense de Madrid, 308 pp.
- Etchécopar, A.; Vasseur, G. y Daignieres, M. (1981): *Jour. Struct. Geol.*, 3(1), 51-65.
- García Navarro, E.; Fernández Rodríguez, C. y Castro, A. (en prensa): *Gaia*.
- Hancock, P.L. (1985): *Jour. Struct. Geol.*, 7 (3/4), 437-457.
- Lepvrier, C. y Mougénot, D. (1984): *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 25(4), 291-305.
- Leyva, F. y Ramírez, J. (1979): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 998 (Ayamonte) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000, IGME.
- Maltman, A. (ed.) (1994): *The geological deformation of sediments*. Chapman & Hall. London. 362 pp.
- Oliveira, J. T. (Coord.) (1989): *Carta Geológica do Sul de Portugal (1:200.000)*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Palain, c. (1976): *Mem. Serv. Geol. Portugal*, 25: 377 pp.
- Ramírez, J. y Leyva, F. (1979): *Mapa y memoria explicativa de la Hoja 982 (La Palma del Condado)* del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000, IGME.
- Reches, Z. (1983): *Tectonophysics*, 95, 133-156.
- Reches, Z. (1987): *Tectonics*, 6 (6), 849-861.
- Reches, Z. y Dieterich, J. (1983): *Tectonophysics*, 95, 111-132.
- Ziegler, P.A. (1988): *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, 43.