

# Estado actual de esfuerzos en Béticas y Alborán a partir del análisis de “breakouts”

Present-day stress field in the Betics and the Alboran Basin from breakout analysis

F. Fernández-Ibáñez <sup>(1)</sup>, J.I. Soto <sup>(1)</sup> y M.D. Zoback <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva s/n, Universidad de Granada. 18002. Granada (España). E-mail: fferiba@ugr.es, jsoto@ugr.es.

<sup>(2)</sup> Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, California 94305-2215, USA. E-mail: zoback@pangea.stanford.edu

## ABSTRACT

Logging data from several onshore and offshore deep wells located at the South-Iberian Margin were selected to perform breakout analysis. Every data used to determine the orientation of breakouts come from magnetically oriented four-arm caliper which is part of the dipmeter logging tool. Most of the wells were drilled through Plio-Quaternary and late Miocene sediments, in cases reaching the metamorphic basement. Breakouts zones have been recognized in 6 wells; in depths up to 3000 m. Mean orientation and standard deviation of breakouts at each well have been used to assess the borehole quality following ranking criteria of the World Stress Map (WSM). From the well data set analyzed, three wells are considered as reliable stress indicators to characterize the present-day stress field throughout the margin (Andalucía A-1, Andalucía G-1, and Bética 18-1). The rest must be interpreted with caution because of the sparse number of breakouts. Stress inversion performed in these wells evidences that maximum horizontal stress ( $S_{Hmax}$ ) tend to parallel coast strike, resulting in a roughly E-W orientation along the northern margin of the Alboran Sea.

Key words: borehole breakouts, stress induce failure, stress inversion, Alboran Basin.

Geogaceta, 40 (2006), 59-62  
ISSN: 0213683X

## Introducción

El Arco de Gibraltar constituye el cinturón orogénico alpino más occidental del Mediterráneo. La Cuenca de Alborán y su continuación hacia el Este en la Cuenca Sur Balear, se localiza en el interior de este cinturón orogénico, uno de los más arqueados del mundo.

El Arco de Gibraltar se sitúa en una zona amplia de deformación, ligada al límite de placas convergente entre Eurasia y África. La caracterización del estado actual de esfuerzos en Béticas y Alborán se ha realizado siempre a partir de la inversión de datos de mecanismos focales y/o fallas activas (e.g., Buforn *et al.*, 1995, 2004; Galindo-Zaldívar *et al.*, 1993; Stich *et al.*, 2003) y la modelización mecánica de la litosfera (e.g., Jiménez-Munt *et al.*, 2001; Negrodo *et al.*, 2002). Estos modelos de deformación reciente predicen direcciones actuales de compresión en el Sur de la Península Ibérica con una orientación NNW-SSE a NW-SE, coincidiendo con otras determinaciones de esfuerzos derivadas de datos geológicos y geofísicos en la región (Galindo-

Zaldívar *et al.*, 1993, 1999; Borges *et al.*, 2001; Buforn *et al.*, 2004).

No obstante, el estado de esfuerzos también se puede estimar a través de otros métodos directos, como “*overcoring*” y análisis de “*breakouts*”, que describen la orientación del tensor de esfuerzos, aunque no su magnitud. Los datos de “*caliper*” de cuatro brazos han sido ampliamente utilizados para localizar tramos de pozo en los que las paredes describen una elipticidad y cuya elongación es función de la orientación de los ejes de esfuerzo máximo y mínimo en la horizontal. La validez de este tipo de datos ha sido suficientemente contrastada, constituyendo una buena reconstrucción de la orientación del esfuerzo horizontal máximo ( $S_{Hmax}$ ) (e.g., Plumb y Hickman, 1985; Zoback, 1992).

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados preliminares de un análisis de “*breakouts*” a partir de los datos de “*caliper*” de cuatro brazos disponibles en algunos de los sondeos profundos localizados en el Margen Sudibérico, tanto en la región septentrional emergida (Béticas) como en el Mar de Alborán (Fig. 1).

## Datos y análisis

Los “*breakouts*” son zonas de fractura inducidas por la concentración diferencial de esfuerzos entorno a las paredes de un pozo, que le confieren una sección elíptica (e.g., Bell y Gough, 1979; Cox, 1982). A medida que se avanza en la perforación de un pozo, los esfuerzos tienden a concentrarse en las paredes del mismo. En aquellas zonas donde los esfuerzos superan la resistencia total de la roca, se induce la fractura de las paredes del pozo bajo un régimen compresivo (Zoback *et al.*, 1985; Bell, 1990).

Todos los datos utilizados en este estudio proceden de las medidas tomadas por un “*caliper*” de cuatro brazos. Este tipo de “*caliper*” forma parte del “*dipmeter logging tool*” (como el SHDT o HDT de Schlumberger), herramienta que se emplea de manera rutinaria para obtener datos de dirección y buzamiento de la estratificación. El tratamiento de este tipo de datos permite determinar la orientación de los “*breakouts*” (Plumb y Hickman, 1995; Zajac y Stock, 1997; Zoback, 1992, entre otros). La mayor parte de los datos estudiados provienen de pozos profundos per-

Pozo	Lat.	Long.	Breakouts Az±σ	S <sub>H</sub> ±σ	Régimen	Calidad	Intervalo analizado (m)	Longitud de breakouts (m)
Alborán A-1	36.63	-4.21	118±15	32±15	U	D	[2240, 2300]	15
Andalucía A-1	36.60	-2.73	10±12	105±12	U	B	[1400, 2150]	140
Andalucía G-1	36.40	-4.75	3±4	98±4	U	A	[2380, 3000]	300
Bética 18-1	36.78	-5.95	63±19	158±19	U	C	[850, 1600]	220
Granada D-1	37.17	-3.81	70±22	165±22	U	D	[500, 770]	20
ODP 976B	36.21	-4.31	126±8	40±8	U	D	[700, 900]	15

Tabla I.- Resumen de los resultados obtenidos en el análisis de “breakouts” e información adicional relativa a cada pozo. La orientación de S<sub>Hmax</sub> ya incorpora la corrección de la declinación magnética.

Table I.- Summary of stress inversion from breakout analysis and additional information from each well. S<sub>Hmax</sub> is already corrected for magnetic declination.

forados en el margen durante los años 80, por lo que su registro está en papel y carece de datos de FMS (“Formation Micro-Scanner”). Para identificar las zonas con “breakouts” y la orientación de las elongaciones del pozo hemos seguido los criterios propuestos por Plumb y Hickman (1985). El azimut medio y la desviación típica de los “breakouts” a lo largo de cada pozo se han determinado a partir de los métodos de estadística circular descritos por Mardia (1972).

De todos los pozos localizados a lo largo del Margen Sudibérico, se han analizado 6 de ellos (Fig. 1). En el Mar de Alborán se han usado los pozos comerciales Andalucía G-1, Andalucía A-1, Alborán A-1 y el científico ODP-976B (Leg 161). Estos sondeos perforan sedimentos de edad Plio-Cuaternario y en

parte a sedimentos de edad Mioceno Superior, cuyas características de “logging” fueron estudiadas por Jurado y Comas (1992). En el caso del pozo ODP-976B, se alcanza además el basamento metamórfico del Dominio Cortical de Alborán (Comas *et al.*, 1999). Granada D-1, situado en una de las cuencas principales de edad Neógeno en Béticas (la Cuenca de Granada), perfora sedimentos marinos y continentales de edad Neógeno y Cuaternario. Bética 18-1, situado en el frente Oeste del Arco de Gibraltar, perfora una potente secuencia de sedimentos de edad Triásico (arcillas y sales) y Mesozoico (margas y calizas).

Se han encontrado “breakouts” en todos los pozos, a profundidades que en algunos casos alcanzan los 3000 m (Ta-

bla I). La orientación media, la desviación típica y la longitud total de los intervalos con “breakouts” se han utilizado para valorar la calidad de los resultados obtenidos en cada pozo. Para ello nos hemos basado en los criterios de calidad propuestos por Zoback (1992), que representan además el criterio de clasificación empleado en las distintas actualizaciones del mapa mundial de esfuerzos (“World Stress Map”).

Algunos pozos muestran rotaciones de los “breakouts” en intervalos concretos (Fig. 2, intervalo 1300 m a 1400 m). Éstas son debidas a la presencia de sales (e.g., Bética 18-1), zonas de falla (e.g., Andalucía G-1) o a un mal funcionamiento de la herramienta (e.g. Andalucía A-1). Para poder determinar en cada caso el origen de estas rotaciones, se ha realizado

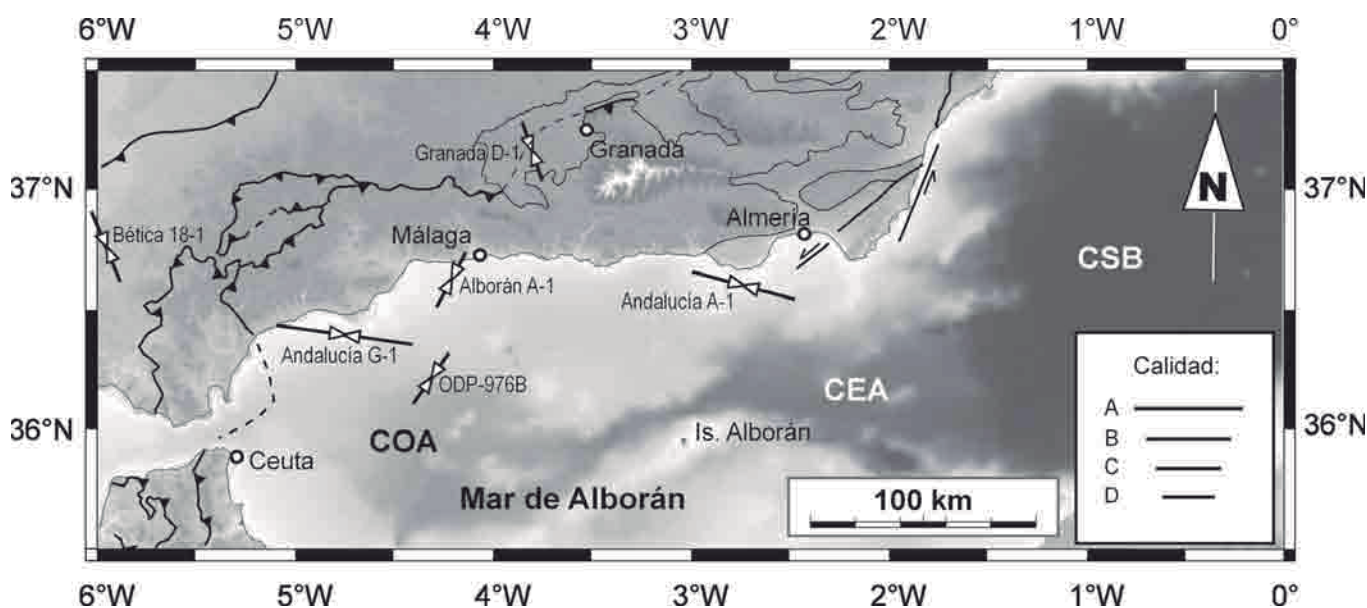


Fig. 1.- Mapa geológico simplificado que muestra la situación de los pozos y la orientación de S<sub>H</sub>. COA: Cuenca Oeste de Alborán; CEA: Cuenca Este de Alborán; CSB: Cuenca Sur Balear.

Fig. 1.- Simplify geological map showing well location and S<sub>H</sub> orientation. COA: West Alboran Basin; CEA: East Alboran Basin; CSB: South Balearic Basin.

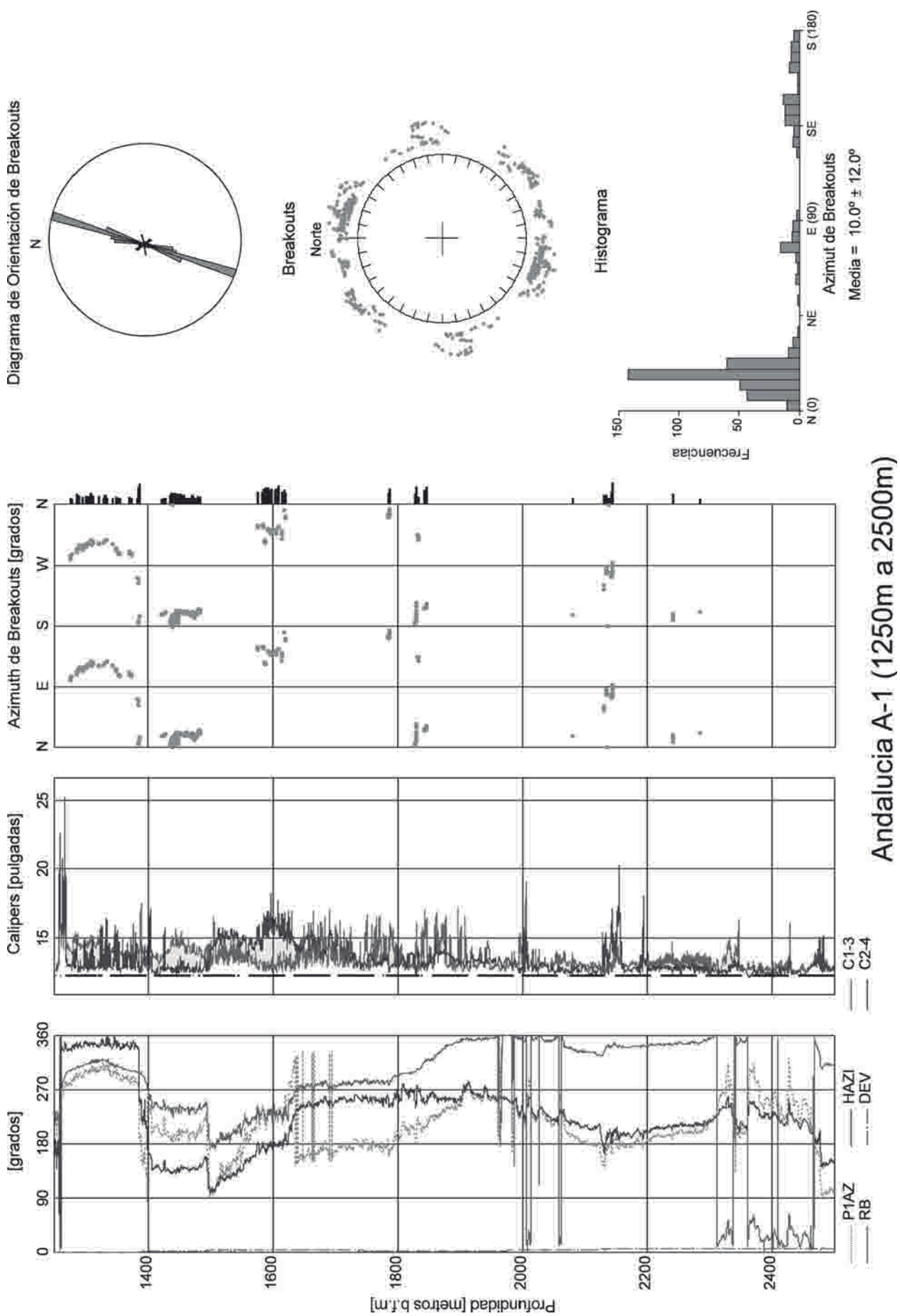


Fig. 2.- Datos de "caliper" de cuatro brazos en el pozo Andaluçia A-1. DEV (desviación horizontal del pozo), HAZI (azimut del pozo), RB (estratificación), P1AZ (azimut del Pad 1), C1-3 (Caliper 1), y C2-4 (Caliper 2)

Fig. 2.- Four-arm caliper data in the Andaluçia A-1 well: DEV (hole azimuth), HAZI (hole deviation), P1AZ (Pad 1 azimuth), C1-3 (Caliper 1), and C2-4 (Caliper 2).

un análisis comparativo entre los datos de "logging", los datos de testificación del sondeo y los resultados del análisis de "breakouts". De este modo se han filtrado todas aquellas rotaciones consecuencia de un mal funcionamiento del "caliper".

## Resultados

La tabla I sintetiza los resultados del análisis, mostrándose la longitud total de los intervalos con "breakouts", su calidad y la orientación promedio del esfuerzo horizontal máximo ( $S_{Hmax}$ ). Ya que estos pozos carecen de datos que nos permitan estimar de manera fiable el régimen de esfuerzos (e.g., fracturación hidráulica), les hemos atribuido la categoría de "régimen desconocido (U)" a todos ellos.

En tres de los pozos analizados, la inversión de esfuerzos es de buena calidad y se pueden considerar fiables para la determinación del estado de esfuerzos actual en el Margen Sudibérico: Andalucía A-1, Andalucía G-1 y Bética 18-1. Los dos primeros se encuentran en el margen norte de la Cuenca de Alborán, frente a las costas de Almería y Málaga respectivamente (Fig. 1). Bética 18-1 se localiza al Oeste, en el frente del Arco de Gibraltar. En Andalucía A-1 la inversión de tensor de esfuerzos, una vez corregida la declinación magnética, indica una orientación de  $S_{Hmax} = 105^\circ \pm 12^\circ$ . En Andalucía G-1 la orientación de  $S_{Hmax}$  resultante es  $98^\circ \pm 4^\circ$  y en Bética 18-1  $S_{Hmax} = 158^\circ \pm 19^\circ$ .

Los restantes pozos analizados contienen un número insuficiente de "breakouts" para establecer una orientación fiable de  $S_{Hmax}$ . Algunos de ellos (e.g., Granada D-1; Alborán A-1) evidencian un importante efecto de lavado por la circulación de los lodos de perforación; por lo que la elongación del pozo resulta de la superposición de los efectos de lavado y/o de la existencia de "breakouts". Por ejemplo, Granada D-1 ( $S_{Hmax} = 165^\circ \pm 22^\circ$ ) presenta un ensanche del diámetro debido a efectos de lavado, tal vez promovido porque perfora sedimentos poco consolidados de edad Pliocuaternario. Este hecho determina que se hayan detectado escasos intervalos de "breakouts" y que su orientación tenga

una alta dispersión. En Alborán A-1 ( $S_{Hmax} = 32^\circ \pm 15^\circ$ ) y ODP-976B ( $S_{Hmax} = 40^\circ \pm 8^\circ$ ) la presencia de sedimentos poco consolidados y la circulación de los lodos durante la perforación han debido modificar también la elongación del pozo, alterando el número y la orientación de "breakouts".

## Conclusiones

1. Se han analizado los pozos profundos perforados en Béticas y Alborán en los que hay datos apropiados de diagráfias, encontrándose que 6 de ellos permiten realizar una inversión de la orientación del tensor de esfuerzos a partir del análisis de "breakouts".

2. En tres de los pozos analizados los resultados tienen calidad suficiente (calidades A a C) como para poder caracterizar el estado esfuerzos en el Margen Sudibérico (Andalucía A-1, Andalucía G-1 y Bética 18-1). De aquí podemos inferir que  $S_{Hmax}$  en el margen norte del Mar de Alborán tiene una orientación promedio E-W (azimut  $98^\circ - 105^\circ$ ), y rota hasta una dirección NW-SE en el frente Oeste del Arco de Gibraltar.

3. La orientación de  $S_{Hmax}$  obtenida en el resto de los casos analizados (Alborán A-1, Granada D-1 y ODP-976B) debe interpretarse con cautela dado el importante efecto de lavado y la escasez de "breakouts".

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CTM2005-08071-CO3-01/MAR (SAGAS) y por el Programa Nacional de Formación del Profesorado Universitario (FPU, MEC). Además queremos agradecer la financiación adicional proporcionada por el "Stress and Crustal Mechanics Group" de la Universidad de Stanford (California).

## Referencias

Bell, J.S. (1990). En: *Geological Applications of Wireline logs* (A. Hurst, M.A. Lovell, y A.C. Morton, Eds.). Geological Society of Lon-

don, 48, 305-325.

Bell, J.S. y Gough, D.I. (1979). *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 475-482.

Borges, J.F., Fitas, A.J.S., Bezzeghoud, M. y Teves-Costa, P. (2001). *Tectonophysics*, 337, 373-387.

Bufo, E., Sanz de Galdeano, C. y Udías, A. (1995). *Tectonophysics*, 248, 247-261.

Bufo, E., Bezzeghoud, M., Udías, A. y Pro, C. (2004). *Pure and Applied Geophysics*, 161, 623 - 646.

Comas, M.C., Platt, J.P, Soto, J.I., y Watts, A.B. (1999). En: *Proceedings ODP, Scientific Results* (R. Zahn, M.C. Comas, y A. Klaus, Eds.). Ocean Drilling Program, 161, 555-579.

Cox, J.W. (1982). *The Technical Review*, 30, 15-25.

Galindo Zaldívar, J., González Lodeiro, F. y Jabaloy, A. (1993). *Tectonophysics*, 227, 105-126.

Galindo Zaldívar, J., Jabaloy, A., Serrano, I., Morales, J., González Lodeiro, F. y Torcal, F. (1999). *Tectonics*, 18, 686-702.

Jiménez-Munt, I., Bird, P. y Fernández, M. (2001). *Geophysical Research Letters*, 28, 1083-1086.

Jurado, M.J. y Comas, M.C. (1992). *Geo-Marine Letters*, 12, 129-136.

Mardia, K. V. (1972). *Statistics of Directional Data*. Academic Press, 357.

Negredo, A. M., Bird, P., Sanz de Galdeano, C. y Bufo, E. (2002). *Journal of Geophysical Research*, 107, (B11), 2292.

Plumb, R.A. y Hickman, S.H. (1985). *Journal of Geophysical Research*, 90, 5513-5521.

Stich, D., Ammon, C.J. y Morales, J. (2003). *Journal of Geophysical Research*, 108, (B3), 2148.

Zajac, B.J. y Stock, J.M. (1997). *Journal of Geophysical Research*, 102, 10083-10100.

Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. y Anderson, R.N. (1985). *Journal of Geophysical Research*, 90, 5523-5530.

Zoback, M.L. (1992). *Journal of Geophysical Research*, 90, 11703-11728.