

# Orientación de esfuerzos en el NE de la Península Ibérica: nuevos indicadores a partir del análisis de datos de sondeos

*Stress orientation in NE Iberia: new indicators from well log analysis*

M.J. Jurado (\*) y B. Mueller (\*\*)

(\*) Instituto de Ciencias de la Tierra CSIC, Martí i Franqués s/n, 08028 Barcelona, Spain; mjjurado@ija.csic.es, (actualmente: Geophysikalisches Institut, University of Karlsruhe, Hertzstrasse 16, 76187 Karlsruhe, Germany; mjjurado@gpiwap4.physik.uni-karlsruhe.de)

(\*\*) Geophysikalisches Institut, University of Karlsruhe, Hertzstrasse 16, 76187-Karlsruhe, Germany; bmueller@gpiwap1.physik.uni-karlsruhe.de.

## ABSTRACT

*In situ data on the orientation of tectonic stress in northern Iberia are scarce. Breakout analysis performed on oriented caliper logs coming from hydrocarbon exploration wells has provided new data on the orientation of tectonic stress in NE Iberia: southern Pyrenees, Ebro basin and NW Valencia Trough, that show a rather consistent NNE to ENE direction of maximum horizontal stress which differs significantly from the NW western European mean orientation. The area of study includes part of the old boundary between the African and Eurasian plates. It is concluded that NE-Iberia is under NNE to ENE horizontal compression.*

**Key words:** stress, borehole, tectonics, NE Iberia, World Stress Map.

Geogaceta, 19 (1996), 27-30  
ISSN: 0213683X

## Introducción

Los datos existentes sobre orientación de esfuerzos en el noreste de la Península Ibérica, recogidos por el World Stress Map (Zoback 1992) son escasos. Los datos de fallas y de mecanismos focales ofrecen orientaciones diversas que resultan de difícil interpretación en términos de una orientación general de esfuerzos. El análisis de la deformación elipsoidal en ovalizaciones (*breakouts*) (Fig. 1) realizado a partir de los registros de diámetro de pozos (*caliper*) orientados, obtenidos en sondeos de exploración de hidrocarburos, ha proporcionado nuevos datos sobre la orientación de esfuerzos tectónicos en el NE de Iberia: vertiente sur de los Pirineos, cuenca del Ebro y NW del surco de Valencia. El área de estudio engloba el antiguo límite entre las placas africana y euroasiática.

Los nuevos datos se han incorporado al World Stress Map.

El World Stress Map (Zoback, 1992) es una base de datos global (similar a las de topografía, gravimetría, etc) que contiene información sobre esfuerzos tectónicos actuales en la corteza terrestre. Los datos que incluye son contribuciones voluntarias que realizan científicos de

todo el mundo. Los investigadores que aportan datos tienen acceso al conjunto de la base de datos con fines de investigación.

El World Stress Map incluye diferentes tipos de indicadores de esfuerzos tectónicos como son los procedentes de mecanismos focales de terremotos, ovalizaciones en sondeos (*borehole breakout*), fracturación hidráulica, sobreperforación (*overcoring*), cinemática de fallas, lineaciones de aparatos volcánicos, etc. Una descripción detallada puede encontrarse en Zoback (1992)

A pesar de la compleja estructura y fábrica de la corteza terrestre, se conoce una notable uniformidad en la parte superior de la litosfera (frágil), en zonas de intraplaca. La uniformidad o variación del estado de esfuerzos en profundidad viene indicada por la correlación entre orientaciones de esfuerzos deducidas de: 1) indicadores geológicos en la superficie terrestre, 2) medidas de esfuerzos «in situ» (sobreperforación, fracturación hidráulica) en los primeros 1-2 km, 3) ovalizaciones en sondeos (*breakouts*) en los primeros 4-5 km, 4) soluciones de mecanismos focales de terremotos para la corteza media, hasta profundidades de unos 20 km.

La figura 3, refleja el estado actual

de la base de datos del World Stress Map para Iberia y áreas adyacentes.

El World Stress Map tuvo su inicio en una compilación de esfuerzos tectónicos de Estados Unidos y, ampliando su ámbito de estudio, paso a ser un proyecto global del International Lithosphere Programm. Desde 1995 sigue su desarrollo en el Instituto de Geofísica de la Universidad de Karlsruhe, como proyecto de la

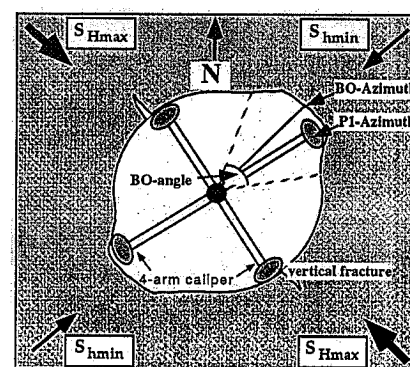


Fig. 1.- Esquema de la ovalización (BO) de un sondeo (*borehole breakout*) y de los 4 brazos de la sonda que registra el diámetro del sondeo. PI: patín de referencia de la herramienta.

Fig. 1.- Sketch of a borehole breakout (BO) and of 4 arm caliper. PI is the tool reference pad.

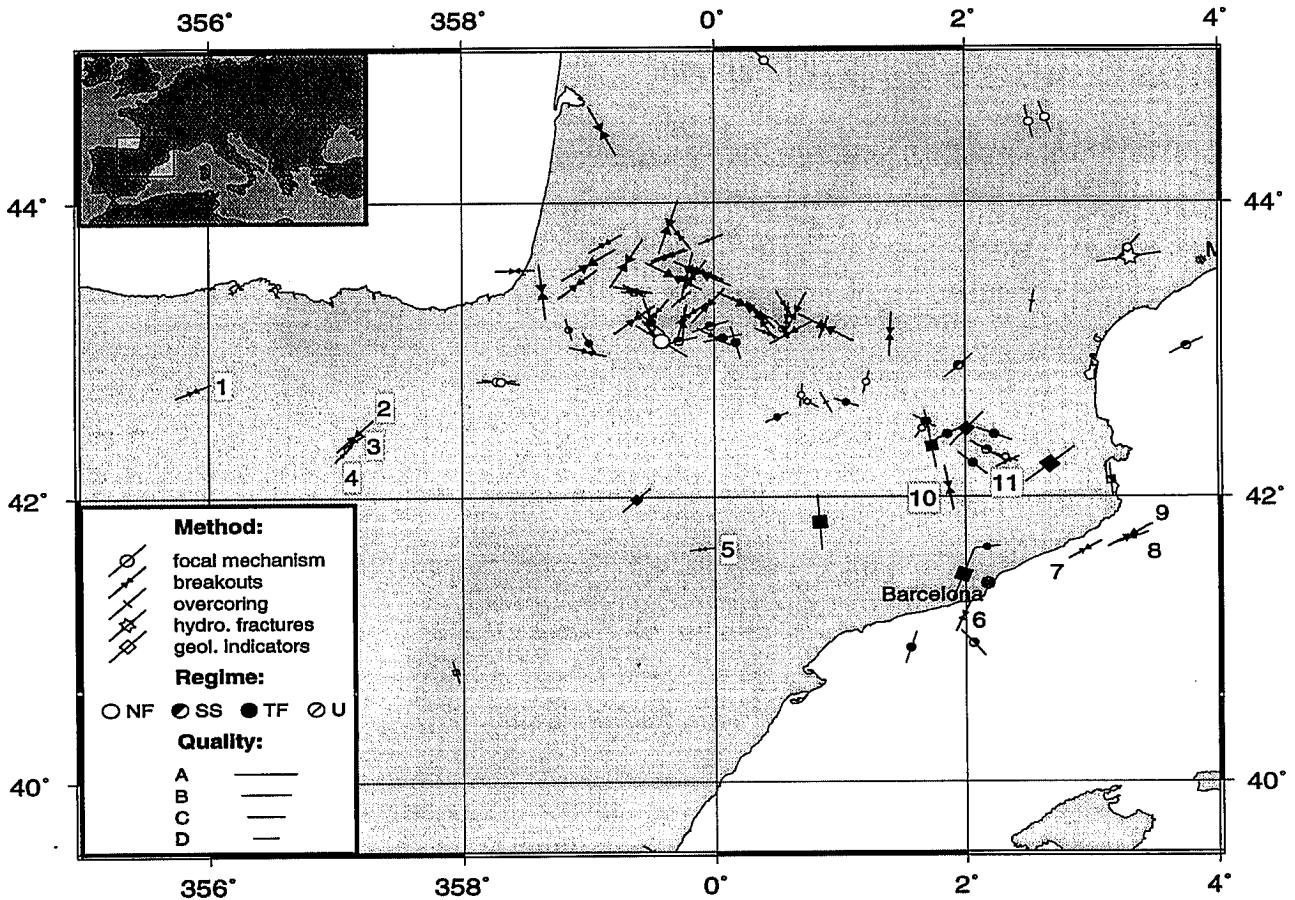


Fig. 2.- Indicadores de stress para el NE de Iberia y cuenca de Aquitania, de acuerdo con los datos existentes en el World Stress Map al que se han incorporado contribuciones de datos recientes. Los números (véase texto) corresponden a los nuevos datos procedentes del análisis de orientación de esfuerzos en sondeos. Se representa la orientación del esfuerzo máximo horizontal  $S_H$  para los diferentes tipos de indicadores de acuerdo con la leyenda. La longitud del símbolo esta en relación con la calidad del dato (A a D, Zoback *et al*, 1989, Müller *et al*, 1992)

Fig. 2.- Stress indicators for NE Iberia and Aquitaine basin, according to the World Stress Map database, including recent contributions. 1 to 11 indicate the location of new data coming from the analysis of borehole breakouts. The orientation of the maximum horizontal stress,  $S_H$  is represented for the different types of indicators, as denoted by different symbols. Symbol length is related to data quality (A to D, Zoback *et al*, 1989, Müller *et al*, 1992)

Academia de Ciencias de Heidelberg.

Para más información puede contactarse con:

Dr. Birgit Müller, Veronika Wehrle  
Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe  
Hertzstr. 16, 76187- Karlsruhe, Alemania

Teléfono: +49+721-6084610

Fax: +49+721-71173

Stress Map Mail: [wsm@gpiwap1.physik.uni-karlsruhe.de](mailto:wsm@gpiwap1.physik.uni-karlsruhe.de)

World Stress Map WWW (World Wide Web) Homepage: <http://www-gpi.physik.uni-karlsruhe.de/pub/wsm> o bien con la coordinadora para Iberia:

Dr. M.J.J. Jurado  
Geophysikalisches Institut, University

of Karlsruhe,

Hertzstrasse 16, 76187 - Karlsruhe, Germany;

[mjjurado@gpiwap4.physik.uni-karlsruhe.de](mailto:mjjurado@gpiwap4.physik.uni-karlsruhe.de)

Teléfono: +49+721-6084609

Fax: +49+721-71173

### Metodología

Los nuevos resultados que aquí se presentan proceden del análisis de la geometría de sondeos (Gough and Bell 1982, Plumb and Hickman 1985; Zoback *et al*. 1985). El análisis de ovalizaciones en sondeos («borehole breakout analysis») es considerado uno de los métodos más fiables para determinar la orientación del esfuerzo máximo horizontal (Bell and Gough,

1979, 1983; Gough and Bell, 1982). El principio del mismo consiste en considerar que un sondeo cilíndrico vertical que se perfora en una roca isotrópica homogénea se ve sometido a los esfuerzos horizontales máximo  $S_H$  y mínimo  $S_h$ . El esfuerzo efectivo circular  $\sigma_{\theta\theta}^*$ , el esfuerzo efectivo radial  $\sigma_{rr}^*$ , y el esfuerzo efectivo vertical  $\sigma_{zz}^*$  pueden describirse por:

$$\sigma_{\theta\theta}^* = S_H + S_h - 2(S_H - S_h) \cos(2\theta) - P_F - P_p$$

$$\sigma_{rr}^* = P_F - P_p$$

$$\sigma_{zz}^* = S_v - 2\nu(S_H - S_h) \cos(2\theta) - P_p$$

$P_p$  es la presión de fluidos en la formación,  $P_F$  es la presión del fluido en el sondeo,  $\nu$  el coeficiente de Poisson,  $\theta$

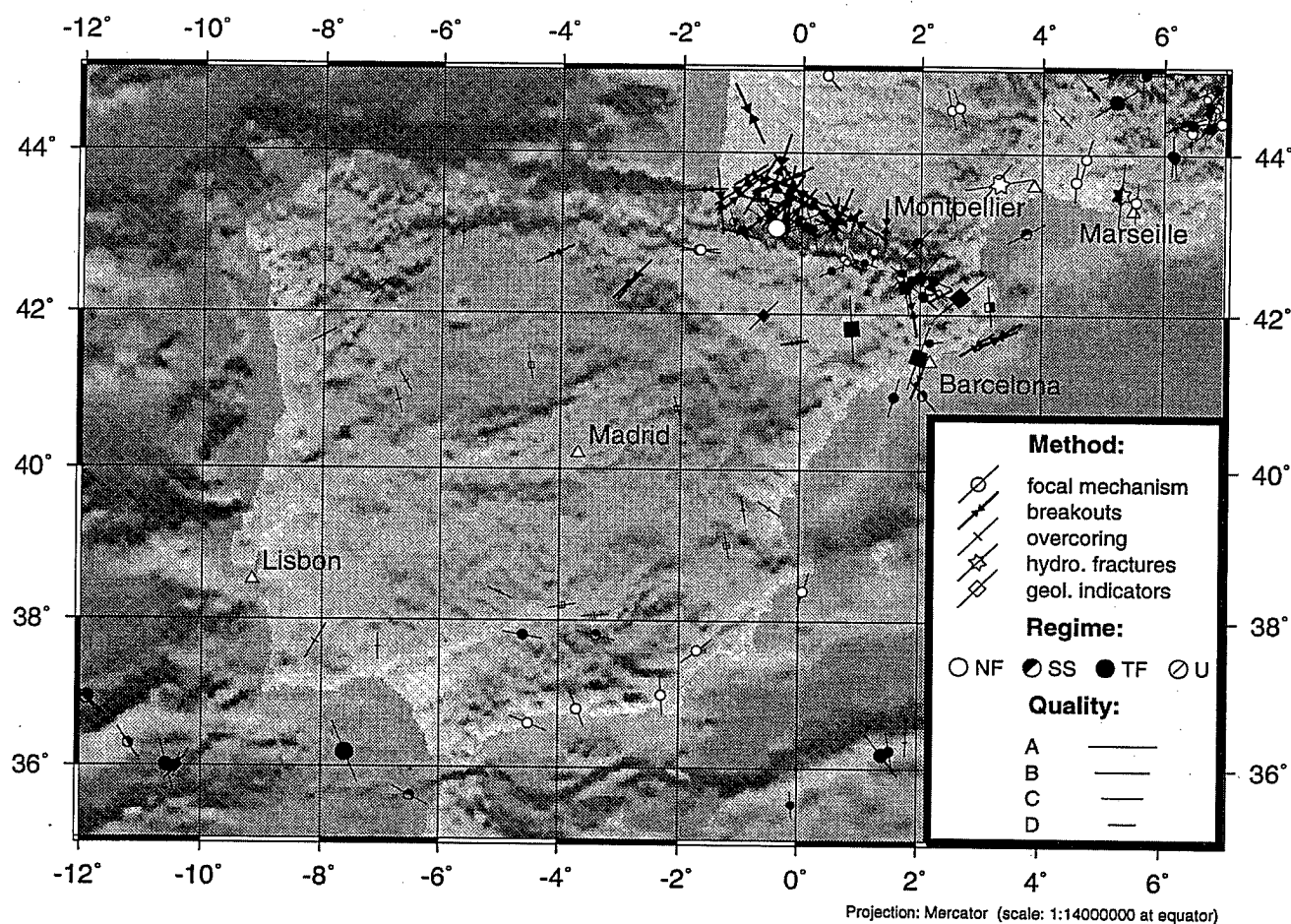


Fig. 3.- Localización de los indicadores de esfuerzos que recoge actualmente la base de datos del World Stress Map para Iberia.

Fig.3.- Location of the stress indicators in Iberia as compiled in the World Stress Map database.

el ángulo medido desde el azimuth de  $S_H$ . En las paredes del sondeo, en general, el esfuerzo circunferencial supera al esfuerzo vertical (Moos and Zoback, 1990) y varía con  $\theta$ , alcanzando valores máximos para  $\theta=90^\circ$  y  $\theta=270^\circ$ . Para estos azimuths perpendiculares al azimuth de  $S_H$ , el esfuerzo circunferencial puede exceder la resistencia de la roca y, como resultado, la rotura bajo compresión puede dar lugar a la formación de ensanchamientos del sondeo. Estos ensanchamientos, de sección elipsoidal, se denominan ovalizaciones de sondeos (*borehole breakouts*) (Fig. 1) El esfuerzo circunferencial mínimo es paralelo al azimuth de  $S_H$ .

En este trabajo hemos utilizado registros de diámetro pozo orientados obtenidos en sondeos de exploración de hidrocarburos con sondas como el «dipmeter» de 4 brazos, que registran el diámetro del sondeo y los datos relativos

a la inclinación y orientación de la herramienta y que permiten analizar la geometría del sondeo (Fig. 1). Para cada uno de los sondeos analizados se ha determinado la orientación de cada intervalo ovalizado, las medias de su azimuth y la desviación estándar de las ovalizaciones, ponderado por la longitud de las zonas ovalizadas (Mardia, 1972). Se han aplicado los criterios de Plumb y Hickman (1985) y Babcock (1978) para la determinación de la existencia de ovalizaciones (*borehole breakouts*).

### Resultados

Los resultados del análisis de ovalizaciones de sondeos, nuevos indicadores del esfuerzo máximo horizontal obtenidos para los sondeos se representan en la figura 2: Cantonegro-1 (Repsol, 1987) (Fig. 2, 1), Rioja-1 (Campsa, 1977) (Fig. 2, 2), Rioja-2

(Campsa, 1977) (Fig. 2, 3), Demanda-1 (Eniepsa, 1983) (Fig. 2, 4), Ebro-2 (Campsa, 1978) (Fig. 2, 5), Jabalí-1 (Union Texas, 1981) (Fig. 2, 10), Serrat-1 (Union Texas, 1987) (Fig. 2, 11), Rosas 3-1 (Chevron, 1981) (Fig. 2, 8), Rosas 3-2 (Chevron, 1981) (Fig. 2, 9), Rosas 3-3 (Chevron, 1983) (Fig. 2, 7), Garraf-2 (Total, 1985) (Fig. 2, 6). La figura 2 incluye así mismo los indicadores de que dispone el World Stress Map (Zoback, 1992, Müller et al 1992). Los nuevos datos sobre la orientación del esfuerzo máximo horizontal en el NE de Iberia muestran una consistencia en la dirección NNE a ENE, que difiere de forma significativa de la dirección NW que se reconoce en Europa occidental. La consistencia de estos nuevos indicadores de la orientación de esfuerzo máximo horizontal sugiere una notable anisotropía de los esfuerzos horizontales. La orientación de esfuerzos es

consistente en profundidad, tanto en el relleno sedimentario de las cuencas como en el substrato, y también en las unidades alóctonas de los Pirineos meridionales y en los sedimentos autóctonos y paraautoctonos de la cuenca de antepaís. Se deduce una distribución uniforme de los esfuerzos en los primeros 4.5 km de la corteza superior. Nuestros resultados sobre orientación de esfuerzos en esta zona situada al sur de la paleosutura entre placas indica que difiere notablemente de la orientación general que se conoce para la placa Euroasiática en la actualidad (NW) y en la cuenca de Aquitania, al N de los Pirineos.

#### Agradecimientos

A Repsol Exploración por haber facilitado parte de la información de son-

deos analizada. La acción Integrada Hispano-Alemana Int HA-34-112-91, y los proyectos JOU-2.-CT 92-0110 (Unión Europea) y SFB-108 (Univ. Karlsruhe, Deutsche Forschungsgemeinschaft, SFB rep 423) y la Academia de Ciencias de Heidelberg han contribuido parcialmente a la financiación de este trabajo. A las Dras. C. Olivera and T. Susagna por la revisión de datos de mecanismos focales (NE de Iberia), Dr. X. Goula y J Fleta por sugerencia sobre datos de fallas (NE de Iberia). Al Dr P. Santanach y Dr. M. Fernandez por comentarios y sugerencias en el desarrollo de este trabajo.

#### Referencias

Bell, J.S. and Gough D.I. (1979) *Earth Plan. Sci. Lett.*, 45, 475-482.

- Bell, J.S. and Gough D. (1983) In: «Hydraulic Fracturing Stress Measurements» (Ed Zoback, M.D. and Haimson, B.C.), National Academy Press, Washington, 201-209.
- Gough, D.J. and Bell, J.S. (1982) *Can. J. Earth Sci.*, 18, 1358-1370.
- Mardia, K.V. (1972) "Probability and mathematical statistics". *Academic Press*, London, 357 pp.
- Moos, D. and Zoback, M.D. (1990) *J. Geophys. Res.*, 95, 9305-9325.
- Mueller, B.; Zoback, M.L.; Fuchs, K.; Mastin, L., Gregersen, S.; Pavoni, N.; Stephansson O., Ljunggren, C. (1992) *J. Geophys. Res.*, 97, 11783-11803.
- Plumb, R.A. and Hickman, S.H. (1985) *J. Geophys. Res.*, 90, 5513-5521.
- Zoback, M.D.; Moos D.; Mastin, L. and Anderson R.N. (1985) *J. Geophys. Res.*, 90, 5523-5530.
- Zoback, M.L. (1992) *J. Geophys. Res.*, 97, 11703-11728.