

Características de los tensores de esfuerzos activos entre la Dorsal Centroatlántica y la Península Ibérica

G. De Vicente¹, S. Martín Velázquez¹, M.A. Rodríguez Pascua¹, A. Muñoz Martín¹,
M. Arcila^{1,2} y B. Andeweg³

1 Dpto. de Geodinámica, Facultad CC. Geológicas, Universidad Complutense, 28040 - Madrid. albosque@eucmax.sim.ucm.es

2 Ingeominas, A.A. 695 Popayán, Colombia.

3 Institute of Earth Sciences, Vrije Universiteit, 1081 HV Amsterdam, The Netherlands.

ABSTRACT

The orientation of the principal stresses and the principal stress difference ratio has been determined along the southwestern boundary of the Euroasiatic plate with Northamerican and African plates by inversion method of focal mechanisms of earthquakes. The ridge push (30° to 65° N) ranges from E-W to ESE-WSW, with R values that show a triaxial extensional stress. The state of stress changes to strike-slip regime in the transform fault zones, and the Shmax strike turns clockwise to NW in the dextral strike-slip faults and counterclockwise to the NE in the sinistral ones. Along the margin between the Euroasiatic-African plates, from the Azores triple junction to Algeria, Shmax keeps a constant NW-SE strike but the stress ratio values range from triaxial extensional stress state, to the West, to uniaxial compressive stress state, to the East, passing through a strike-slip regime in the middle zone. In this context and with a widely NW-SE Shmax, strike-slip and extensional stresses prevail in most Iberian peninsula, whereas southwards it is dominated by uniaxial compressive stresses.

Key words: active stress tensors, focal mechanisms of earthquakes, inverse method, Euroasiatic plate, Iberian peninsula.

INTRODUCCIÓN

El empuje de la dorsal Centroatlántica es la fuerza conductora principal que controla el proceso de convergencia moderada entre las placas Euroasiática y Africana, al Oeste de la península Ibérica (Gölke y Coblenz, 1996), produciendo esfuerzos con una componente máxima en la horizontal (Shmax) orientada NO-SE desde Azores hasta Argelia. Aunque la posición del polo euleriano condiciona el tipo de esfuerzos presentes a lo largo de dicho margen, extensivos al Oeste y compresivos al Este, modelizaciones más detalladas (Andeweg *et al.*, 1998) muestran que las variaciones laterales de potencia y densidad en la corteza juegan un papel muy importante a la hora de dar cuenta del tipo concreto de esfuerzos actuantes. Por otro lado, la deformación a lo largo de dicho límite aparece muy distribuida, activando fallas de primer orden (que cortan toda la corteza superior) y pliegues litosféricos en una banda que, en la placa Euroasiática, supera los 1.000 km (Vegas *et al.*, 1998).

Para estudiar las características tensoriales desde la dorsal Centroatlántica hasta Argelia, se ha aplicado el *método de inversión de esfuerzos* (Reches *et al.*, 1992) en poblaciones de mecanismos focales de terremotos, que permite de-

terminar la orientación de los ejes principales del tensor de esfuerzo, así como su razón áxica $R = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$ ($R = 0$ elipsoides prolatos, $R = 1$ elipsoides oblatos). Esta técnica se fundamenta en el principio de Wallace-Bott (Bott, 1959) y tiene en cuenta el criterio de fracturación de Navier-Coulomb (Anderson, 1951). La calidad de la solución se evalúa mediante el ángulo de desviación de los ejes principales. Se han utilizado dos gamas de magnitudes que se corresponden con dos fuentes distintas de datos: sismos registrados entre 1976 y 1998 en el catálogo del tensor de momento sísmico de Harvard (Dziewonski *et al.*, 1981) ($M_w > 5$) y sismos, para la península Ibérica, determinados en el proyecto SIGMA (C.S.N., 1998) ($3.5 < M_b < 5$). Para completar el estudio, se han incluido los datos publicados por Kiratzi y Papazachos (1995) localizados en la zona de fractura que se extiende desde Azores hasta la península Ibérica.

RESULTADOS

Se han estudiado en total 310 mecanismos focales de terremotos distribuidos a lo largo del límite sudoccidental de la placa Euroasiática. Se han agrupado en poblaciones en función de los principales segmentos tectónicos que se diferencian en este área (Fig. 1).

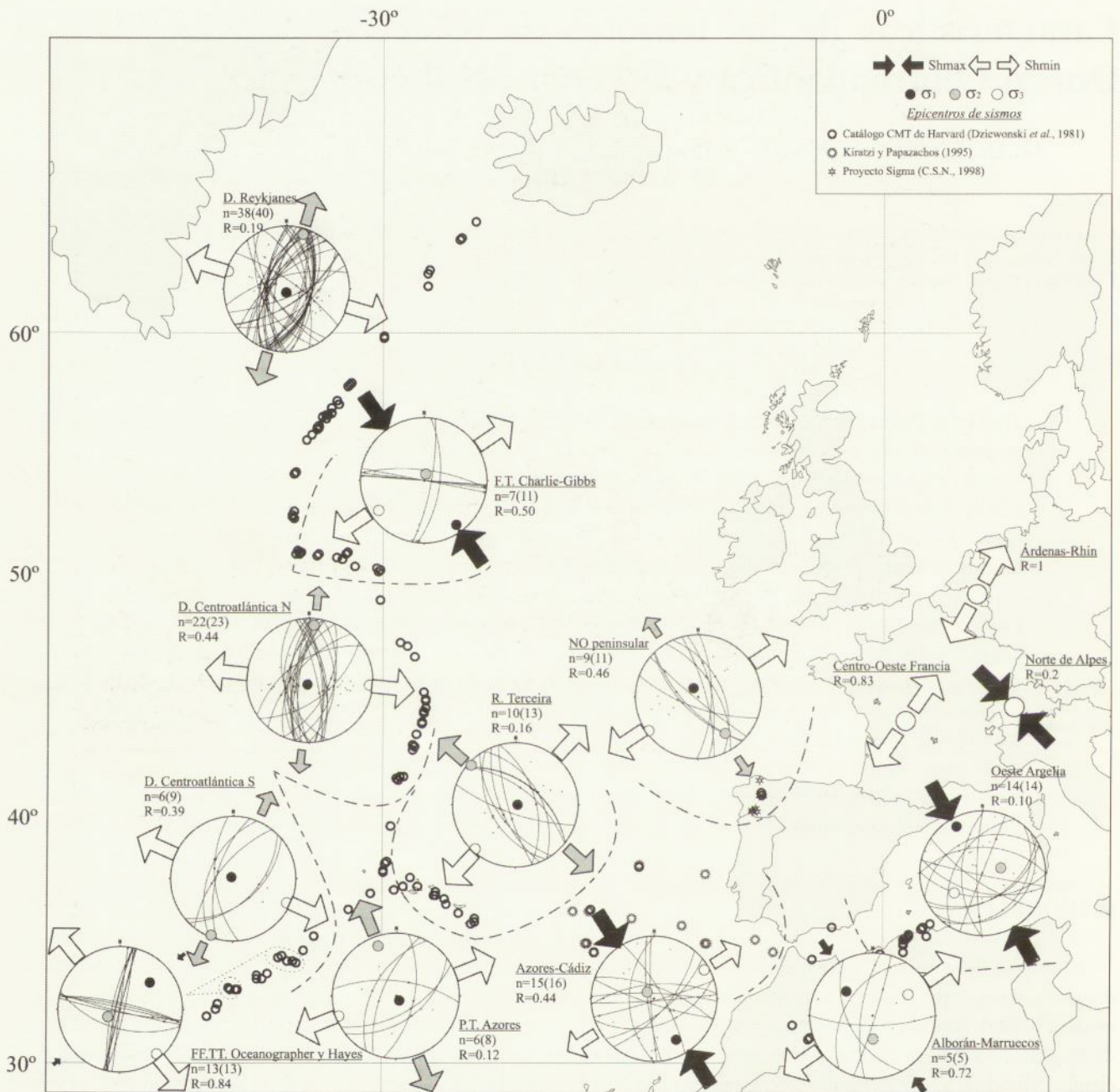


FIGURA 1: Tensores de esfuerzos desde la dorsal Centroatlántica hasta Argelia a partir del análisis mediante el método de inversión de Reches et al. (1992) de 141 sismos del catálogo CMT de Harvard (Dziewonski et al., 1981), 9 del proyecto SIGMA (C.S.N., 1998) y 13 de Kiratzi y Papazachos (1995). Se han incluido los tres tensores publicados en I.P.S.N. (1993) del Centro-Oeste de Francia, Norte de Alpes y Árdenas-Rhin. Shmax y Shmin: esfuerzos horizontales máximo y mínimo. σ_1 , σ_2 y σ_3 : ejes de esfuerzos principales máximo, intermedio y mínimo. n: número de sismos explicados (número de sismos analizados). Líneas discontinuas: límites entre las distintas poblaciones. Las magnitudes de los esfuerzos horizontales dibujados son proporcionales al valor de la razón del elipsoide de esfuerzo $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$.

El límite divergente entre las placas Euroasiática y Norteamericana está caracterizado, en la zona estudiada, por dos segmentos principales de dorsal oceánica, la de Reykjanes y la Centroatlántica, que aquí denominaremos Centroatlántica Norte, desplazados por la falla transformante Charlie-Gibbs. Los mecanismos focales revelan que las estructuras activas predominantes en los tramos de dorsal son fallas normales, cuyas trazas varían entre 015°-030° en la dorsal de Reykjanes y entre 000°-015° en la dorsal

Centroatlántica Norte. Esta fracturación acomoda una extensión triaxial ($R = 0.19$ y 0.44 , respectivamente) que produce un empuje de dorsal según 107° (Shmin) en el segmento septentrional y 096° en el tramo meridional (Fig. 1). El límite transformante de Charlie-Gibbs se caracteriza por fallas de desgarre, con una moda principal de fracturación 090°-105°. Estos mecanismos focales se ajustan a un Shmax orientado hacia 146° y, por tanto, consistente con el desplazamiento horizontal dextroso (Fig. 1).

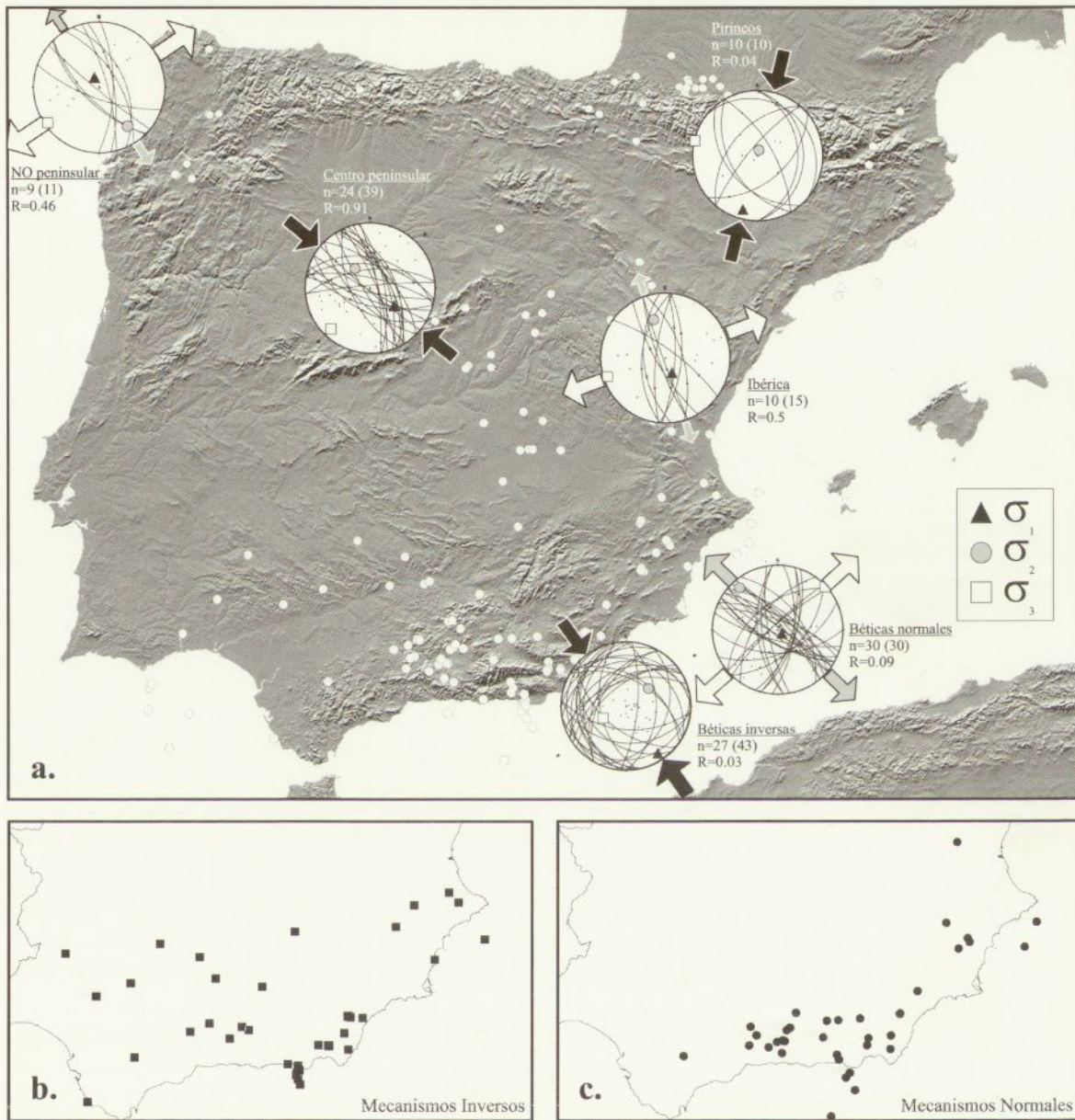


FIGURA 2: **a.** Tensores de esfuerzos en la península Ibérica a partir del análisis poblacional de 156 sismos (C.S.N., 1998) mediante el método de inversión de Reches et al. (1992). Símbolos y texto como en la figura 1. **b.** Mecanismos focales inversos. **c.** Mecanismos focales normales.

El contacto entre las placas Africana y Norteamericana, al sur del punto triple de Azores y hasta una latitud de 30°N, se caracteriza por tres pequeños sectores de la dorsal Centroatlántica (nos referiremos a ellos como Centroatlántica Sur) conectados por dos fallas transformantes, la Oceanographer al Norte y la de Hayes al Sur. De nuevo, los tramos de dorsal están representados por fallas de tipo extensional paralelas a su traza, que proporcionan una dirección de empuje 114° (Fig. 1). En cambio, las fallas de desgarre de las zonas transformantes acomodan su movimiento con una orientación de Shmax hacia 050°. Este valor implica un movimiento relativo horizontal sinestroso. Se supone que el empuje de la dorsal se transforma rápidamente en un régimen de cizalla (σ_2 en la vertical), lo que

resulta evidente en las proximidades de las fallas transformantes (con valores de R que indican regímenes de cizalla pura o cizalla extensional). No obstante, es la propia geometría del límite lo que provoca deflexiones en Shmax, hacia el NO en los desgarres dextróstricos, y hacia el NE en los sinestrosos.

En el límite entre las placas Euroasiática y Africana se han diferenciado cinco sectores de Este a Oeste: punto triple de Azores, rift Terceira, Azores-Cádiz, Alborán-Marruecos y Oeste de Argelia. En los dos primeros, los mecanismos focales son de tipo extensional, con una disposición más variada de los planos de falla en el punto triple y más homogénea, en torno a 145°, en la zona de fractura de Azores. Una vez realizada la inversión, se obtienen unos

valores de Sh_{max} hacia 158° y 132° , respectivamente, con un régimen de extensión casi radial (R próximo a 0) (Fig. 1). En las tres últimas zonas acotadas hacia el Este en el margen euroasiático-africano, destacan unas orientaciones mucho más heterogéneas de las estructuras, tanto en dirección como en buzamiento, aunque permanece una dirección constante del esfuerzo máximo horizontal en torno a 146° con tensores de esfuerzos de desgarre hasta Argelia, donde la compresión es próxima a uniaxial.

Finalmente, en el interior de la Placa Euroasiática, y concretamente en la Península Ibérica, se han diferenciado 5 áreas para el tratamiento de los datos y la obtención de tensores regionales: Pirineos, Noroeste, Cordillera Ibérica, Centro-Sudoeste y Béticas. Los resultados obtenidos indican una dirección de Sh_{max} muy constante NO-SE (Fig. 2a), compatible con las orientaciones obtenidas en este mismo trabajo para las zonas circundantes y por I.P.S.N. (1993) (Fig. 1). Los tensores más compresivos corresponden a las Béticas y los Pirineos, con direcciones de acortamiento perpendiculares a las trazas de ambas cadenas (Fig. 2a). En las Béticas la dirección de acortamiento regional es NO-SE, mientras que en los Pirineos sufre un giro hacia 010° , con una posición intermedia para la Cordillera Ibérica. En el Centro peninsular y zonas del sudoeste, el tensor es de desgarre con una orientación de Sh_{max} NO-SE. En el Noroeste (zona de Galicia) la dirección de extensión máxima es NE-SO moviendo fallas normales paralelas a la dirección de acortamiento regional NO-SE. Resulta interesante destacar que, en la Cordillera Bética las fallas son muy normales o muy inversas, apareciendo mezcladas espacialmente. No obstante, si dibujamos los epicentros correspondientes a ambos tipos de fallas (Fig. 2b y 2c), se aprecia que la distribución de fallas con componente inversa aparece repartida en una zona muy amplia que afecta también al antepaís. Por otro lado, las fallas normales parecen concentrarse a lo largo del margen mediterráneo y, sobre todo, en las zonas más elevadas de la cadena.

CONCLUSIONES

Los tensores de esfuerzos activos obtenidos a partir de poblaciones de mecanismos focales de terremotos en la dorsal oceánica atlántica (latitud $30^\circ N$ - $65^\circ N$) muestran una orientación de empuje que varía entre E-O y ESE-ONO, con valores de R que indican una extensión triaxial. En las zonas de falla transformante, que fragmentan y desplazan segmentos de la dorsal, el régimen de esfuerzos cambia a cizalla y se produce un giro en la dirección de Sh_{max} , disponiéndose hacia el NO en los desgarres dextrosos y hacia el NE en los sinestrosos.

Las orientaciones de los esfuerzos tectónicos activos a lo largo del margen Azores-Argelia permanecen muy constantes disponiéndose Sh_{max} según NO-SE, con un pequeño giro horario de no más de 20° hacia el Este. Los tipos de

esfuerzos experimentan un cambio muy notable, apareciendo la situación de compresión uniaxial al Este, Argelia y Béticas (si bien en esta última cadena aparece entremezclada una fracturación normal que parece relacionada con la topografía y su proximidad al margen mediterráneo), y de extensión triaxial al Oeste (punto triple de Azores y rift Terceira). El resto del límite Eurasia-África, que incluye la mayor parte de la península Ibérica, está dominado por esfuerzos de tipo cizalla y por extensiones uniaxiales (Noroeste peninsular —Galicia—, Francia).

REFERENCIAS

- Andeweg, B., De Vicente, G., Beekman, F., Cloetingh, S. y Muñoz Martín, A. (1998): Finite element modelling of Tertiary to present day stress fields in the Iberian Peninsula. Resúmenes «World Stress Map and beyond, Earth stress and Industry», Heidelberg (Alemania), 3-6 sept. 2.
- Anderson, E.M. (1951): The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain. Olivier & Boyd, Edimburgh, 133 p.
- Bott, M.H.P. (1959): The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, 96, 2: 109-117.
- C.S.N. (1998): Proyecto SIGMA: estado de esfuerzos reciente y actual en la Península Ibérica. Ed. Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid, 260 p.
- Dziewonski, A.M., Chou, T.-A. y Woodhouse, J.H. (1981): Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Jour. Geophys. Res.*, 86: 2825-2852. Catálogo del tensor de momento sísmico de la Universidad de Harvard - Proyecto CMT, disponible en <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>.
- Gölke, M. y Coblenz, D. (1996): Origins of the European regional stress field. *Tectonophysics*, 266: 11-24.
- I.P.S.N. (1993): Sismotectonique de la France métropolitaine dans son cadre géologique et géophysique. *Mem. Soc. Geol. de France*, 164, 1: 76 p.
- Kiratzí, A. y Papazachos, C. (1995): Active crustal deformation from the Azores triple junction to the Middle East. *Tectonophysics*, 243: 1-24.
- Reches, Z., Baer, G. y Hatzor, Y. (1992): Constraints on the strength of the Upper Crust from Stress Inversion of fault slip data. *Jour. Geophys. Res.*, 97, B9: 12.481-12.493.
- Vegas, R., Cloetingh, S., De Vicente, G., Giner, J., Andeweg, B., Rincón, P.J. y Muñoz Martín, A. (1998): Acomodación de la deformación intraplaca y la sismicidad resultante en la península Ibérica: flexuras de la corteza y corredores de falla. Resúmenes de la I Asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica, Aguadulce (Almería), 9-13 febr. 1998, 157.