

Rango de magnitudes de los esfuerzos tectónicos en una zona intraplaca: el macizo de El Berrocal, borde sur del Sistema Central Español

Tectonic stress magnitudes in an intraplate area: El Berrocal massif, southern boundary of the Spanish Central System

S. Martín Velázquez ⁽¹⁾, G. de Vicente ⁽¹⁾, A. Muñoz Martín ⁽¹⁾, F.J. Elorza ⁽²⁾ y A. Vela ⁽³⁾

⁽¹⁾Dept. de Geodinámica, Facultad CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. Dirección e-mail: smartin@escet.urjc.es (S. Martín Velázquez).

⁽²⁾ Dept. de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos, ETSI de Minas, Universidad Politécnica, 28003 Madrid.

⁽³⁾ Consejo de Seguridad Nuclear, 28040 Madrid.

ABSTRACT

Stress magnitudes throughout a NW-SE cross-section in El Berrocal granitic massif (Spanish Central System) have been analysed by means of finite element modelling. Topographic surface, lithological differences and recent compressive tectonic stresses have been included. Two kinds of models have been performed to study the influence of rheologic properties, one with average cortical mechanical properties and the other with the main lithologies. Horizontal tectonic stress magnitudes obtained in the last model have been checked with the recent stress ratio got by stress inversion of fault slip data. Horizontal tectonic load that better fits recent tectonic stress distribution is in the range of 10-15 MPa.

Key words: Finite element modelling, intraplate stress magnitude, Spanish Central System

Geogaceta, 32 (2002), 315-318
ISSN:0213683X

Introducción

En este trabajo se presenta un análisis de la distribución de esfuerzos mediante la técnica de los elementos finitos a lo largo de una sección vertical NW-SE situada en el borde meridional del Sistema Central Español, y que atraviesa el macizo de El Berrocal (Fig. 1). Este macizo puede considerarse como un stock granítico post-tectónico respecto a la orogenia hercínica (Fúster y Villaseca, 1987) que intruye en la granodiorita biotítica tipo «San Vicente» (297±1 Ma) durante una importante etapa extensiva (Doblas, 1989; Campos *et al.*, 1996). Como consecuencia de las etapas finales de la orogenia Hercínica y de las alpinas que estructuraron el Sistema Central (Capote *et al.*, 1990; De Vicente *et al.*, 1996), su afloramiento presenta un fuerte control estructural. Se encuentra intensamente fracturado (Fig. 1a y 1b), con predominio de fallas en dirección y normales, y fracturación subhorizontal hasta una profundidad de unos 300 m (Doblas, 1989; Campos *et al.*, 1996; CSN, 2000; Pérez López *et al.*, 2000). Se han definido dos

campos de paleoesfuerzos principales que caracterizan la evolución tensorial del macizo (CSN, 2000; Pérez López *et al.*, 2000): a) un campo extensional N-S relacionado con un evento de edad permotriásica (240±10 Ma) y b) un campo «alpino» con s_{HMAX} (esfuerzo máximo horizontal) N160E (Oligoceno-Actualidad?) (Fig. 1c). En el campo de esfuerzos alpino se ha observado una distribución preferente de los tensores en régimen de desgarre en valles afectados por fallas y de los tensores en régimen extensional en zonas topográficamente elevadas (CSN, 2000).

En la elaboración de los modelos de esfuerzos se ha empleado el método de los elementos finitos puesto que permite calcular eficazmente la magnitud y orientación de los esfuerzos, desplazamientos y/o deformaciones en un cuerpo con unas propiedades mecánicas y condiciones de contorno específicas (Zienkiewicz y Taylor, 1994). La comparación de los resultados obtenidos mediante modelizaciones numéricas con los datos de esfuerzos y/o deformaciones observados en la litosfera,

constituye una vía muy útil para comprender los procesos geodinámicos a distintas escalas (Richardson *et al.*, 1979; Cloetingh *et al.*, 1984; Göлке y Coblenz, 1996; Sassi y Faure, 1996; Meijer *et al.*, 1997; Coblenz *et al.*, 1998; Muñoz-Martín *et al.*, 1998; Andeweg *et al.*, 1999; Beekman *et al.*, 2000). El objetivo fundamental de este trabajo será cuantificar el rango de magnitudes de los esfuerzos tectónicos horizontales del campo de esfuerzos actual intraplaca teniendo en cuenta la topografía actual y las variaciones reológicas asociadas a las diferentes litologías presentes en el área.

Descripción del modelo de elementos finitos

Para determinar la distribución y magnitud de los esfuerzos horizontales horizontales (s_x) y verticales (s_y), se ha llevado a cabo un análisis estructural elástico bidimensional mediante el código Ansys (Swanson Analysis Systems, Inc). La modelización se ha realizado a lo largo de una sección vertical transversal a

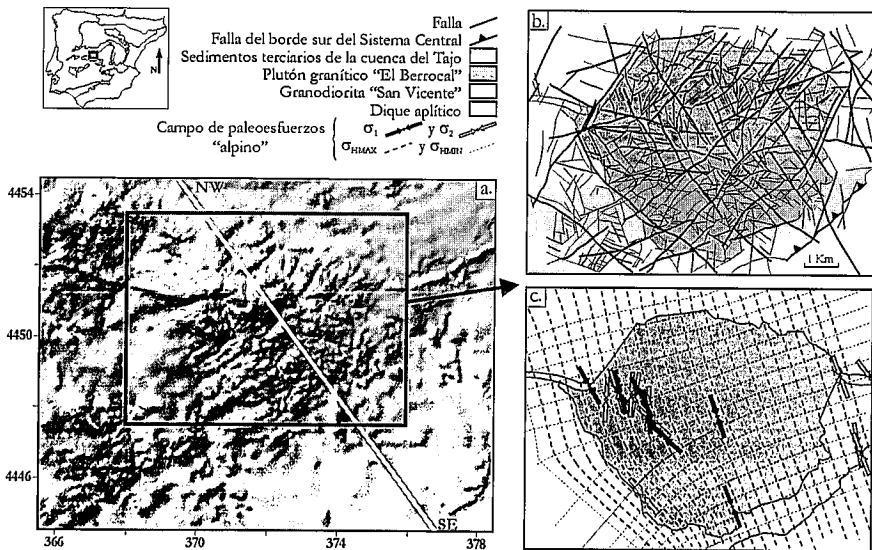


Fig. 1.- En el borde superior izquierdo se muestra la localización del macizo de El Berrocal dentro de la península Ibérica, en la que se han diferenciado los principales sistemas montañosos (tonos grises) y cuencas alpinas (blanco). a. Modelo digital del terreno (pixel 50 x 50 m) utilizado para obtener la topografía de la sección cortical modelizada (basado en los mapas topográficos E 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército con número 579, 580, 602 y 603). La escala está en unidades UTM en kilómetros referidas al huso 30. La línea NW-SE indica la orientación del perfil. b. Mapa geológico del macizo de El Berrocal con los principales cuerpos litológicos y red de fracturación. c. Mapa de paleoesfuerzos y trayectorias de s_{HMAX} y s_{HMIN} del campo de paleoesfuerzos alpinos a partir del análisis de poblaciones de fallas. s_{HMAX} , esfuerzo horizontal máximo; s_{HMIN} , esfuerzo horizontal mínimo; s_1 , esfuerzo principal máximo; s_2 , esfuerzo principal medio (modificadas de CSN, 2000).

Fig. 1.- In the upper-left corner, general setting of El Berrocal massif in the Iberian peninsula (main mountain ranges in grey and main alpine basins in white). a. Digital surface model (50 x 50 m pixel size) used to obtain the topography of the modelized cross-section (based in the 579, 580, 602, 603 topographic maps from Servicio Geográfico del Ejército). Scale in UTM units in kms referred to 30 zone. NW-SE line shows the orientation of the section. b. Geologic map of El Berrocal massif. c. Paleostress map with s_{HMAX} and s_{HMIN} trajectories from alpine paleostress field deduced from fault population analysis. s_{HMAX} , maximum horizontal stress; s_{HMIN} , minimum horizontal stress; s_1 , maximum main stress; s_2 , middle main stress (modified from CSN, 2000).

las principales estructuras alpinas del Sistema Central y subparalela a la orientación de s_{HMAX} del campo de esfuerzos actual (De Vicente et al., 1996; CSN, 1998; Herráiz et al., 2000) (Fig. 1a). Se han empleado dos tipos de modelos, diferenciados por su geometría y condiciones reológicas. En un caso se ha supuesto una reología media característica de la corteza superior (Fig. 2a, Tabla 1) y en el segundo se han incorporado las tres litologías principales que afloran en la zona estudiada (Fig. 2b, Tabla 1). Respecto a la malla de elementos finitos, se ha utilizado un elemento cuadrilátero de ocho nodos, con un tamaño medio de 125 x 125 m² y condiciones de deformación plana.

Se ha analizado el efecto de la reología en la magnitud de los esfuerzos en los dos supuestos reológicos previamente descritos, aplicando una carga horizontal compresiva de 20 MPa en los límites laterales, que simulará los esfuerzos tectónicos, y la aceleración de la gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$), asumiendo que

el esfuerzo principal en la vertical resulta de la carga litostática. Se ha restringido el desplazamiento vertical de los nodos basales y se ha fijado el movimiento horizontal del nodo localizado en la mitad de la base (Fig. 2). Bajo estas condiciones, las fuerzas gravitacionales provocan la compactación del modelo por el efecto de su propio peso. Estos desplazamientos verticales se han corregido mediante balance de fuerzas antes de incluir la carga tectónica.

Finalmente, se ha estudiado la influencia de la magnitud de los esfuerzos horizontales compresivos aplicados en la sección con reología heterogénea. Las condiciones de contorno son similares al caso anterior, y se han considerado tres valores de magnitud de carga tectónica: 10, 15 y 20 MPa.

Resultados de la modelización

Influencia de la reología

Los valores de s_x y s_y en el interior del macizo de El Berrocal hasta una profun-

dad aproximada de 1 km para la modelización homogénea, son menores de 15 MPa y se observa una concentración diferencial de esfuerzos (Fig. 3a1-a2). En los valles hay una acumulación de s_x de mayor magnitud con s_y compresivos, mientras que en las zonas elevadas se generan s_x compresivos de menor magnitud y s_y extensionales. Los resultados de la modelización heterogénea muestran discontinuidades en los contornos de las magnitudes de los s_x y s_y relacionadas con las distintas litologías (Fig. 3b1-b2). Se obtienen s_x de menor magnitud en las cotas altas así como en el plutón granítico hasta una profundidad aproximada de 1 km, y s_x de mayor magnitud en la zona del cabalgamiento sur del Sistema Central. Por último, se ha calculado el factor de forma s_x/s_y . En el perfil con una litología homogénea, el límite entre el sector superficial con $s_x > s_y$ y los dos sectores más profundos con $s_y > s_x$ parece estar condicionado fundamentalmente por la superficie topográfica (Fig. 3a3). Se localiza a unos 500 m de profundidad bajo la zona más elevada del plutón y a unos 750 m de profundidad en las zonas laterales menos elevadas. En la situación con reología heterogénea, los contactos litológicos modifican claramente el diagrama de contorno s_x/s_y , y la influencia de los s_x deja de sentirse a unos 200 m de profundidad por debajo de la cota máxima (Fig. 3b3).

Influencia de la magnitud de la carga tectónica aplicada

La magnitud de los esfuerzos tectónicos aplicados influye tanto en la magnitud como en el régimen de los esfuerzos dentro del macizo de El Berrocal. Bajo una compresión de 10 MPa, se obtienen s_x extensionales hasta una profundidad de 1 km, con valores que alcanzan 11 MPa (Fig. a1). Al aumentar la carga a 15 MPa, se restringe la zona con s_x extensionales (Fig. 4b1), y con 20 MPa tienen un carácter compresivo en toda la

MODELOS	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kg/m ³)
Reología homogénea			
Corteza superior	40E9	0.25	2600
Reología heterogénea			
Granito "El Berrocal"	50E9	0.25	2650
Granodiorita "San Vicente"	40E9	0.25	2700
Sedimentos de la cuenca del Tajo	30E9	0.25	2400

Tabla I.- Propiedades elásticas de los materiales incluidos en la modelización (Turcotte y Schubert, 1982).

Table I.- Elastic rheological properties of lithologies included in the modelling (Turcotte y Schubert, 1982).

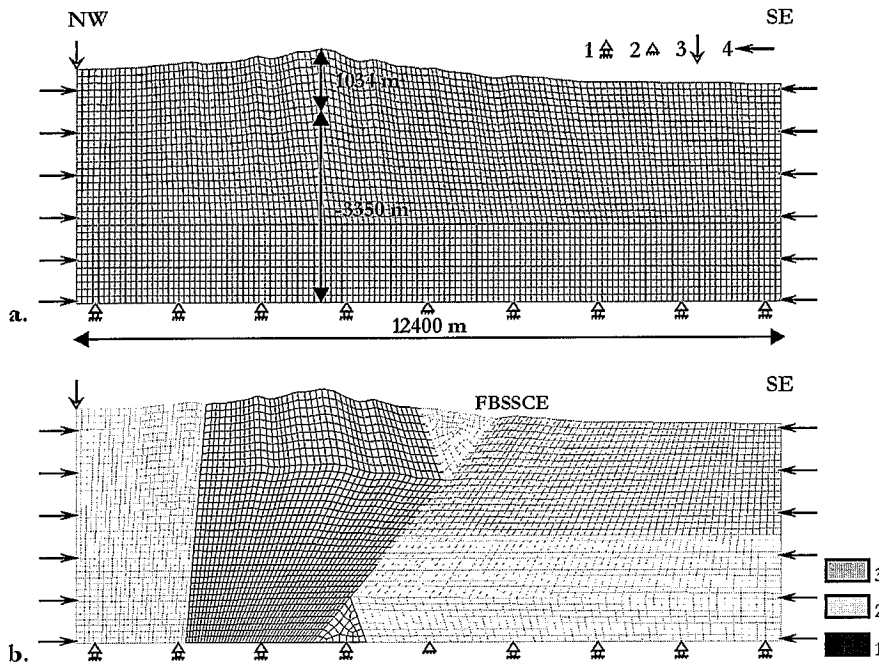


Fig. 2.- Mallado de elementos finitos, condiciones de contornos y cargas aplicadas para estudiar el efecto conjunto de la gravedad y una carga tectónica horizontal. a. reología homogénea y b. reología heterogénea (leyenda litológica: 1. granito tipo "El Berrocal", 2. granodiorita tipo "San Vicente", 3. sedimentos terciarios de la cuenca del Tajo). FBSSCE, falla del borde sur del Sistema Central Español. Leyenda de símbolos: 1. desplazamiento permitido en la horizontal, 2. nodo sin desplazamiento, 3. gravedad, 4. carga tectónica horizontal.

Fig. 2.- Finite element grid, boundary conditions and applied loads to study the effect of gravity and horizontal tectonic load. a. homogeneous rheology and b. heterogeneous rheology (lithological legend: 1. granite type "El Berrocal", 2. granodiorite type "San Vicente", 3. tertiary sediments of Tajo basin). FBSSCE, Spanish Central System southern boundary fault. Symbol legend: 1. allowed horizontal displacement, 2. node without displacement, 3. gravity, 4. horizontal tectonic load.

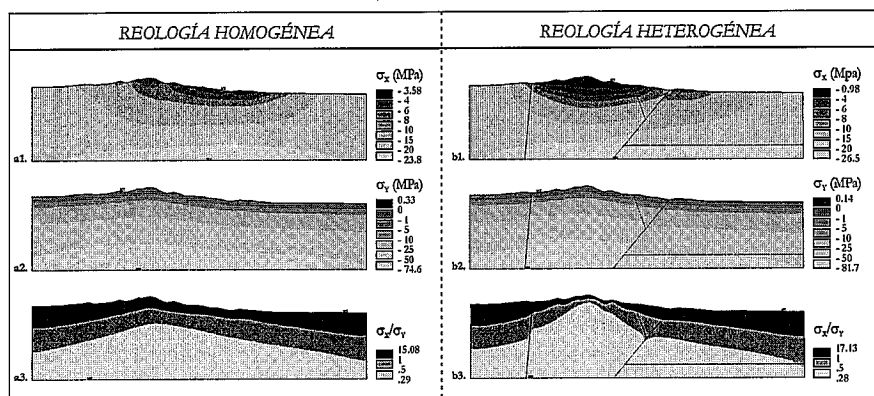


Fig. 3.- Diagramas de contornos de la distribución de esfuerzos al aplicar la gravedad y una carga horizontal de 20 MPa (a. reología homogénea y b. variaciones litológicas): a1-b1. magnitudes de σ_x (megapascas), a2-b2. magnitudes de σ_y (megapascas) y a3-b3. magnitudes de σ_x/σ_y . Las representaciones se han limitado hasta una cota de -2000 m. Los valores de esfuerzos negativos indican compresión y los positivos extensión. En cuanto al factor de forma, los valores positivos implican que σ_x y σ_y tienen igual signo, y las magnitudes menores y mayores que 1 indican respectivamente que $\sigma_y > \sigma_x$ o $\sigma_x > \sigma_y$. MX, localización del valor máximo, y MN, localización de valor mínimo.

Fig. 3.- Contour displays of stress distribution from gravity and a horizontal load of 20 MPa (a. homogeneous rheology and b. lithological changes): a1-b1. σ_x (MPa), a2-b2. σ_y (MPa) and a3-b3. σ_x/σ_y . Displays down to -2000 m. Negative stress values indicate compression and positive ones indicate tension. Positive values of stress ratio implicate that σ_x and σ_y have the same sign, and smaller or bigger magnitudes than 1 implicate that $\sigma_y > \sigma_x$ or $\sigma_x > \sigma_y$, respectively. MX, maximum value, and MN, minimum value.

sección (Fig. 4c1, 3b2). Este incremento progresivo de carga tectónica produce además un incremento paulatino de los σ_x . Los σ_y son prácticamente similares en las tres situaciones, con una ligera disminución de las magnitudes al aumentar el valor de la carga (Fig. 4a2-b2-c2). Al representar el factor de forma σ_x/σ_y se observa una zona superficial con $\sigma_x > \sigma_y$, aproximadamente hasta 200 m de profundidad en la zona del granito. En el modelo sometido a una carga de 20 MPa, esta zona constituye una banda continua pero en los modelos con 10 y 15 MPa, está seccionada por sectores con mayor magnitud de σ_y respecto a los σ_x (Fig. 4a3-b3-c3).

Conclusiones

La realización de modelos de elementos finitos en el macizo de El Berrocal permite contrastar la influencia del relieve, las propiedades mecánicas de los materiales y la magnitud de los esfuerzos tectónicos en la distribución de magnitudes de esfuerzos en la corteza superior.

La topografía produce una distribución diferencial de los esfuerzos con magnitudes mayores en las zonas de valle y menores en las zonas elevadas. Estos datos ajustan bien con los datos del campo de esfuerzos más reciente dentro de la zona (Oligoceno-Actualidad?) que indica extensión en las cotas elevadas y compresión (régimen de desgarrar) en los valles y en las proximidades de la falla del borde sur del Sistema Central (CSN, 2000; Pérez López et al., 2000).

Cuando existen variaciones reológicas espaciales importantes, es necesario incluirlas en los modelos para cuantificar las magnitudes de los esfuerzos de un modo realista. Los resultados de la modelización de esfuerzos indican que las mayores variaciones en la distribución de los esfuerzos están asociadas a la presencia del granito y al contacto con los sedimentos terciarios de la cuenca del Tajo.

El ajuste de los modelos de esfuerzos con los datos de inversión de esfuerzos (presencia de tensores de esfuerzos alpinos de carácter tensional en el macizo de El Berrocal (CSN, 2000; Pérez López et al., 2000) implica que los esfuerzos tectónicos intraplaca en el centro de la península Ibérica durante las deformaciones terciarias no debieron superar los 20 MPa. Estos resultados ajustan bien con los trabajos realizados en la península sobre magnitudes de esfuerzos tectónicos corticales mediante técnicas de medida directas, que proporcionan un rango de

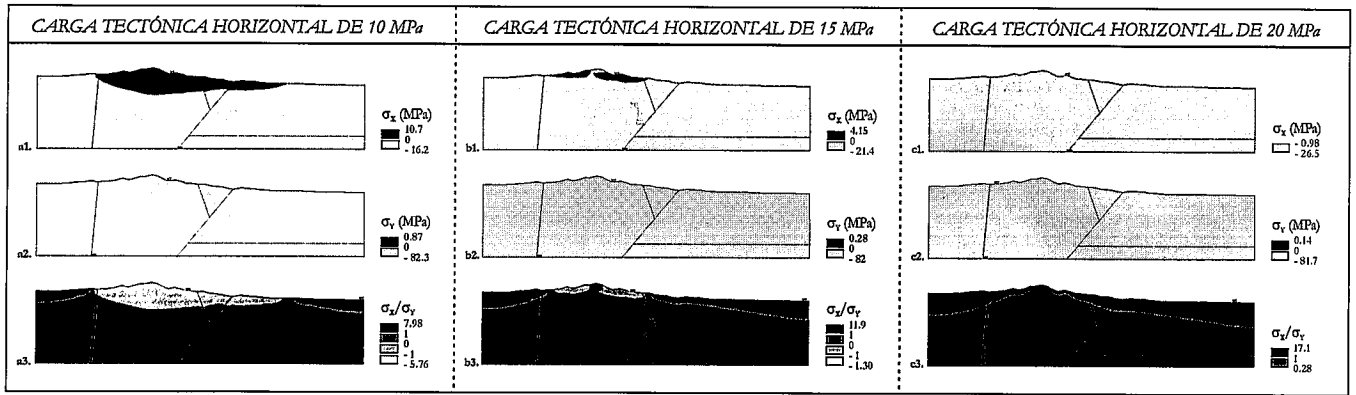


Fig. 4.- Diagramas de contornos de la distribución de esfuerzos al aplicar la gravedad y una carga horizontal de a. 10 MPa, b. 15 MPa y c. 20 MPa, en el corte NW-SE de El Berrocal con variaciones litológicas: a1-b1-c1. magnitudes de σ_x (megapascasles) y a3-b3-c3. magnitudes de σ_x/σ_y . Las representaciones se han limitado hasta una cota de -2000 m. Los valores de esfuerzos negativos indican compresión y los positivos extensión. Respecto al factor de forma, los valores negativos implican que σ_x y σ_y tienen distinto signo, los valores positivos que tienen igual signo y, las magnitudes comprendidas entre -1 y 1 indican que $\sigma_y > \sigma_x$ y en el resto de los casos que $\sigma_x > \sigma_y$. MX y MN, localización de los valores máximo y mínimo, respectivamente.

Fig. 4.- Contour displays of stress distribution from gravity and a horizontal load of a. 10 MPa, b. 15 MPa and c. 20 MPa, in the NW-SE section with lithological changes: a1-b1-c1. σ_x (MPa), a2-b2-c2. σ_y (MPa) and a3-b3-c3. σ_x/σ_y . Displays down to -2000 m. Negative stress values indicate compression and positive ones indicate tension. Positive values of stress ratio implicate that σ_x and σ_y have the same sign, and smaller or bigger magnitudes than 1 implicate that $\sigma_y > \sigma_x$ or $\sigma_x > \sigma_y$, respectively. MX, maximum value, and MN, minimum value.

valores del esfuerzo horizontal máximo entre 10-20 MPa a un kilómetro de profundidad (González de Vallejo *et al.*, 1988; Jurado y Müller, 1997; Schindler *et al.*, 1998), y con las magnitudes obtenidas mediante modelizaciones numéricas previas (Gölke y Coblenz, 1996; Andeweg *et al.*, 1999). Las magnitudes de esfuerzo tectónico horizontal entre 10-15 MPa reproducen mejor la distribución de los paleoesfuerzos más recientes en el área estudiada. En estas condiciones aparece una banda con dominio de $\sigma_y > \sigma_x$ hasta 200 m de profundidad.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación Hidrobap II.

Referencias

Andeweg, B., De Vicente, G., Cloetingh, S., Giner, J. y Muñoz Martín, A. (1999): *Tectonophysics*, 305, 153-164.
 Beekman, F., Badsı, M. y Van Wees, J.D. (2000): *Tectonophysics*, 320, 311-329.
 Campos, R., Martín Benavente, C., Pérez del Villar, L., Pardillo, J., Fernández-Díaz, M., Quejido, A., De la Cruz, B. y Rivas, P. (1996): *Geogaceta*, 20: 1618-1621.

Capote, R., De Vicente, V. y González-Casado, J.M. (1990): *Geogaceta*, 7, 20-22.
 Cloetingh, S.A.P.L., Wortel, M.J.R. y Vlaar, N.J. (1984): *Tectonophysics*, 109, 147-163.
 CSN (1998): CSN, Madrid, 239 pp.
 CSN (2000): CSN, Madrid, 238 pp.
 Coblenz, D.D., Zhou, S., Hillis, R.R., Richardson, R.M. y Sandiford M. (1998): *Jour. Geophys. Res.*, 103, 919-931.
 De Vicente, G., Giner, J.L., Muñoz Martín, A., González Casado, J.M., y Lindo, R. (1996): *Tectonophysics*, 266, 405-424.
 Doblas, M.M. (1989): Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 465 pp.
 Fúster, J.M. y Villaseca, C. (1987): En: *Geología de los granitoides y rocas asociados del macizo hespérico. Libro homenaje L.C. García de Figuerola* (Bea, F.; Carnicero, A; Gonzalo, J.C.; López Plaza, M y Rodríguez Alonso, M.D., eds.), Rueda, Alcorcón, 27-35.
 Gölke, M. y Coblenz, D. (1996): *Tectonophysics*, 266, 11-24.
 González de Vallejo, L.I., Serrano, A.A., Capote, R. y De Vicente, G. (1988): En: *Rock Mechanics and Power Plants (Romana, ed.)*, Balke-

ma, Rotterdam, 165-172.
 Herráiz, M., De Vicente, G., Lindo Naurari, R., Giner, J., Simón, J.L., González Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortes A.L., Ramírez, M., Lucini, M. (2000): *Tectonics*, 19, 762-786.
 Jurado, M.J. y Müller, B. (1997): *Tectonophysics*, 282, 99-115.
 Meijer, P.Th., Govers, R. y Wortel, M.J.R. (1997): *Earth and Planet. Sci. Letters*, 148, 157-170.
 Muñoz-Martín, A., Cloetingh, S., De Vicente, G., y Andeweg, B. (1998): *Tectonophysics*, 300, 47-62.
 Pérez López, R., Muñoz Martín, A., Paredes, C., De Vicente, G. y Elorza F.J. (2000): *Rev. Soc. Geol. España*, 13, 487-503.
 Richardson, R.M., Solomon, S.C. y Sleep, N.H. (1979): *Rev. Geophys. Space Phys.*, 17, 981-1019.
 Turcotte, D.L. y Schubert, G. (1982): *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 450 pp.
 Sassi, W. y Faure, J.L. (1996): *Tectonophysics*, 266, 101-119.
 Schindler, A., Jurado, M.J. y Müller, B. (1998): *Tectonophysics*, 300, 63-77.
 Zienkiewicz, O.C. y Taylor, R.L (1994): *McGraw-Hill, London*.