

# Sismicidad en el antepaís de las cordilleras Béticas orientales: determinación del tensor de esfuerzos actual

*Seismicity in the castilian foreland of de betic cordilleras: neotectonic stress tensor determination*

P.J. Rincón, J. Giner, R. Vegas y G. De Vicente

Dpto. de Geodinámica, Fac. de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense; 28040, Madrid.

ABSTRACT.

The seismicity in the Castilian foreland of the Betic Cordilleras is in accordance with an intraplate compressive stress-field that is characterized by the coexistence of two stress tensors:  $S_{Hmax}$  N140°-160°E (regional tensor) and  $S_{Hmax}$  N60°-70°E (secondary tensor). The subsequent intraplate deformation is accommodated by means of dextral strike-slip faults and crustal flexures. The seismic activity seems to be concentrated in some N130°-150°E fault zones in the front of the Alcaraz Arc.

**Key words:** stress tensor, fault plane mechanisms, fault population analysis, Betic foreland, seismicity.

Geogaceta, 20 (4) (1996), 932-935  
ISSN: 0213683X

Introducción

La zona de estudio ocupa (Fig. ) gran parte del *antepaís castellano oriental* de las Cordilleras Béticas (provincias de Ciudad Real y Albacete), en el cual afloran materiales de naturaleza y edad diversa: basamento paleozoico de características centroibéricas (Campo de Calatrava), cobertera mesozoica tabular del Campo de Montiel, cuenca neógeno-cuaternaria de la Llanura Manchega, o volcánitas básicas neógeno-cuaternario del Campo de Calatrava. El objetivo de este trabajo es caracterizar el campo de esfuerzos actual que incide sobre este área mediante el análisis (1) de seis mecanismos focales de terremotos, y (2) de quinientos treinta planos de falla con estrías medidos en materiales carbonatados mesozoicos y lávicos neógeno-cuaternarios.

Metodología de trabajo

Para determinar el estado de esfuerzos actual se emplea metodología de análisis del conjunto de mecanismos focales contrastada con técnicas de análisis poblacional de fallas recientes. Esto permite la obtención de estados de paleoesfuerzos. En el análisis y construcción de los mecanismos focales individuales de cada uno de los eventos se han empleado dos métodos que concluyen, para el conjunto de sismos ana-

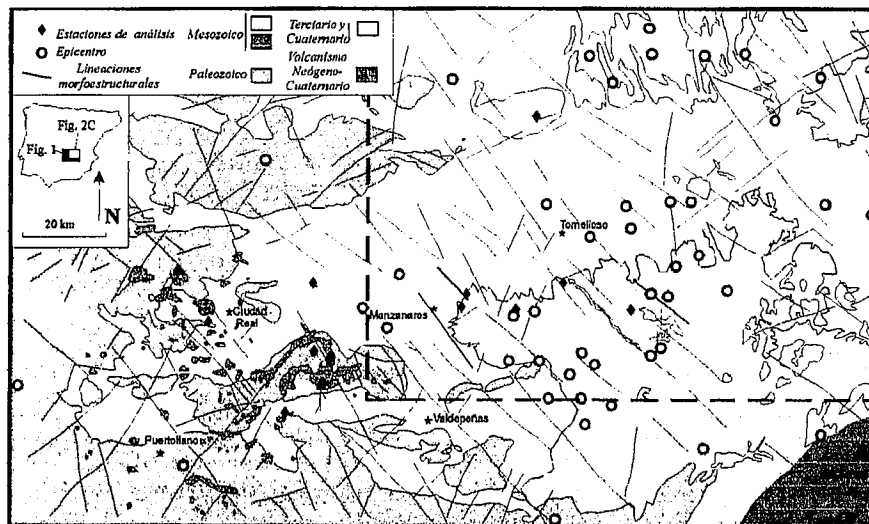


Fig. 1.- Situación geográfica y esquema geológico del área estudiada. Localización de las estaciones de análisis mesoestructural y de los epicentros de los sismos.

Fig. 1.- Geological sketch of the study area showing the location of epicenters and stations for mesostructural analysis.

lizados, un tensor óptimo de ajuste. Las metodologías utilizadas han sido: (a) *Método de análisis poblacional ponderado de mecanismos focales*, basado en el *Modelo de Deslizamiento* del análisis poblacional de fallas (Giner et al., en prensa); (b) *Método de determinación simultánea del tensor de esfuerzos y los mecanismos focales individuales* (Rivera y Cisternas, 1990). El análisis poblacional de fallas se ha rea-

lizado siguiendo el *Modelo de Deslizamiento* (Reches, 1983; De Vicente, 1988), y el *Método de Inversión de Esfuerzos* (Reches, 1987; Reches et al., 1992). Ambos permiten determinar, tanto la orientación y forma ( $R=s_2-s_3/s_1-s_3$ ) de los tensores de esfuerzos puntuales, como la orientación del eje principal de esfuerzos máximo en la horizontal ( $S_{Hmax}$ ). El carácter de *área de plataforma* de la zona de estudio pro-

porciona mayor fiabilidad a un análisis estructural realizado a partir de *mesoestructuras* frágiles (Hancock, 1985).

**Análisis de los mecanismos focalñes**

Para la construcción y análisis de los mecanismos focales se ha procedido al filtrado de los sismos inventariados en el área de estudio (I.G.N., 1993) en función de la calidad de los parámetros calculados por el I.G.N. (Tabla ). De esta forma, se han elegido 6 sismos sucedidos durante los últimos diez años de magnitudes comprendidas entre 3 y 3.6, y cuyas profundidades oscilan entre 2 y 7 kilómetros. Las dos metodologías de análisis poblacional de mecanismos focales muestran resultados análogos (Fig. ). El análisis mediante la metodología propuesta por Rivera y Cisternas (1990) revela una disposición de  $S_{Hmax}$  según N125°E, con un valor de  $R$  muy próximo a 0 que permite una posible permutación de los ejes principales de esfuerzo  $s_2$  y  $s_3$ . El análisis mediante el Modelo de Deslizamiento muestra orientaciones de  $S_{Hmax}$  entre N125°E y N160°E. No obstante, el sismo nº 1 (Tabla ) revela una orientación de  $S_{Hmax}$  hacia N50°E, ortogonal a la deducida del resto de los mecanismos focales.

**Análisis poblacional de fallas**

Se han medido 530 planos de falla estriados repartidos en un total de trece estaciones de análisis microestructural (Fig. ), de las cuales seis se localizan en materiales jurásicos del Campo de Montiel, y siete en materiales lávicos del Neógeno-Cuaternario del Campo de Calatrava. En la práctica totalidad de las estaciones analizadas, los resultados (Fig. y ) muestran la presencia de dos modas ortogonales en la orientación de  $S_{Hmax}$ : una según N140°-160°E y otra según N60°-70°E (Rincón, 1995). Ambas modas aparecen definidas por fallas con una elevada componente direccional, tanto normales como inversas, relacionables con un campo de esfuerzos *compresivo* ( $s_1$  y  $s_3$  horizontales y  $s_2$  vertical). Al primero de los campos se le puede relacionar con las Cordilleras Béticas, por lo cual lo denominamos como "**campo bético**". En los dos campos deducidos, los ejes principales  $s_1$  (coincidente con la *máxima compresión en la horizontal* ó  $S_{Hmax}$ ) y  $s_3$  se disponen horizontales hacia

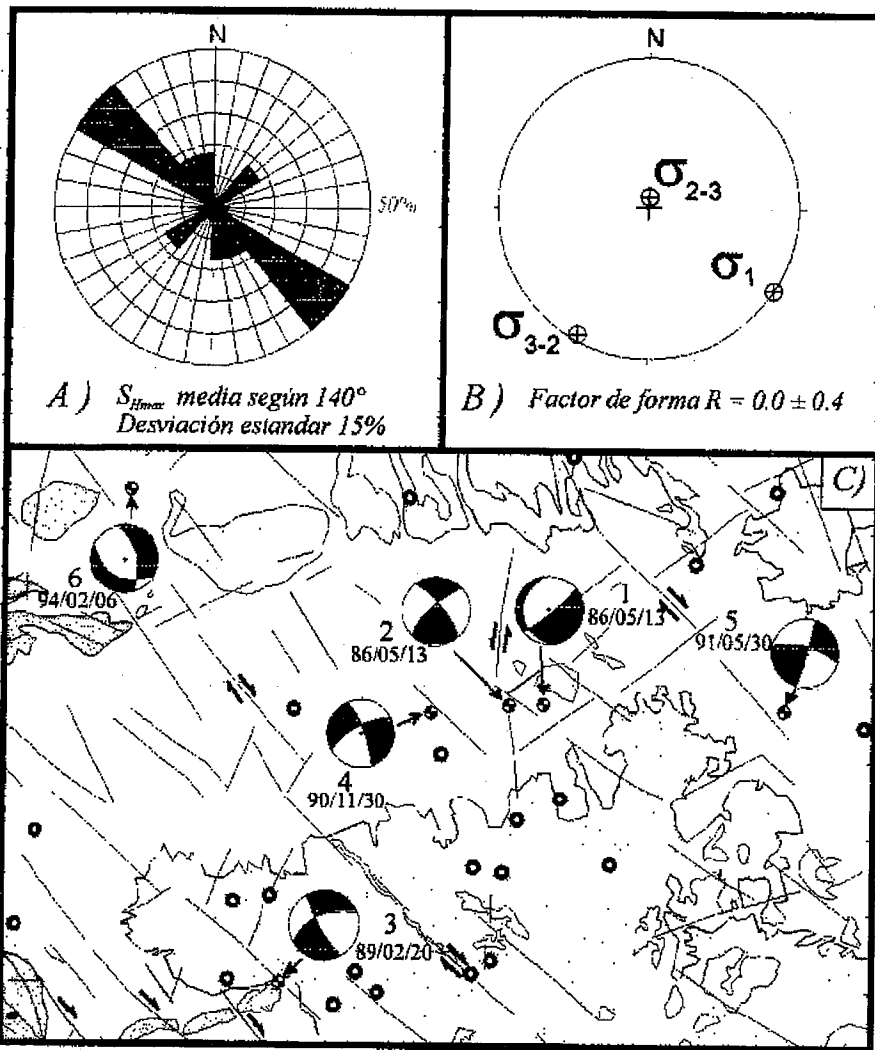


Figura nº 2: Resultados obtenidos del análisis de los seis mecanismos focales: A) Rosa de orientaciones de  $S_{Hmax}$  deducidas del análisis de los planos de falla de los mecanismos focales (Modelo de Deslizamiento); B) Orientación y forma del tensor solución (Schmidt, hemisferio inferior); y C) Localización en el área de estudio (véase figura 1) de los mecanismos focales deducidos.

Figure nº 2: (A) Rose diagram for  $S_{Hmax}$  deduced from fault plane solutions of focal mechanisms (slip model); (B) Form and orientation of the solution tensor (lower-hemisphere, Schmidt); (C) Situation of inferred focal mechanisms (see figure 1 for location).

SISMO	FECHA	HORA	LONGITUD	LATITUD	PR.	EH	EZ	NO	MAG	INT	LOCALIZACION
1	1986-05-13	18-38-43.6	02-43.5W	39-13.8N	5	2	3	37	3,6	III	VILLARROBLEDO.AB
2	1986-05-13	20-24-19.4	02-40.4W	39-13.7N	5	3	3	12	3		VILLARROBLEDO.AB
3	1989-02-20	03-25-36.8	03-04.9W	38-53.5N	7	1	1	45	3,6	III-IV	ALHAMBRA.CR
4	1990-11-30	21-52-11.9	02-50.9W	39-13.1N	2	2	2	16	3		SOCUELLAMOS.CR
5	1991-05-30	20-10-39.1	02-17.7W	39-13.3N	2	1	2	37	3,5		MINAYA.AB
6	1994-02-06	05-27-00.0	03-20.0W	39-30.0N	6	1	6	17	3,5		VILLACAÑAS.T

Tabla nº 1: Parámetros de los sismos elegidos para la determinación y análisis de los mecanismos focales: FECHA, fecha del evento; HORA hora origen; LONGITUD y LATITUD; PR profundidad; EH error epicentral (en kms.); EZ error en profundidad (en km.); NO número de observaciones; MAG magnitud; INT intensidad (I.G.N., 1993).

Table nº 1: Hypocentral date and location (see figure 2) of the earthquakes studied. PR, Depth; EH Epicentral error epicentral (km.); EZ Depth error (km.), (I.G.N., 1993).

N140°-160°E y N60°-70°E, respectivamente, y *viceversa*; mientras que el eje  $s_2$  se sitúa en la vertical. La relación angular observada entre ambas modas ( $\gg 90^\circ$ ) sugiere la posibilidad de que los dos tensores de esfuerzos sean consecuencia de un mismo proceso geodinámico. No se ha podido determinar una relación temporal entre los mismos, apareciendo ambas soluciones en los diversos materiales analizados. Así, uno de ellos reflejaría el tensor regional ( $S_{Hmax}=N140^\circ-160^\circ E$ ) y el otro un tensor secundario ( $S_{Hmax}=N60^\circ-70^\circ E$ ) inducido por la permutación de los ejes de esfuerzo  $s_1$  y  $s_3$  en la horizontal. Estas permutaciones han de situarse dentro del *contexto flexural* (flexuras consecutivas de distintas longitudes de onda) de todo el *antepaís castellano* (Vegas y Rincón, 1996). Es en el extradós de las flexuras "positivas" (aquellas que tienden a generar relieve) donde dichas permutaciones serían más factibles. La disposición espacial de este campo de esfuerzos regional coincide con la del *vector de convergencia* ("slip vector") África-Península Ibérica ocurrida entre los últimos 9 millones de años y la actualidad (Dewey *et al.*, 1989). El estado de esfuerzos de carácter secundario pudiera también ser consecuencia de un *escape lateral* a favor de estructuras previas orientadas  $\gg N60^\circ E$ . De cualquier forma, y debido a la poca intensidad del campo, las posiciones de los ejes  $s_1$  y  $s_2$  son intercambiables localmente, dado el valor de  $R$  obtenido ( $=0,54$ ), en ambos estados (regional y secundario). Las permutaciones están favorecidas por posibles acomodaciones de  $S_{Hmax}$  a discontinuidades previas de edad hercínica o triásica. Por ejemplo, la disposición favorable de estructuras subparalelas a  $S_{Hmax}$  podrían explicar algunos tensores detectados *localmente extensivos* ( $s_2$  y  $s_3$  horizontales y  $s_1$  vertical), de génesis similar a los propuestos para el norte de Marruecos por Medina (1995).

El tensor regional ( $S_{Hmax}=N140^\circ-160^\circ E$ ) queda definido al norte y al sur del área de estudio. Hacia el norte, la deformación (de edad Mioceno medio-actualidad) afecta, tanto a materiales mesozoicos de la Sierra de Altomira y Sistema central, como a materiales del Mioceno superior-Pleistoceno de la Cuenca de Madrid (De Vicente *et al.*, en prensa). Hacia el sur, la edad de esta deformación regional se amplía desde

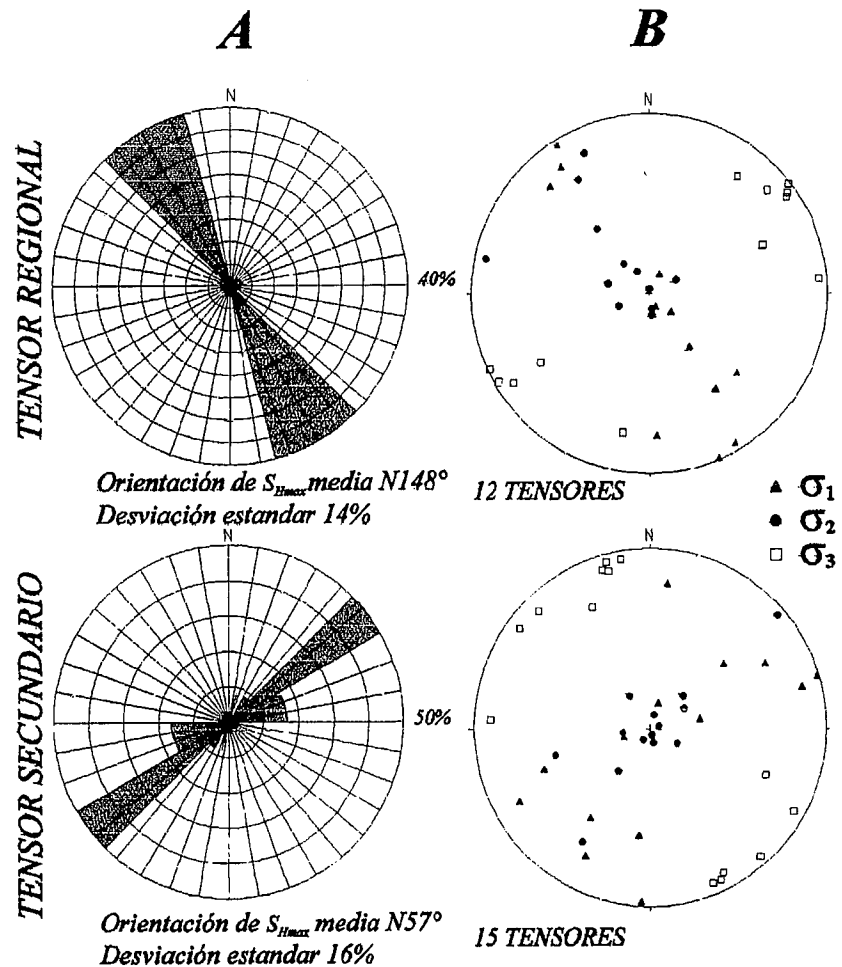


Fig. 3.- Resultados del análisis de las poblaciones en los materiales mesozoicos (A), materiales lávicos neógenos-cuaternarios (B), y en la suma total de ambos (C). Se representan la rosa de orientaciones de  $S_{Hmax}$  (Modelo de Deslizamiento) junto con la proyección estereográfica (Schmidt, hemisferio inferior) y el diagrama de densidades de los ejes principales de los dos tensores deducidos (Método de Inversión de Esfuerzos).

Fig. 3.- Orientation rose for  $S_{Hmax}$  (Slip model), and stereographic (lower-hemisphere, Schmidt) and density diagram for the principal axes of the two deduced tensors (Stress inversion method). (A) limestones Mesozoic, (B) Neogene-Quaternary volcanics, (C) Sum of A and B.

comienzos del Mioceno hasta la actualidad (Galindo-Zaldívar *et al.*, 1993).

**Conclusiones.**

A partir del análisis estructural realizado con mecanismos focales y planos de falla con estrías, se deduce que la convergencia entre África y la Península Ibérica se ha resuelto en el antepaís castellano, durante los últimos 9 millones de años, con la incidencia de un campo compresivo ( $s_1$  y  $s_3$  horizontales y  $s_2$  vertical): el "campo bético". Este campo ha permitido la coexistencia en el tiempo en la zona de trabajo de dos tensores de esfuerzos ortogonales entre sí: uno con  $S_{Hmax}$  orientado N140°-160°E (*tensor regional* que coincide

con el vector de convergencia o *slip vector* entre ambas placas), y otro con  $S_{Hmax}$  según N60°-70°E (*tensor secundario*). Coexistencias similares han sido citadas para otras zonas del planeta por otros autores (Hippolyte *et al.*, 1992; Rebaï *et al.*, 1992; Medina, 1995). De los sismos analizados, cinco aparecen relacionados con la compresión NW-SE y uno con extensión según esa misma dirección. Esta deformación se ha atenuado creando y/o reactivando fallas con una elevada componente direccional, tanto normales como inversas, dentro de un contexto regional de sucesivas flexuras litosféricas (Vegas y Rincón, 1996). La actividad sísmica se concentra en grandes fracturas de carácter dextro orienta-

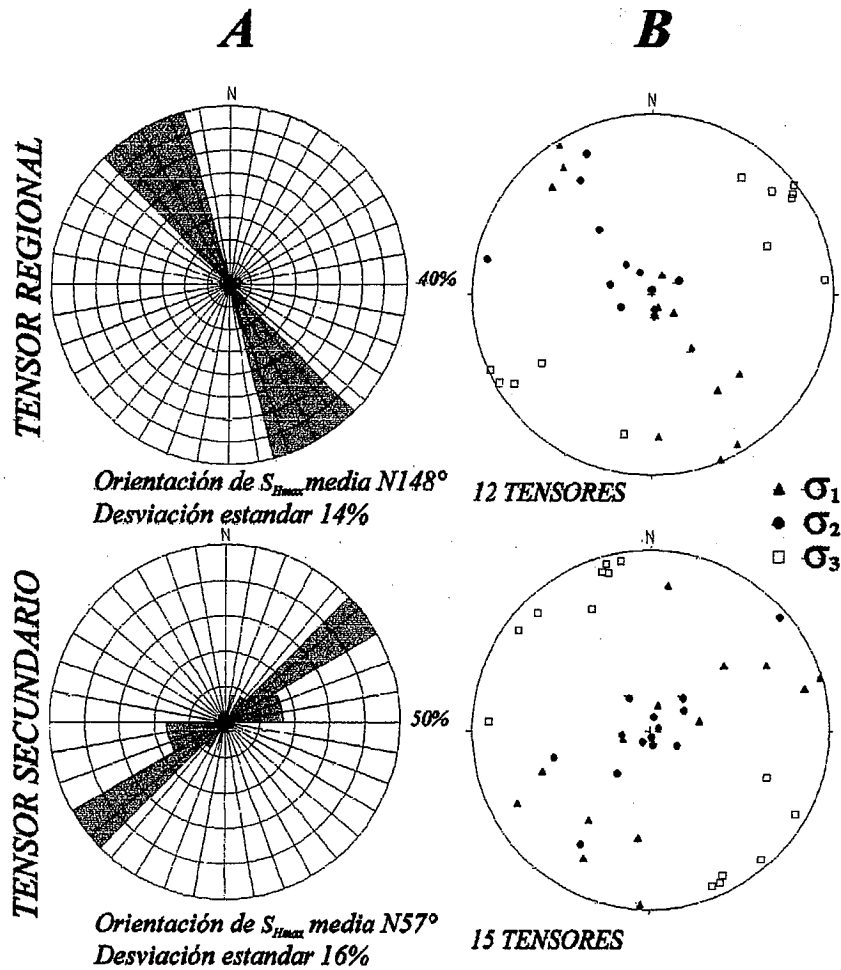


Fig. 4.- Representación mediante proyección estereográfica de los dos tensores de esfuerzos deducidos según el Modelo de Deslizamiento y el Método de Inversión de Esfuerzos. Nótese la coincidencia entre  $S_{Hmax}$  y  $s_p$ , así como la posición vertical de  $s_2$ , la horizontal de  $s_3$ , y la posición variable del eje máximo  $s_1$ : horizontal o vertical (Schmidt, hemisferio inferior).

Fig. 4.- Stereographic representation of the two stress tensors deduced from the Slip model (A) and the Stress inversion method (B). Note the coincidence orientation of  $S_{Hmax}$  and  $s_p$ , as well as  $s_2$  vertical and  $s_3$  horizontal, being  $s_1$  horizontal or vertical (lower-hemisphere, Schmidt).

das N130°-150°E que limitan "corredores" independientes de deformación, los cuales aparecen siempre en el frente de la estructura bética del Arco de Alcaraz. La intensidad deformacional del "campo bético" decrece, pues, de este a oeste. Por tanto, el incremento del riesgo sísmico en el antepaís castellano está condicionado por: (1) la disposición favorable de fracturas previas; y (2) la posición de éstas con respecto al Arco de Alcaraz.

**Agradecimientos**

Agradecemos a D. Juan Rueda (I.G.N.) las facilidades proporcionadas en la adquisición de los datos relacionados con la sismicidad.

**Referencias**

De Vicente, G. (1988): *Tesis Doctoral*, U.C.M.; 331 pp..  
 De Vicente, G.; Giner, J.L.; Muñoz-Martín, A.; González-Casado, J.M.; Rodríguez-Pascua, M.A.: *Tectonophysics* (en prensa)  
 Dewey, J.F.; Helman, M.L.; Turco, E.; Hutton, D.H.W.; Knot, S.D. (1989): En *Alpine Tectonics*, Geol. Soc. Spec. Publ., 45; 265-283.  
 Galindo-Zaldívar, J.; González-Lodeiro, F.; Jabaloy, A. (1993). *Tectonophysics*, 227: 105-126  
 Giner, J.L. (1996): Tesis doctoral. Fac. CC. Geológicas. UCM, Madrid. 300 pp.  
 Hancock, P.L. (1985): *J. Struct. Geol.*, 7;

437-457.  
 Hippolyte, J.C.; Angelier, J.; Roure, F. (1992): C. r. Acad. Sci. Paris, sér. II, 315; 89-95.  
 I.G.N. (1993): Petición de datos "09-02-93".  
 Medina, F. (1995): *J. Struct. Geol.*, 17; 1035-1046.  
 Rebaï, S.; Philip, H.; Taboada, A. (1992): *Geophys. J. Int.*, 110; 106-140.  
 Reches, Z. (1983) *Tectonophysics*, 95: 133-156.  
 Reches, Z. (1987): *Tectonics*, 6; 849-861.  
 Reches, Z.; Baer, G. y Hatzor, Y. (1992). *J. Struc. Geol.*; vol 97, nºB9: 12481-12493  
 Rincón, P.J. (1995): *Tesis de Licenciatura*, U.C.M.; 230 pp..  
 Rivera, L.A. y Cisternas, A. (1990). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80(3), 600-614  
 Vegas, R.; Rincón, P.J. (1996): En prensa, *Geogaceta*, ; 31-34.