

# Esfuerzos recientes en el sector sudoriental de la Depresión de Granada (Cordillera Bética central)

*Recent stresses in the southeastern Granada Depression (central Betic Cordillera)*

Galindo-Zaldívar, J. (\*), Jabaloy, A. (\*), Serrano, I. (\*\*), Morales, J. (\*\*,\*\*\*), González-Lodeiro, F. (\*) y Torcal, F. (\*\*)

(\*) Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. 18071-Granada (Spain).

(\*\*) Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. 18071-Granada. (Spain).

(\*\*\*) Departamento de Física Teórica y del Cosmos. Universidad de Granada. 18071-Granada. (Spain).

## ABSTRACT

The analysis of the seismic activity and the microtectonic study of outcrops located in the southeastern Granada Depression show that the stress states have been heterogeneous from the Upper Miocene up to the present. NE-SW extensional stresses may be associated to the activity of NW-SE oriented normal faults, that coexist with NW-SE compressional stresses, related to the development of NE-SW oriented folds. Other stress ellipsoids have been also determined, generally with the same orientation of the ellipsoid main axes. The stress states calculated are compatible with the uprising of the basement of the Granada Depression and with the crustal thickening process related to Africa-Iberia convergence.

**Key words:** Betic Cordillera, Granada Depression, paleostresses, present-day stress, seismicity.

Geogaceta, 24 (1998), 127-130

ISSN: 0213683X

## Introducción

En la Depresión de Granada afloran rocas sedimentarias de edad Mioceno inferior a la actualidad, con espesores superiores a 2 km en algunos sectores (Morales *et al.*, 1990). En su mitad SE, estas rocas se disponen discordantes sobre rocas alpujárrides (Fig. 1). La morfología de esta depresión es consecuencia de una fuerte actividad tectónica desde el Tortoniano a la actualidad, que se produce en un contexto tectónico regional determinado por la convergencia en dirección NW-SE entre Iberia y Africa (De Mets *et al.*, 1990). La posición actual de las rocas tortoniosas, a cotas que superan en algunos sectores los 1500 m (Sanz de Galdeano, 1976), muestra el rápido levantamiento de la cordillera.

Las principales estructuras activas en esta área desde el Mioceno superior son fallas normales NW-SE de alto ángulo y pliegues de gran radio. Estas fallas tienen geometría en dominó (Galindo-Zaldívar *et al.*, 1996) y se unen a una falla normal de bajo ángulo, que separa el Alpujárride y el

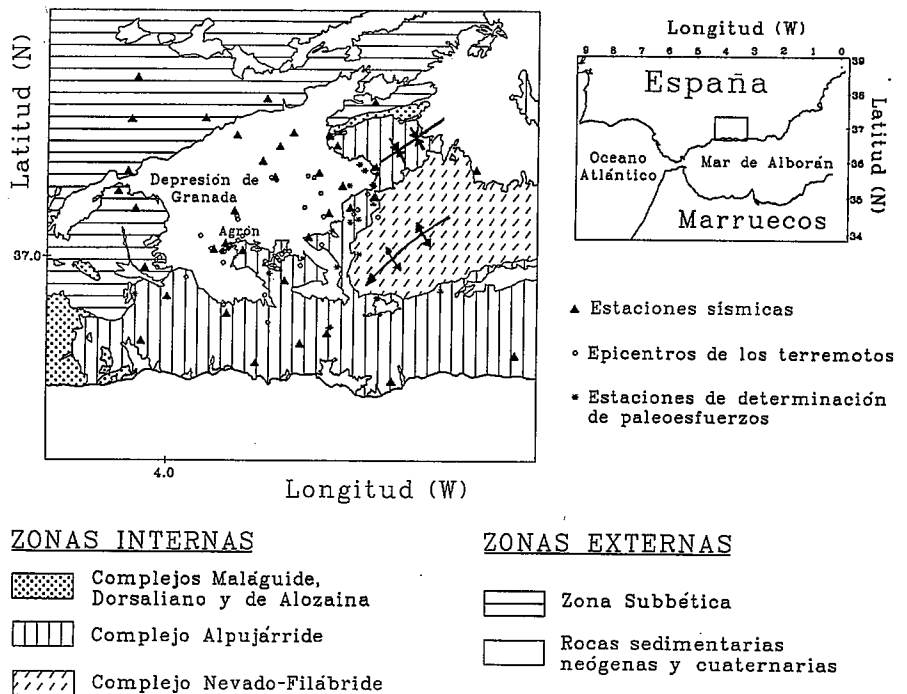


Fig. 1- Esquema geológico del área estudiada, incluyendo la localización de los epicentros y de las estaciones de determinación de paleoesfuerzos.

Fig. 1- Geological sketch of the study area, including locations of epicenters and paleostress determination stations.

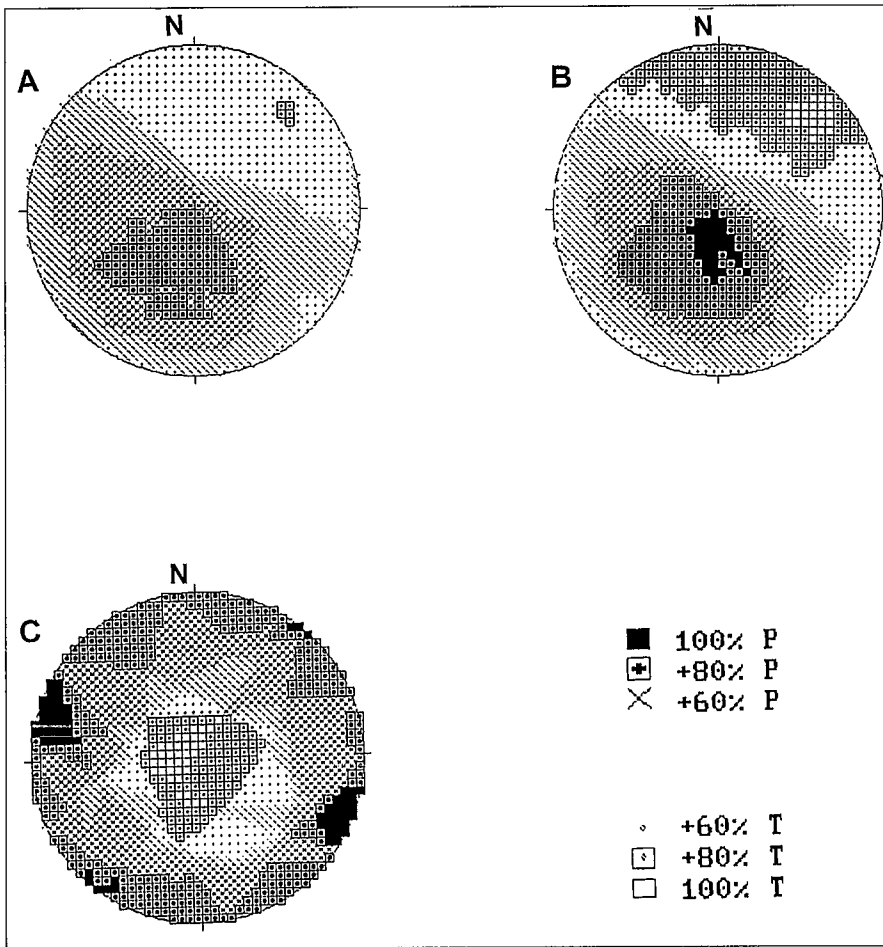


Fig. 2- Diagramas de diedros rectos de los mecanismos focales de sismos con  $m > 2.5$  de la Depresión de Granada. Proyección estereográfica, hemisferio inferior. A, todos los sismos (38 datos). B, mecanismos de falla normal (31 sismos). C, mecanismos de falla inversa (7 sismos). Programa, G. de Vicente.

Fig. 2- Right-dihedra diagrams of focal mechanisms of earthquakes with  $m > 2.5$  of the Granada Depression. Stereographic projection, lower hemisphere. A, all earthquakes (38 earthquakes). B, focal mechanisms of normal fault (31 earthquakes). C, focal mechanisms of reverse fault (7 earthquakes). Software, G. de Vicente.

Nevado-Filábride. Este contacto fue uno de los principales despegues extensionales durante el Mioceno inferior (Jabaloy *et al.*, 1993), que rejugó en esta región desde el Mioceno superior con movimiento del bloque de techo hacia el SW (Galindo-Zaldívar *et al.*, 1996). En relación con este último movimiento, en el Alpujárride se produjeron basculamientos hacia el NE que dieron lugar a la formación de cuencas asimétricas. El relleno sedimentario de estas cuencas tiene una geometría en abanico que indica una actividad continuada de las fallas desde el Mioceno superior a la actualidad. La actividad de las fallas, que produjo una extensión NE-SW, fue simultánea al desarrollo de pliegues NE-SW de

gran radio (Fig.1), que indican acortamiento en dirección NW-SE. La formación de estos pliegues se inició en el Tortonense (Estévez *et al.*, 1982) y continuó en el Plioceno (Johnson, 1997).

La sismicidad en la región tiene una amplia distribución espacial, aunque los hipocentros de terremotos recientes se concentran preferentemente en profundidades entre 13 y 17 km (Morales *et al.*, 1997). Los mecanismos focales de la región corresponden mayoritariamente a fallas normales (Galindo-Zaldívar *et al.*, 1993, in litt.).

El objetivo de este trabajo es analizar el estado de esfuerzos actual en el sector SE de la Depresión de Granada y regiones limítrofes a partir del

estudio de la sismicidad y relacionarlo con los paleoesfuerzos recientes y con estructuras producidas desde el Tortonense a la actualidad.

**Sismicidad, esfuerzos actuales y paleoesfuerzos**

Los esfuerzos actuales en esta área se han determinado usando 43 terremotos registrados entre 1988 y 1994, a los que se ha incorporado el terremoto de mayor magnitud registrado instrumentalmente en la región (24/VI/84) (Fig. 1). Los sismos fueron registrados por las estaciones sísmicas portátiles y permanentes de la Red Sísmica de Andalucía, de la Universidad de Granada. De forma complementaria, se han usado datos de otras estaciones instaladas en la zona (Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento). Entre los sismos, 16 forman parte de la Serie de Agrón de 1988-89 y se sitúan cerca de esta localidad.

El diagrama de diedros rectos (Angelier y Mechler, 1977) para sismos de  $mag > 2.5$  (Fig. 2A) indica que no hay ninguna dirección que sea compatible en compresión o en dilatación para todos los diedros estudiados. Se reconoce que  $\sigma_1$  está fuertemente inclinado hacia el SW y  $\sigma_3$ , peor definido, tiene una moderada inclinación hacia el NE. Si consideramos únicamente los mecanismos de falla normal (Fig. 2B), el diagrama de diedros rectos indica la misma orientación de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  que el diagrama anterior, aunque ya si se identifican orientaciones compatibles para todos los diedros. Los mecanismos de falla inversa son escasos y su diagrama de diedros rectos (Fig. 2C), indica una orientación preferente NW-SE subhorizontal para  $\sigma_1$  y otra peor definida NE-SW.

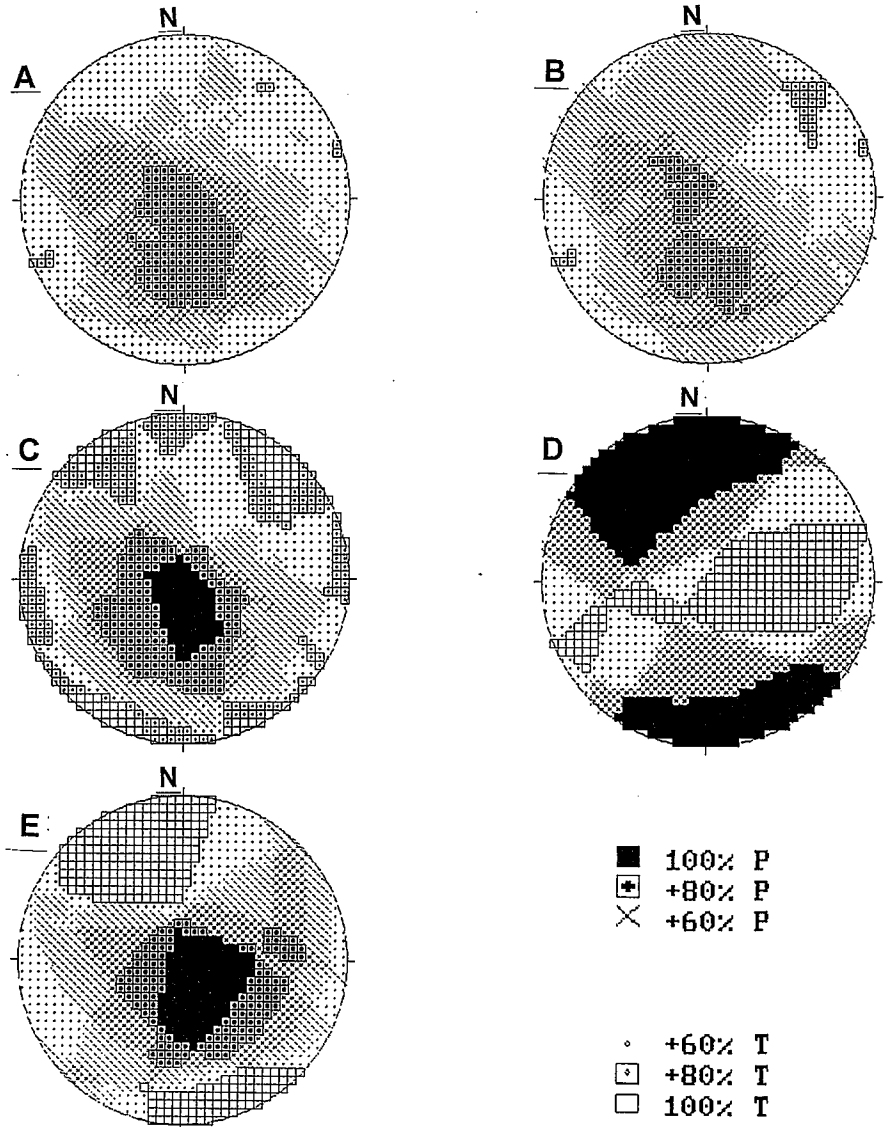
Los elipsoides de esfuerzos determinados mediante redes de búsqueda con el método de rotación de polos de estrías (Gephart, 1990a, 1990b) son parecidos tanto si consideramos todos los mecanismos focales ( $\sigma_1$ : inclinación,  $65^\circ$  dirección,  $N209^\circ E$ ;  $\sigma_3$ :  $25/28$ ;  $ra = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3 = 0.2$ ) como si sólo tenemos en cuenta los de fallas normales ( $\sigma_1$ :  $71/220$ ;  $\sigma_3$ :  $19/40$ ;  $ra = 0.1$ ). Los elipsoides de esfuerzos son prolatos, con  $\sigma_3$  NE-SW e inclinado suavemente hacia el NE. El eje  $\sigma_1$  está inclinado hacia el SW, lo que es compatible con los diagramas de diedros rectos (Fig. 2).

La coexistencia de mecanismos de falla normal e inversa (Fig. 1) es una característica del estado de esfuerzos de esta región. Para analizar con más detalle la relación entre ambos, hemos estudiado los sismos de  $mag > 2$  de la Serie de Agrón. El diagrama conjunto de diedros rectos (Fig. 3A) muestra que, aunque no todos los sismos son compatibles con un único estado de esfuerzos, predomina la dirección ENE-WSW para  $\sigma_3$ . Si consideramos las magnitudes de los sismos, el diagrama de los sismos de  $mag > 2.5$  (Fig. 3B) tiene las mismas características que el diagrama anterior. Sin embargo, si consideramos por separado los mecanismos de falla normal e inversa, se obtienen soluciones compatibles para todos los mecanismos (Fig. 3C y D). Los mecanismos de falla normal (Fig. 3C) indican un eje  $\sigma_3$  subhorizontal NE-SW ó NW-SE, y los de falla inversa (Fig. 3D) un eje  $\sigma_1$  subhorizontal NW-SE. El diagrama de los sismos de  $mag \leq 2.5$  es compatible para todos los mecanismos focales (Fig. 3E) e indica que  $\sigma_3$  es subhorizontal NW-SE. Así pues, el eje subhorizontal de dirección NW-SE se corresponde tanto con la orientación de  $\sigma_2$  del diagrama de todos los mecanismos y del diagrama de los mecanismos de falla normal de  $mag > 2.5$ , como con  $\sigma_1$  para los mecanismos de falla inversa y con la de  $\sigma_3$  de los mecanismos de  $mag \leq 2.5$ .

El estudio de las deformaciones frágiles, especialmente microfallas, en 21 estaciones (Fig. 1), algunas ya estudiadas por Galindo-Zaldívar *et al.* (1993), permite caracterizar los paleoesfuerzos desde el Tortoniano a la actualidad. La proyección estereográfica de los ejes significativos de los elipsoides de esfuerzo (Fig. 4) ( $\sigma_1$  de los elipsoides prolatos y  $\sigma_3$  de los oblatos) muestra que tienen orientaciones variables. Los ejes  $\sigma_1$  indican generalmente condiciones de extensión radial y en menor medida compresión NW-SE. Los ejes  $\sigma_3$  muestran generalmente extensión de direcciones variables, entre las que predomina la extensión NE-SW y en menor medida extensión vertical.

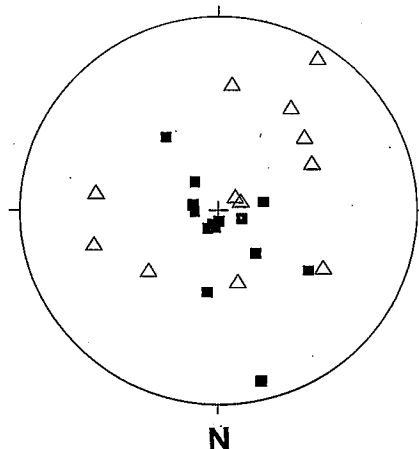
**Conclusiones**

El campo de esfuerzos es heterogéneo en la parte superior de la corteza. Los estados de esfuerzos actuales



**Fig. 3- Diagramas de diedros rectos de los mecanismos focales de los sismos de la serie Agrón. Proyección estereográfica, hemisferio inferior. A, todos los sismos (38 datos). B, sismos con  $m > 2.5$  (11 datos). C, mecanismos de falla normal y  $m > 2.5$  (8 sismos). D, mecanismos de falla inversa y  $m > 2.5$  (3 sismos). E, sismos con  $m \leq 2.5$  (11 datos). Programa, G. de Vicente.**

**Fig. 3- Right-dihedra diagrams for the Agrón earthquake series. A, all earthquakes (16 earthquakes). B, focal mechanisms of  $m > 2.5$  earthquakes (11 earthquakes). C, focal mechanisms of normal faults with  $m > 2.5$  (8 earthquakes). D, focal mechanisms of reverse faults with  $m > 2.5$  (3 earthquakes). E, focal mechanisms of earthquakes with  $m \leq 2.5$  (5 earthquakes). Software, G. de Vicente.**



**Fig. 4- Orientación de los ejes significativos de paleoesfuerzos determinados a partir de microfallas ( $\sigma_1$  ■ de los elipsoides prolatos y  $\sigma_3$  ▽ de los oblatos). Proyección estereográfica, hemisferio inferior.**

**Fig. 4- Stereographic projection (lower hemisphere) of the odd-axes of the paleostresses calculated from microfault measurement stations ( $\sigma_1$  ■ of prolate ellipsoids and  $\sigma_3$  ▽ of oblate ellipsoids).**

deducidos de los mecanismos focales tienen características muy parecidas a los paleoesfuerzos desde el Mioceno Superior a actualidad determinados a partir de deformaciones frágiles. En relación con estos últimos, los elipsoides más frecuentes son prolotos, con un eje  $\sigma_3$  subhorizontal NE-SW y  $\sigma_1$  vertical. En profundidad se pueden correlacionar con los deducidos de los mecanismos focales, con el eje  $\sigma_1$  inclinado fuertemente hacia el SW y  $\sigma_3$  inclinado suavemente hacia el NE. Sin embargo, se detectan otras posiciones de los ejes principales de esfuerzo, aunque se suelen mantener las orientaciones de los ejes principales del elipsoide. Los elipsoides con  $\sigma_3$  NW-SE subhorizontal y los correspondientes a extensión radial se deben probablemente a variaciones en la baja razón áxica de los elipsoides antes descritos. También cabe destacar que los elipsoides con  $\sigma_1$  subhorizontal NW-SE y  $\sigma_3$  subvertical son compatibles con la convergencia entre Iberia y Africa y con los pliegues NE-SW.

El basamento de la Depresión de Granada ha estado sometido desde el Tortoniense a un levantamiento, probablemente como consecuencia de un

engrosamiento cortical cuyas estructuras se localizarían preferentemente en la parte baja asísmica de la corteza, a profundidades que superan los 17 km. La convergencia NW-SE entre Iberia y Africa explicaría este engrosamiento que puede favorecer la presencia en la parte superior de la corteza de estructuras de extensión NE-SW, más abundantes que las estructuras de compresión NW-SE.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Grupo de Investigación en Geofísica núm. 4057 de la Junta de Andalucía y CICYT AMB97-1113-C02-01 y PB-1452-C03-01. El programa de cálculo de diedros rectos ha sido amablemente cedido por Gerardo de Vicente.

#### Referencias

- Angelier, J y Mechler, P. (1977): *Bull. Soc. Geol. France*, 7: 1309-1318.
- De Mets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. y Stein, S. (1990): *Geophys. Jour. Int.*, 101: 425-478.
- Estévez, A., Rodríguez-Fernández, J., Sanz de Galdeano, C. y Vera, J.A. (1982): *Estudios Geol.*, 38: 55-60.
- Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F. y Jabaloy, A. (1993): *Tectonophysics*, 227: 105-126.
- Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A. y González-Lodeiro, F. (1996): *C. R. Acad. Sci. Paris*, 323: 615-622.
- Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A., Serrano, I., Morales, J., González-Lodeiro, F. y Torcal, F. (In litt).
- Gephart, J.W. (1990a): *Tectonics*, 9: 845-858.
- Gephart, J.W. (1990b): *Computer Geosci.*, 16: 953-989.
- Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J. y González-Lodeiro, F. (1993): *Jour. Struct. Geol.*, 15: 555-569.
- Johnson, C. (1997): *Geology*, 25: 623-626.
- Morales, J., Vidal, F., de Miguel, F., Alguacil, G., Posadas, A.M., Ibáñez, J.M., Guzmán, A. y Guirao, J.M. (1990): *Tectonophysics*, 177: 337-348.
- Morales, J., Serrano, I., Vidal, F. y Torcal, F. (1997): *Geophys. Res. Letters*, 24: 3289-3292.
- Sanz de Galdeano, C. (1976): In: *Reunión sobre la Geodinámica de la Cordillera Bética y Mar de Alborán*, Granada, 197-218.