

## Anisotropía sísmica de fisuración cortical en la Cuenca de Granada (Sur de España) *Extensive dilatancy seismic anisotropy in the Granada Basin (southern Spain)*

Jorge M. Gaspar-Escribano<sup>(1)</sup> y Julia Téllez<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> EUIT Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid, Carretera de Valencia km 7, 28031 Madrid. jgaspar@euitto.upm.es

<sup>(2)</sup> Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, jutellez@fis.ucm.es

### SUMMARY

We present the results of an extensive dilatancy seismic anisotropy analysis carried out in the Granada Basin (southern Spain). This is a technique that allows estimating the orientation of the largest horizontal component of the stress field at the surface. It requires a thorough selection of the seismic records in order to ensure a correct assignment of the direct shear-wave arrival and to obtain results representative of the local stress field. For this reason, it was possible to obtain reliable results in two locations within the Granada Basin only, giving different polarization directions. These are interpreted in the context of the general stress regime of southern Iberia and in relation to local stress field variations induced by important structural elements, such as active fault systems.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las características del régimen de esfuerzos que afectan a una región se pueden inferir de los modelos de movimiento de placas tectónicas. Esta aproximación, de validez general, presenta limitaciones a la hora de explicar el campo de esfuerzos a nivel local. A esta relativamente pequeña escala, otros factores, como la presencia de fallas, la fracturación de los materiales que constituyen la corteza superior y su relleno por fluidos, los contrastes de densidad entre regiones corticales adyacentes, etc., pueden alterar significativamente la magnitud de las componentes del tensor de esfuerzos resultando en variaciones del mismo en distancias relativamente cortas. Consecuentemente, es frecuente encontrar discrepancias entre los resultados de distintos estudios de caracterización del patrón de esfuerzos a escala local, especialmente en zonas de características sismotectónicas complejas, como por ejemplo la Cuenca de Granada. Por este motivo, cada vez es más frecuente encontrar estudios multidisciplinares del campo local de esfuerzos, que integran varios métodos.

Entre los métodos de estimación del patrón de esfuerzos de una región cabe citar: análisis de deformación de planos de fallas (incluyendo la estriación del mismo); estudios de estructura y composición de rocas superficiales, incluyendo la distribución de vetas y materiales constituyentes; análisis de deformación en sondeos (*borehole breakouts*); determinación del mecanismo focal de los terremotos, que proporciona dos posibles orientaciones del plano de ruptura; modelos tectónicos (o simulaciones basadas en soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales o elementos finitos) de distribución de esfuerzos compatibles con los anteriores datos, etc. Recientemente se ha propuesto el método de la anisotropía sísmica de fisuración cortical para determinar la dirección del máximo esfuerzo compresivo horizontal a escala local. Esta presentación trata de este último método.

### 2. ANISOTROPÍA DE FISURACIÓN CORTICAL

La parte superior de la corteza terrestre está constituida por materiales relativamente débiles que, bajo la acción de esfuerzos externos, tienden a deformarse dando lugar (entre otros) a fracturas estructuradas paralelamente a la dirección del esfuerzo compresivo horizontal máximo (Crampin et al., 1984). Este fenómeno es facilitado por la presencia de fluidos rellenando las fracturas.

Cuando una onda transversal de relativa alta frecuencia se transmite a través de un medio de estas características, se produce una partición (*splitting*) de la onda S en otras dos ondas transversales que viajan con velocidades distintas, las ondas S rápida y S lenta (Figura 1). La magnitud de la separación entre estas dos ondas depende del ángulo con el que la onda inicial incide en el volumen anisótropo (con incidencia normal a los planos de fisura la separación es máxima, y en la dirección perpendicular a esta es

mínima) y de las características del cuerpo anisótropo: volumen de cuerpo anisótropo, densidad de fracturas y poros, y orientación de los planos que contienen a dichas fisuras (Bouin et al., 1996).

La dirección de polarización de la onda S rápida es paralela a la dirección de alineamiento de los planos de fisuras, y la dirección de polarización de la S lenta es perpendicular a la anterior. Las ondas S rápida y lenta llegan al sismómetro con una diferencia temporal medible.

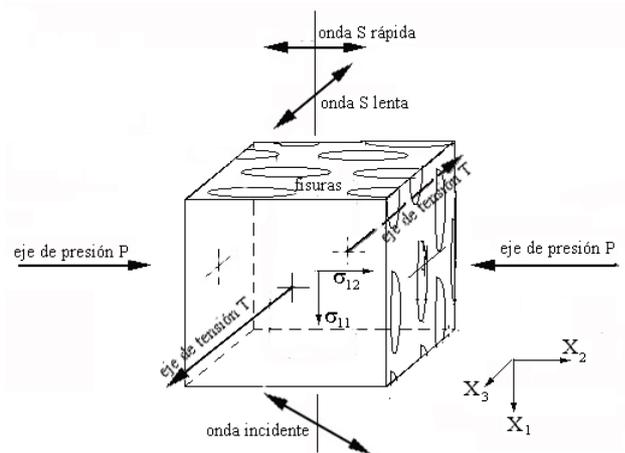


Figura 1 –Esquema mostrando la separación de la onda S en otras dos (S-rápida y S-lenta) al propagarse a través de un medio con anisotropía de fisuración. (Cartoon showing the shear wave splitting of a S-wave propagating through a crack-anisotropic medium).

Para realizar un estudio de anisotropía, se debe contar con registros de buena calidad que muestren una fase S bien definida de una onda directa. Así pues, es muy importante seleccionar aquellos registros que cumplan las siguientes condiciones: (1) registros de tres componentes de instrumentos de corto periodo (o banda ancha); (2) registros pertenecientes a eventos con ángulo de incidencia en la estación inferiores a 45° (*ventana de ondas de cizalla*; Evans 1984); (3) registros que muestren una fase S impulsiva y poca energía en la componente vertical, a fin de evitar fases contaminadas (Zollo y Bernard, 1989). Además, los diferentes registros deben poseer una buena distribución azimutal, para asegurar que la anisotropía observada no es una consecuencia ni del patrón de radiación en la fuente ni del medio por el que se propaga la onda (Buchbinder, 1985). Finalmente, la aplicación de un filtro de polarización lineal ayudará a determinar la llegada de la onda S pura (Zúñiga et al., 1995).

### 3. APLICACIÓN A LA CUENCA DE GRANADA

Los datos utilizados en este trabajo fueron adquiridos durante una campaña de microsismicidad llevada a cabo a principios del

verano de 1994 en la Cuenca de Granada (Figura 2, Muñoz et al., 2003). Contamos en total con 187 registros de tres componentes correspondientes a 59 sismos, de los cuales tan solo 89 son propicios para llevar a cabo un estudio de anisotropía. Solo 19 de estos registros presentan una clara llegada de la onda S. Los restantes son sometidos a un filtrado de polarización lineal para detectar la llegada de la onda S.

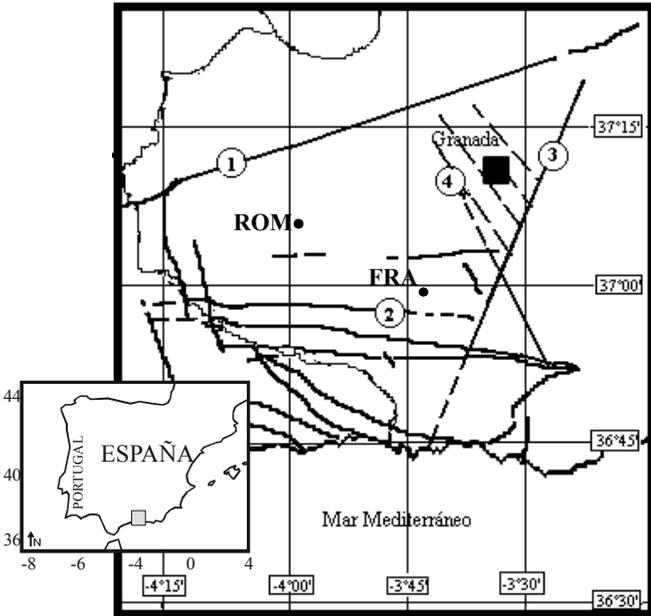


Figura 2 – Mapa de localización, mostrando los principales sistemas de fallas (Morales et al., 1990) y la posición de las estaciones sísmicas de El Romeral (ROM) y Fraile (FRA). (Location map, showing main fault systems and the location of El Romeral (ROM) and Fraile (FRA) stations).

Tan sólo dos de las estaciones analizadas, El Romeral y Fraile, presentaron una buena cobertura de datos procedentes de todas las regiones azimutales dentro de la ventana de ondas de cizalla. La dirección de polarización de la onda S, equivalente a la dirección del máximo esfuerzo compresivo horizontal, presenta importantes variaciones en la Cuenca de Granada. Así, se obtiene una dirección de polarización SE-NW para la estación de El Romeral, mientras que en la de Fraile es aproximadamente SW-NE, como se muestra en la Figura 3. En ninguna de las estaciones estudiadas fue posible identificar la llegada de la onda S-lenta, ni por tanto medir su retraso con respecto a la onda S-rápida.

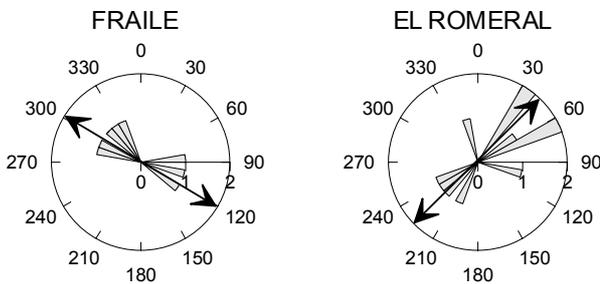


Figura 3 – Diagramas de rosa mostrando las direcciones de polarización de la onda S-rápida en cada estación. (Rose-diagrams showing the fast shear-wave polarization at each station).

#### 4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La dirección de polarización encontrada en Fraile concuerda dentro de los márgenes de error con la dirección del esfuerzo regional causado por la convergencia entre las placas africana y euroasiática. Asimismo, la proximidad de la estación al sistema de fallas de Alhama de Granada-Alpujarra (número 2 en la Figura 2)

hace pensar en un control del mismo sobre el campo de esfuerzos a escala local. Este resultado es consistente con las conclusiones de Sanz de Galdeano y López-Garrido (2002) y Muñoz et al. (2003) y para este sector de la Cuenca de Granada.

Sin embargo, el hecho de que en la estación de El Romeral no se observe la misma dirección de polarización que en la estación de Fraile es una indicación de que existen otros elementos que controlan la distribución de esfuerzos a la escala de la cuenca. La similar orientación del sistema de fallas Cádiz-Alicante con respecto a la dirección de polarización obtenida en la relativamente cercana estación de El Romeral, sugieren también un control de este importante accidente tectónico en el campo de esfuerzos de esa parte de la cuenca. Otra estructura tectónica que pudiera causar esta desviación local del patrón general de esfuerzos sería un cabalgamiento oculto bajo el relleno sedimentario de la cuenca, tal y como describen Galindo-Zaldívar et al. (2003). No obstante, la constatada variabilidad de regímenes de esfuerzos en la zona de estudio desaconsejan establecer sólidas conclusiones a este respecto. Finalmente es interesante mencionar un resultado similar obtenido para un emplazamiento relativamente cercano (Embalse de Quentar; Oyamburu, 1998).

#### 5. COMENTARIO FINAL

Este trabajo muestra el potencial del método de la anisotropía sísmica de fisuración cortical para determinar la dirección del campo de esfuerzos local de una región.

En el caso concreto de la Cuenca de Granada, los resultados de este estudio confirman la gran variabilidad espacial del campo de esfuerzos. A fin de obtener una imagen mejor constreñida del patrón de esfuerzos de Cuenca de Granada, en el futuro se llevarán a cabo más estudios de anisotropía, y se relacionarán con los elementos estructurales y sismotectónicos de la zona. Especialmente importante será la interpretación de los resultados en relación al relieve del basamento de la cuenca y a los contrastes de velocidad de las ondas S (Serrano et al., 2002; Chourak et al., 2003).

#### 6. REFERENCIAS

- Bouin, M.-P., J. Téliés and P. Bernard (1996): "Seismic anisotropy around the Gulf of Corinth, Greece, deduced from three-component seismograms of local earthquakes and its relationship with crustal strain". *J. Geophys. Res.*, **101**, 5797-5811.
- Buchbinder, G. G. R. (1985): "Shear wave splitting and anisotropy in the Charlevoix seismic zone, Quebec". *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 425-428.
- Chourak, M., V. Corchete, J. Badal, F. Serón and F. Gómez (2003): "Imaging of the near-surface shear-wave velocity structure of the Granada Basin (southern Spain)". *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1, 430-442.
- Crampin, S., E. M. Chesnokov and R. G. Hipkin. (1984): "Seismic anisotropy - the state of the art: II". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **76**, 1-16.
- Evans, R. (1984): "Effects of the free surface on shear wavetrains". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **76**, 165-172.
- Galindo-Zaldívar, J., A. J. Gil, M. J. Borque, F. González-Lodeiro, A. Jabaloy, C. Marín-Lechado, P. Ruano and C. Sanz de Galdeano (2003): "Active faulting in the internal zones of the central Betic Cordilleras (SE Spain)". *J. Geodyn.*, **36**, 239-250.
- Morales, J., F. Vidal, F. de Miguel, G. Alguacil, A. M. Posadas, J. M. Ibáñez, A. Guzmán and J. M. Guirao (1990): "Basement structure of the Granada basin, Betic Cordilleras, Southern Spain". *Tectonophysics*, **177**, 337-348.
- Muñoz, D., A. Cisternas, A. Udías, J. Mézcua, C. Sanz de Galdeano, J. Morales, M. Sánchez-Venero, H. Haessler, J. Ibáñez, E. Buforn, G. Pascual and L. Rivera (2003): "Microseismicity and tectonics in the Granada Basin (Spain)". *Tectonophysics*, **356**, 233-252.
- Oyamburu, I. (1998): "Estudio de la anisotropía cortical en el sur de la Península Ibérica a partir de la polarización de las ondas S". *Trabajo de Investigación Inédito, Fac. Ciencias Físicas, Univ. Complutense Madrid*.
- Sanz de Galdeano, C., and A. C. López-Garrido (2000): "The Tortonian to Quaternary faults between Granada and the coast: the western limit of the Nevado-Filabride complex and lower Alpujarride units". *Rev. Soc. Geol. España*, **13**, 519-528.
- Serrano, I., D. Zhao and J. Morales (2002): "3-D crustal structure of the extensional Granada Basin in the convergent boundary between the Eurasian and African plates". *Tectonophysics*, **344**, 61-79.
- Zollo, A. and P. Bernard (1989): "S wave polarization inversion of the 15 October 1979, 23:19 Imperial Valley aftershock: Evidence for anisotropy and a simple source mechanism". *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 1047-1050.
- Zúñiga, F. R., R. R. Castro, and T. Domínguez, (1995): "Stress orientation and anisotropy based on shear wave splitting observations in the Cerro Prieto Fault area, Baja California, Mexico". *PAGEOPH.*, **40**, No 1.