

# La serie sísmica de Alhucemas 2016. Partición de la deformación e interacción de estructuras en un límite de placas difuso

## *The Al Hoceima 2016 seismic series. Strain partitioning and interaction of structures on a diffuse plate boundary*

J.A. Álvarez-Gómez<sup>1</sup>, R. Martín<sup>2</sup>, R. Pérez-López<sup>3</sup>, D. Stich<sup>2,4</sup>, J.V. Cantavella<sup>5</sup>, J.J. Martínez-Díaz<sup>1,6</sup>, J. Morales<sup>2,4</sup>, P. Martínez García<sup>2,4</sup>, J.I. Soto<sup>2,4</sup> y E. Carreño<sup>5</sup>.

1 Dpto. Geodinámica, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. jaalvare@ucm.es

2 Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, Granada

3 Instituto Geológico y Minero de España, Madrid

4 Departamento de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Granada

5 Red Sísmica Nacional, Instituto Geográfico Nacional, Madrid

6 Instituto de Geociencias (IGEO), CSIC-UCM, Madrid

**Resumen:** El terremoto principal de la serie sísmica tuvo lugar el 25 de enero de 2016, con una magnitud  $M_w$  6.3, que fue precedido por un premonitorio de magnitud  $M_w$  5.1 el día 21 de enero. Hemos utilizado 41 mecanismos focales para analizar las características sismotectónicas y estructurales de la serie. Para agrupar los mecanismos focales hemos utilizado un algoritmo de agrupamiento jerárquico espacial y por el tipo de rotura del mecanismo. De cada agrupación hemos obtenido el mecanismo focal medio y lo hemos asociado a una estructura o familia de estructuras. Hemos comprobado la compatibilidad mecánica de estas estructuras mediante transferencia de esfuerzos de Coulomb. El evento principal de la serie se produjo en la Falla de Al Idrisi intersectando la cresta de Alborán. Este evento disparó réplicas y series independientes en fallas de desgarre asociadas al sistema de Falla de Al Idrisi hacia el sur, pero también en fallas inversas asociadas al levantamiento de la Cresta de Alborán hacia el este; produciéndose una partición de la deformación entre ambos tipos de estructuras interaccionando por transferencia de esfuerzos.

**Palabras clave:** Terremoto de Alhucemas, Falla de Al Idrisi, Cresta de Alborán, partición de la deformación, transferencia de esfuerzos.

**Abstract:** The mainshock of seismic series took place on January 25, 2016, with a  $M_w$  6.3 magnitude, which was preceded by a premonitory of magnitude  $M_w$  5.1 on 21 January. We have used 41 focal mechanisms to analyze the seismotectonics and the structural characteristics of the series. To cluster the focal mechanisms we used a hierarchical clustering algorithm using the spatial distribution of the events and also the type of rupture mechanism. For each cluster we have obtained the average focal mechanism and have been associated with a structure or family of structures. We have tested the mechanical compatibility of these structures by Coulomb stress transfer modelling. The mainshock of the series occurred in the Al Idrisi Fault intersecting the Alboran Ridge. This event triggered aftershocks and independent series in strike-slip faults associated with the Al Idrisi Fault System towards the south, but also in reverse faults associated with the lifting of the Alboran Ridge eastward; producing a strain partitioning between both types of structures interacting by stress transfer.

**Key words:** Al Hoceima earthquake, Al Idrisi Fault, Alboran Ridge, strain partitioning, stress transfer.

## INTRODUCCIÓN

El sur de Alborán, y especialmente la zona situada frente a la Bahía de Alhucemas, presenta habitualmente actividad sísmica. Esta actividad se vio incrementada a partir del terremoto de Alhucemas de 1994, teniendo lugar series sísmicas con magnitudes máximas de  $M_w$  6.3 en la serie sísmica de 2004 de Alhucemas - Tamasint, al sur de Alhucemas. Desde entonces la sismicidad en la zona ha sido habitual, con magnitudes máximas entorno a 4. En el año 2015 hubo un incremento de la sismicidad, sobre todo a partir de Mayo, que culminó con la serie sísmica iniciada en enero de 2016 (Figura 1).

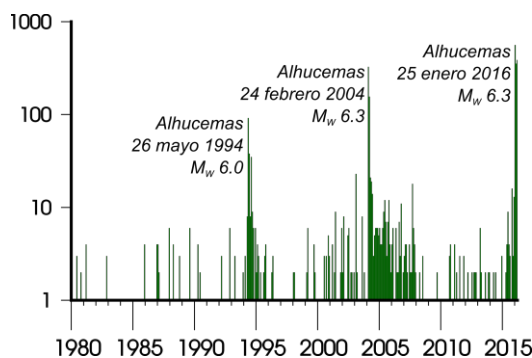


FIGURA 1. Evolución de la sismicidad con el tiempo en la zona. Número de eventos con  $M \geq 2$  por mes.

El terremoto principal de la serie tuvo lugar el 25 de enero de 2016, con una magnitud  $M_w$  6.3; fue precedido por un premonitorio de magnitud  $M_w$  5.1 el día 21 de enero. Esta serie sísmica cuenta con miles de eventos con magnitudes superiores a 1.5.

El Instituto Andaluz de Geofísica ha calculado 41 mecanismos focales de eventos con magnitudes superiores a 3.7 en su mayoría y que utilizamos en este trabajo para analizar las características sismotectónicas y estructurales de la serie sísmica. Los eventos han sido relocalizados por la Red Sísmica Nacional del Instituto Geográfico Nacional con un algoritmo de relocalización no lineal utilizando un modelo de corteza 3D.

### CONTEXTO TECTÓNICO

La serie sísmica de Alhucemas 2016 se produce en el extremo sur de la Cresta de Alborán. Hacia el norte la Cresta de Alborán se curva conectándose con el sistema de fallas de Yusuf. La sismicidad registrada se concentra mayoritariamente en la Cresta de Alborán y hacia el sur, hacia la Bahía de Alhucemas. Los mecanismos focales calculados hasta la fecha mostraban un carácter de desgarre sinistral con cierta componente normal en la Cresta de Alborán (ver por ejemplo Stich et al., 2006; Álvarez-Gómez et al., 2011); aunque siempre dentro de un complejo sistema de deformación difusa (Figura 2).

Hacia el sur de la Cresta de Alborán se produce una transición entre una deformación más o menos concentrada que da paso a una serie de estructuras de desgarre NNE-SSW que se adentran en el continente

africano y que fueron las responsables de las series sísmicas de Alhucemas 1994 y 2004 (Stich et al. 2005), entre ellas la Falla de Al Idrisi es de especial relevancia, cortando la cresta de Alborán en su extremo SW. Junto a estos desgarres aparecen unas estructuras compresivas formando los bancos de Tofiño y Xauen; y una serie de estructuras distensivas de dirección N-S, dando lugar por ejemplo al graben de la Bahía de Alhucemas.

### LA SERIE SÍSMICA

La serie sísmica puede subdividirse en 4 agrupaciones espaciales bien diferenciadas (Figura 2), una de ellas situada muy al sur y de carácter normal. Hemos utilizado un algoritmo de agrupamiento jerárquico para hacer las agrupaciones espaciales de los eventos. El algoritmo ha sido implementado sobre el software FMC (Álvarez-Gómez, 2014).

Tanto el evento principal como el premonitorio presentan una rotura similar, un desgarre sinistral con componente normal de dirección NNE-SSW, más norteada en el premonitorio y las réplicas que en el evento principal. Estos eventos se localizan en el extremo norte de la intersección entre la Falla de Al Idrisi y la Falla Norte de la Cresta de Alborán (grupo de color azul claro en la Figura 2). Tras este inicio de la serie tiene lugar una intensa actividad sísmica en la continuación hacia el sur de la Falla de Al Idrisi, con unos mecanismos focales de desgarre con componentes normales en su mayoría (grupo de color amarillo, Figura 2). Las direcciones de los planos nodales son NE-SW y NW-SE, coincidiendo los primeros con las orientaciones de los principales desgarres en la zona.

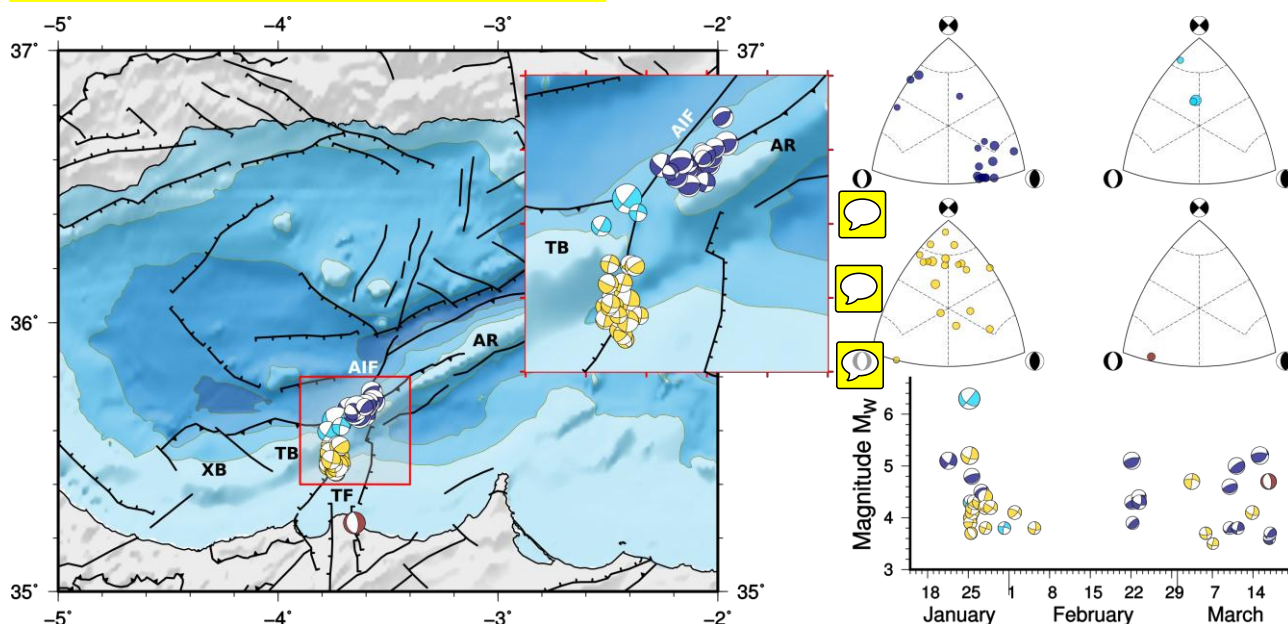


FIGURA 2. Izquierda: Esquema tectónico del dominio de Alborán y su entorno; estructuras tomadas de Martínez-García, 2012. Se presentan los mecanismos focales de la serie sísmica relocalizados y agrupados por su localización espacial. Derecha: Arriba, diagramas de clasificación de los mecanismos focales en cada grupo espacial. Abajo, evolución temporal de la serie sísmica, los colores se corresponden con los del agrupamiento espacial. XB: Banco de Xauen, TB: Banco de Tofiño, TF: Falla de Trougout, AIF: Falla de Al Idrisi, AR: Cresta de Alborán.

Tras estas series tiene lugar una nueva de carácter totalmente diferente; hacia el este de la Falla de Al Idrisi se había producido un evento aislado de falla inversa pura durante el desarrollo de las dos primeras agrupaciones de eventos, pero semanas después de este evento se produce una actividad muy intensa en esta zona con una deformación de falla inversa pura (grupo azul oscuro, Figura 3), con planos de dirección NE-SW paralelos a la cresta de Alborán, y buzamientos altos hacia el N o bajos hacia el S. Al tiempo que se produce esta serie compresiva se reactiva el extremo sur de la Falla de Al Idrisi con una serie de eventos de desgarre con algo de componente normal y dirección NNE-SSW (Figura 3).

### Mecanismos focales medios

Para obtener el tipo de deformación para cada grupo hemos utilizado la aproximación de Kiratzi y Papazachos (1995) para obtener el tensor medio:

$$\bar{F}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F_{ij}^n \quad (1)$$

El momento sísmico para cada agrupación es simplemente el sumatorio de los momentos escalares multiplicados por el tensor medio:

$$\sum_{n=1}^N M_{ij}^n = \bar{F}_{ij} \left( \sum_{n=1}^N M_0^n \right) \quad (2)$$

Se han utilizado estos mecanismos focales medios para obtener las orientaciones de las estructuras responsables de la serie sísmica. El agrupamiento del evento principal (azul claro en la Figura 2) presenta un plano nodal de dirección NE-SW, siendo este coincidente en localización y orientación con la Falla de Al Idrisi, por lo que lo hemos seleccionado como responsable de estos eventos, pudiendo asignar a esta falla como la generadora del evento principal de la serie.

La agrupación de réplicas hacia el sur presentan mayoritariamente un plano nodal de dirección NNE-SSW por lo que proponemos una estructura en continuación con la Falla de Al Idrisi. La continuación de esta estructura de desgarre hacia el sur, formando parte del sistema de Falla de Al Idrisi, entraría hacia la Bahía de Alhucemas, bien hacia la Falla de Trougout o hacia la familia de fallas NE-SW situadas en la margen occidental de la Bahía de Alhucemas.

Con un mecanismo de deformación claramente diferente encontramos la agrupación hacia el este del evento principal. Los mecanismos de esta serie son mayoritariamente de falla inversa muy pura, con un plano de bajo buzamiento (~26°) buzando hacia el sur. Estas estructuras coinciden con las descritas limitando

al norte la Cresta de Alborán (Martínez-García, 2012). El carácter de estas fallas es objeto de debate, y normalmente han sido descritas como fallas oblicuas con el desgarre sinistral predominante atendiendo a su orientación respecto al tensor de esfuerzos regional. Sin embargo el carácter tan indiscutible de falla inversa pura de esta agrupación hace pensar en la existencia de partición de la deformación, con algunas estructuras absorbiendo el acortamiento ortogonal a la cresta de Alborán y otras la componente de desgarre. Esto mismo parece verse con más frecuencia también hacia el norte, en la Península Ibérica, donde más estructuras parecen presentar deformaciones predominantes de falla inversa (Meijninger y Vissers, 2006; Insúa Arévalo et al., 2015) frente a los desgarres y componentes incluso normales clásicamente propuestos.

### Transferencia de esfuerzos

Para comprobar la compatibilidad mecánica de las estructuras propuestas hemos realizado una serie de modelos de transferencia de esfuerzos estáticos de Coulomb ( $\Delta CFS$ ).

Estos modelos se basan en las ecuaciones de Okada (1992) para calcular las deformaciones producidas por una dislocación en un medio elástico. Con estas deformaciones se calcula la variación del tensor de esfuerzos local sobre un plano de falla determinado aplicando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

$$\Delta CFS = \Delta \tau - \mu' \Delta \sigma_n \quad (3)$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de cizalla sobre el plano,  $\mu'$  es el coeficiente de fricción aparente y  $\sigma_n$  el esfuerzo normal al plano.

En la Figura 3 se presentan los resultados de los cálculos sobre los desgarres con componente normal de dirección N14E (Figura 3a) y sobre los planos de falla inversa de dirección N66E (Figura 3b). En ambos casos las zonas donde se han producido los eventos presentan aumento de esfuerzos, por lo que mecánicamente son compatibles con el modelo presentado.

### CONCLUSIONES

La serie sísmica de Alhucemas 2016 se caracteriza por la presencia de tres agrupaciones de eventos principales, dos de ellas con carácter de desgarre predominante y asociadas a fallas de orientación NNE-SSW formando el Sistema de Falla de Al Idrisi. La otra agrupación de eventos presenta una deformación de falla inversa pura, se sitúa al este de la Falla de Al Idrisi, y está relacionada con las fallas que limitan y elevan la cresta de Alborán. Se produce de este modo una partición de la deformación entre estructuras de diferente comportamiento conducida por la transferencia de esfuerzos estáticos.

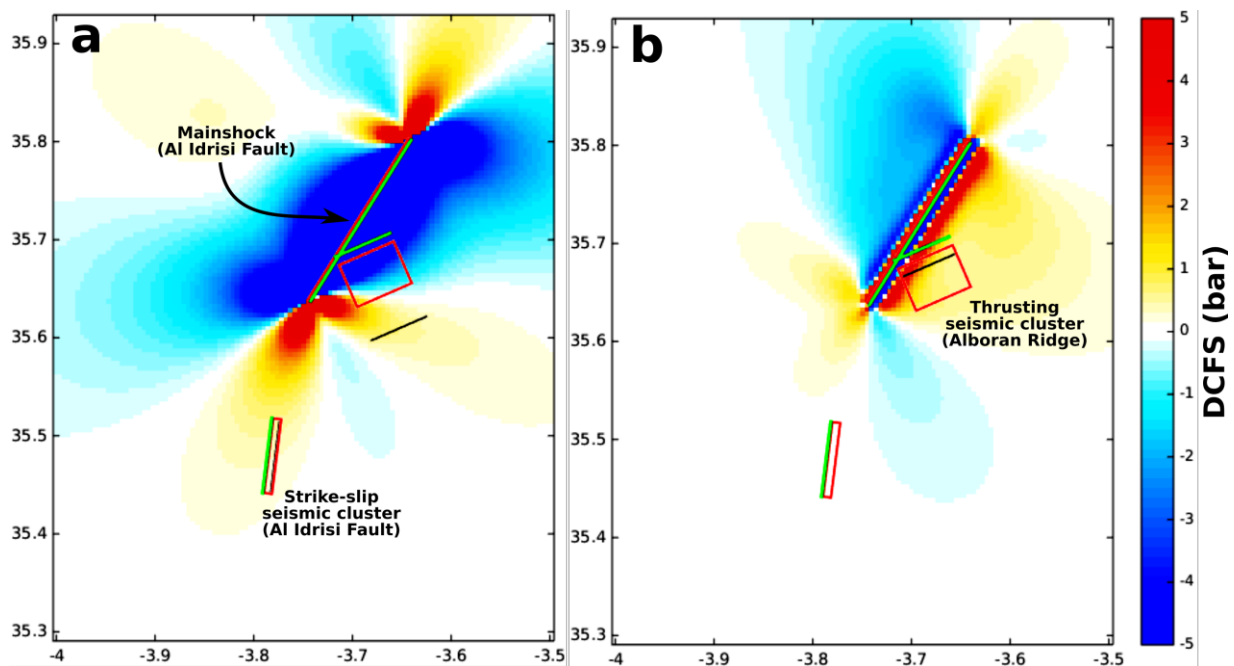


FIGURA 3. a) Variación de esfuerzos estáticos de Coulomb de la agrupación del evento principal sobre planos de desgarre sinistral con componente normal ( $9^\circ$  de cabeceo), N14-80. b) Variación de esfuerzos estáticos de Coulomb de la agrupación del evento principal sobre planos N66-26 de falla inversa.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte de los proyectos CGL2013-47412-C2-1-P y CGL2015-67130-C2-2-R.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Gómez, J. A., Aniel-Quiroga, Í., González, M., Olabarrieta, M., & Carreño, E. (2011): Scenarios for earthquake-generated tsunamis on a complex tectonic area of diffuse deformation and low velocity: The Alboran Sea, Western Mediterranean. *Marine Geology*, 284(1): 55-73.
- Álvarez-Gómez, J. A. (2014): FMC: a one-liner Python program to manage, classify and plot focal mechanisms. *Geophysical Research Abstracts*, 16: EGU2014-10887.
- Álvarez-Marrón, J., (1999): Pliocene to Holocene structure of the eastern Alboran Sea (Western Mediterranean). In: Zahn, R., Comas, M.C., Klaus, A. (Eds.), *Proceedings of the ODP, Scientific Results*, 161: 345-355.
- Insúa Arévalo, J. M., García Mayordomo, J., Salazar, A., Rodríguez-Escudero, E., Martín-Banda, R., Álvarez Gómez, J. A., Canora, C. y Martínez Díaz, J. J. (2015): Paleoseismological evidence of Holocene activity of the Los Tollos Fault (Murcia, SE Spain): A lately formed Quaternary tectonic feature of the Eastern Betic Shear Zone. *Journal of Iberian Geology*, 41(3): 333-350.
- Kiratzi, A. A., y Papazachos, C. B. (1995): Active crustal deformation from the Azores triple junction to the Middle East. *Tectonophysics*, 243(1): 1-24.
- Martínez-García, P. (2012). *Recent tectonic evolution of the Alboran Ridge and Yusuf regions*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 275 p.
- Meijninger, B.M.L. & Vissers, R.L.M. (2006): Miocene extensional basin development in the Betic Cordillera (SE Spain) revealed through analyses of the Alhama de Murcia and Crevillente Faults. *Basin Research*, 18 (4): 547-571
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2): 1018-1040.
- Stich, D., Mancilla, F. D. L., Baumont, D., & Morales, J. (2005): Source analysis of the Mw 6.3 2004 Al Hoceima earthquake (Morocco) using regional apparent source time functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B6).
- Stich, D., Serpelloni, E., de Lis Mancilla, F., & Morales, J. (2006): Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics*, 426(3): 295-317.