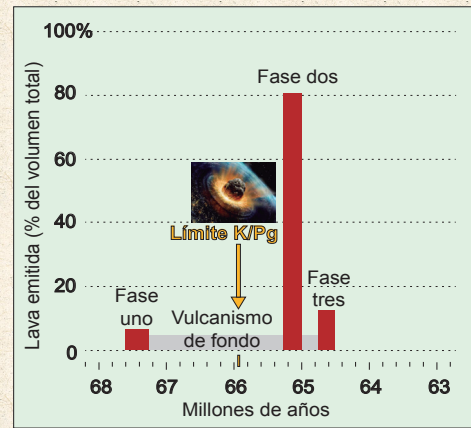


# LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

**CHICXULUB-DECÁN:**

## ¿Una conspiración contra los dinosaurios?

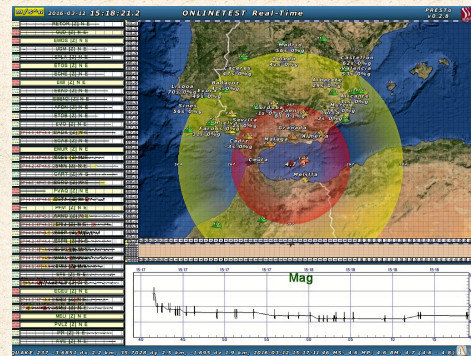
*Francisco Anguita, José Antonio Arz, Ignacio Arenillas y Vicente Gilabert* \_\_\_\_\_ (p. 240)



**SISTEMAS DE ALERTA SÍSMICA TEMPRANA:**

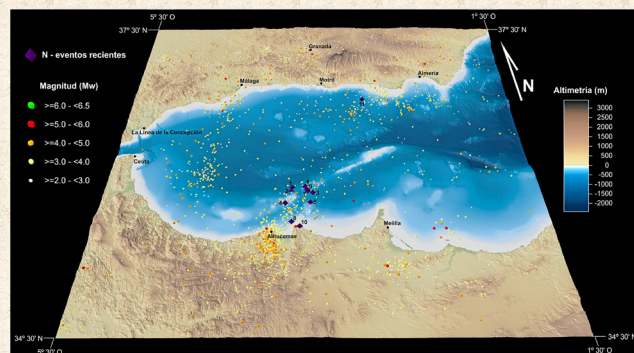
## Hacia la prevención de los daños de los terremotos

*Elisa Buforn* \_\_\_\_\_ (p. 244)



## La tierra tiembla bajo el Mar de Alborán

*Adolfo Maestro, Fernando Bohoyo, Antonio Pedrera y María Gómez-Ballesteros* \_\_\_\_\_ (p. 247)



## Marte: nuevas evidencias sobre agua líquida reciente y habitabilidad

*Jesús Martínez-Frías* \_\_\_\_\_ (p. 250)





# La tierra tiembla bajo el Mar de Alborán

ADOLFO MAESTRO<sup>1</sup>, FERNANDO BOHOYO<sup>1</sup>, ANTONIO PEDRERA<sup>1</sup> Y MARÍA GÓMEZ-BALLESTEROS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid

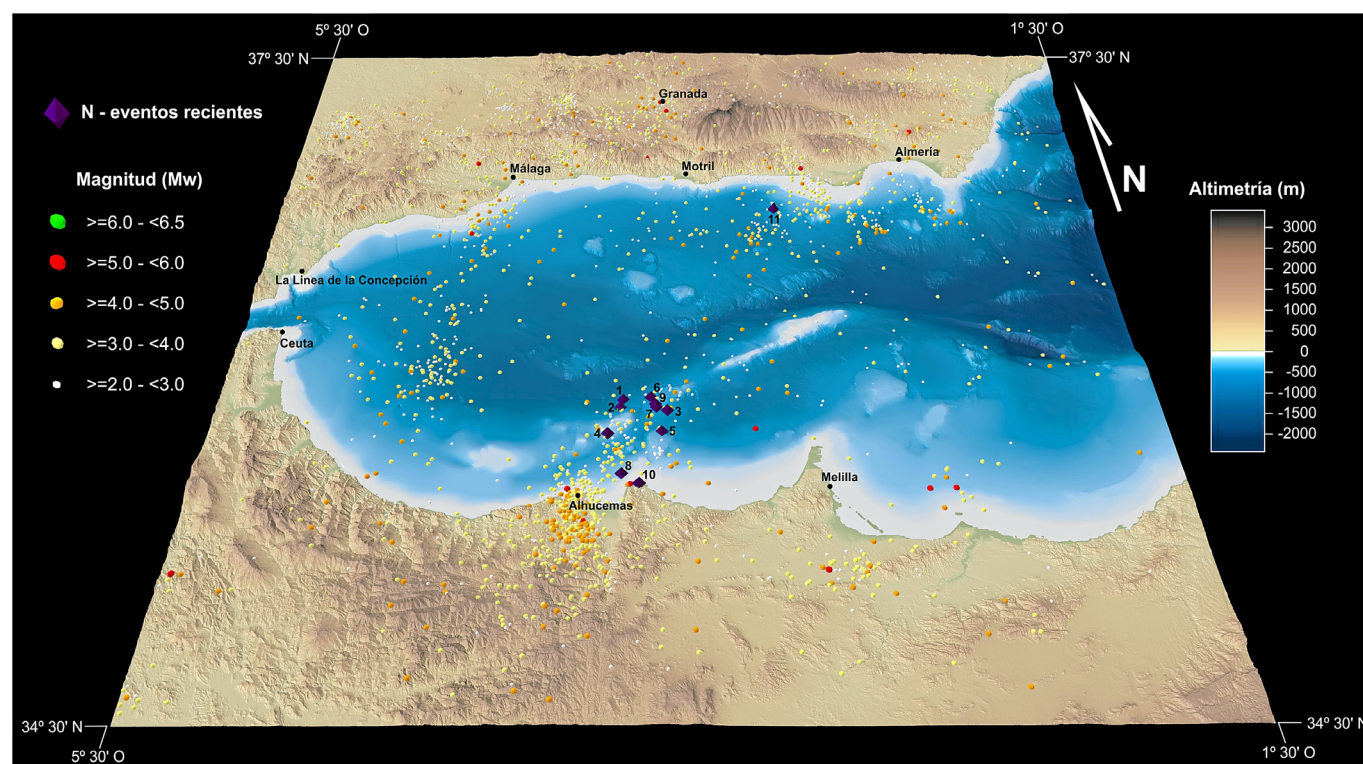
<sup>2</sup> Subdirección General de Investigación. Instituto Español de Oceanografía, Corazón de María, 8, 28002 Madrid

Desde inicios del 2016 han ocurrido una serie de terremotos en la parte meridional del Mar de Alborán que han tenido una gran repercusión social, ya que algunos de ellos han sido sentidos por la población (Fig. 1). El primer

terremoto importante, de magnitud 5.1, se produjo el 21 de enero a unos 45 km al norte de la Bahía de Alhucemas (epicentro 1, Fig. 1). Cuatro días después, el día 25 de enero, tuvo lugar el mayor terremoto de toda esta serie, que alcanzó una magnitud de 6.3 y al que le precedió un importante número de réplicas (epicentro 2, Fig. 1). Ambos fueron sentidos tanto en el margen español cómo en el marroquí hasta una distancia de unos 600 km desde los epicentros, causando ligeros daños y una importante alarma social en los

sectores más cercanos a los epicentros. La actividad sísmica de esta zona, que no ha cesado a día de la redacción de este artículo, está caracterizada por numerosos terremotos con magnitudes en torno a 3 y terremotos mayores ocasionales. Por ejemplo, el 22 de febrero se volvió a registrar un terremoto con magnitud 5.1 (epicentro 3, Fig. 1) y los días 3, 9, 11, 12, 13, 15 y 16 de marzo tuvieron lugar eventos sísmicos con magnitudes de 4.7, 4.5, 5, 4.8, 4.1, 5.2 y 4.2 (epicentros 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, Fig. 1), respectivamente,

Fig. 1. Modelo digital del terreno del Mar de Alborán y zonas emergidas limítrofes, donde se han representado los epicentros de los terremotos registrados en el área por el Instituto Geográfico Nacional desde 1487 hasta la actualidad.



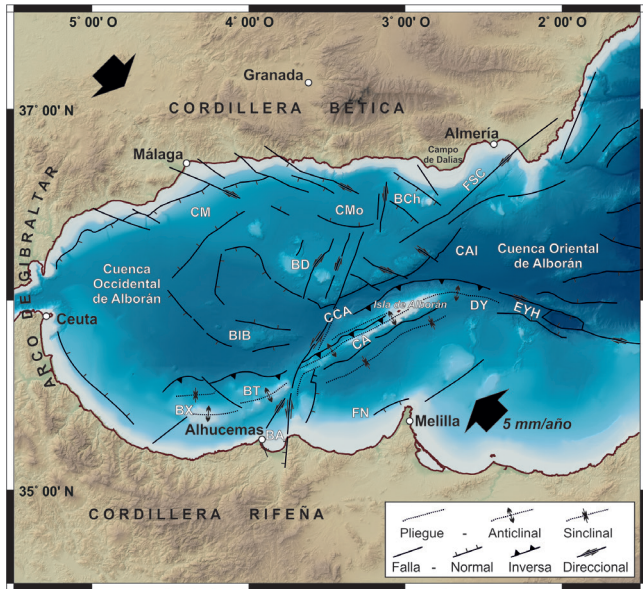


Fig. 2. Esquema estructural del Mar de Alborán (Martínez-García et al., 2013; D'Acromont et al., 2014 y Galindo-Zaldívar, 2015). BA: Bahía de Alhucemas; BCh: Banco de Chella; BD: Banco de Djibouti; BIB: Banco de Ibn Batouta; BT: Banco de Tofiño; BX: Banco de Xauen; CA: Cresta de Alborán; CAI: Cuenca de Almería; CCA: Canal Central de Alborán; CM: Cuenca de Motril; DY: Dorsal de Yusuf; EYH: Escarpe de Yusuf-Habibas; FN: Falla de Nekor; FSC: Falla de Serrata-Carboneras. Las flechas negras indican la dirección de convergencia entre las placas Euroasiática y Africana.

cionada con la baja tasa de convergencia entre las placas Africana y Euroasiática (5 mm/año en el sector de Alborán). Esta velocidad de acercamiento entre las placas se duplica en el Mediterráneo oriental, alcanzando los 10 mm/año, donde se han producido sismos de magnitud 7 en la zona comprendida entre Grecia y Turquía. Otro ejemplo más extremo ocurre en la zona de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica, en el Océano Pacífico suroriental, en concreto afectando a Chile, Perú, Ecuador y Colombia, donde la velocidad estimada es de unos 11 cm/año, 11 veces superior al sector oriental del Mediterráneo y 22 veces superior a la velocidad de convergencia en la zona del Mar de Alborán. En este límite de placas los terremotos han llegado a alcanzar magnitudes de 9. Por tanto hay una relación directa entre la tasa de convergencia, la energía elástica acumulada en las fallas y la magnitud de los terremotos cuando esta se libera.

En el caso particular del Mar de Alborán la sismicidad está estrechamente relacionada con fallas activas que delimitan algunos de los principales elementos morfológicos de su lecho: la Cresta de Alborán, al Escarpe de Yusuf-Habibas, la Cuenca de Motril y la Bahía de Alhucemas (Fig. 2). De hecho, es en este último sector donde se está produciendo actualmente la sismicidad, y ha sido reconocido por diversos investigadores como una importante zona de fallas activas. Estas fallas, identificadas y caracterizadas en diversos estudios mediante el análisis de datos geofísicos, batimétricos y sismológicos, tienen una orientación preferente NNE-SSO (Fig. 3). Los bloques de corteza situados a ambos lados de la zona de falla se desplazan lateralmente uno respecto al otro en un movimiento cinemático de salto en dirección sinistorsor. Estas fallas constituyen la terminación suroccidental de la Cresta de Alborán cuyo desarrollo está relacionado con la actividad de fallas inversas y pliegues asociados (Fig. 3). Estas fallas deforman los sedimentos más recientes del Holoceno, produciendo escarpes en el lecho marino. La terminación meridional de la zona de fallas se prolonga hasta la región de Alhucemas, donde se concentra gran parte de la sismicidad registrada en la Cordillera Rifeña.

entre los que se registraron numerosos sismos de menor magnitud. Esta persistencia de eventos sísmicos en un área concreta durante un periodo de tiempo corto, que puede variar de días a meses, se denomina enjambre sísmico. Además de esta importante secuencia sísmica en el sector meridional, el día 31 de enero se produjo un terremoto de magnitud 4.5 al norte de Mar de Alborán (epicentro 11, Fig. 1), con epicentro situado a tan sólo 19 km al sur de Adra (Almería), y a 42 y 65 km de Motril (Granada) y Almería, respectivamente, y que fue sentido en una amplia zona de Andalucía oriental.

¿Es normal que se produzcan tantos terremotos de magnitudes moderadas en esta parte del Mar de Alborán? La respuesta es sí. Normalmente los terremotos se producen a lo largo de fallas preexistentes que constituyen zonas de fragilidad en la corteza terrestre, y sabemos que las fallas que se han movido recientemente pueden volver a hacerlo.

El Mar de Alborán se localiza en el límite entre las placas Euroasiática y Africana, y constituye una cuenca neógena de gran tamaño situada entre la Cordillera Bética y la Cordillera Rifeña. Ambas cordilleras, conectadas a través del Arco de Gibraltar, se han desarrollado por la interacción entre estas placas mayores y el movimiento relativo hacia el oeste de un bloque continental de menor tamaño denominado Dominio Alborán. Las placas Euroasiática y Africana se siguen aproximando actualmente a unos 5 mm/año en dirección NO-SE.

Esta convergencia da lugar a un engrosamiento de la corteza continental de las cordilleras Bético-Rifeñas, mientras que el Mar de Alborán presenta una corteza continental adelgazada por extensión. El movimiento de las fallas, como respuesta a la convergencia entre dichas placas, es la causa de la importante actividad sísmica existente en el Mar de Alborán. La sismicidad en esta zona se caracteriza principalmente por eventos con magnitudes inferiores a 5 que generalmente se producen en los primeros 20 km de la corteza terrestre, si bien, también se han registrados terremotos generados a profundidades entre 40 y 180 km en el sector occidental del Mar de Alborán, alineados según una dirección preferente N-S (Fig. 1).

Los terremotos de mayor magnitud son más esporádicos y generalmente se localizan en el margen meridional del Mar de Alborán. Destacan los terremotos cercanos a Alhucemas (Fig. 1) que tuvieron lugar el 26 de mayo de 1994 y el 24 de febrero de 2004 con magnitudes de 6 y 6.4 respectivamente, que junto con el terremoto del pasado 25 de enero constituyen los sismos de mayor magnitud registrados en la región en el último siglo. Al norte de Alborán, en el margen ibérico, puede señalarse el área comprendida entre el Campo de Dalías (Almería) y la parte occidental de la Cuenca de Motril (Granada) como una zona de alta frecuencia y alta magnitud relativa de eventos sísmicos (Fig. 2). La magnitud de los terremotos en la zona del Mar de Alborán está en parte rela-



Cuando una falla se mueve, parte del movimiento de sus bloques se transmite hacia sectores cercanos pudiendo causar nuevos terremotos de menor magnitud a lo largo de fracturas próximas. Estos sismos menores que ocurren después del evento principal reciben el nombre de réplicas y se van reduciendo con el tiempo. Se ha estimado que el ritmo de las réplicas descende un 10% del inicial, después de 10 días y un 1% cien días después. Este patrón de descenso de la decadencia temporal de la tasa de réplicas sigue una función empírica que recibe el nombre de Ley de Omori. Esto ha ocurrido en los terremotos detectados en los últimos meses en el Mar de Alborán donde, tras un terremoto de magnitud relativamente elevada, se han sucedido temblores de menor magnitud durante los días posteriores.

La particularidad de la serie sísmica del sur del Mar de Alborán es la presencia de varios eventos de magnitudes relativamente altas seguidos de sus respectivas réplicas. ¿Qué está sucediendo entonces? Como explicamos anteriormente, cuando una falla se desplaza, esta transmite parte del movimiento de sus bloques hacia sectores próximos lo que produce una modificación local del régimen de esfuerzos. Cuando un terremoto, pese a ser de magnitud importante, no consigue relajar toda la energía elástica acumulada en un sector, la redistribución de los esfuerzos asociada al evento puede contribuir a reactivar fallas cercanas. Tras un terremoto de magnitud relativamente alta, se reduce la probabilidad de que suceda un segundo evento importante en esa misma falla, pero la probabilidad de que un segundo terremoto suceda en una falla próxima puede aumentar. En este caso no estaríamos hablando de réplicas, sino que se tratarían de terremotos concatenados, relacionados con la interacción entre diferentes fallas muy próximas entre sí, que se encontraban en una situación de precarga. La sucesión de eventos sísmicos de magnitudes superiores a 4 desde finales de enero a abril en la zona meridional del Mar de Alborán podrían estar relacionados con procesos de este tipo.

Aunque cada día se sabe más sobre los mecanismos que dan lugar a los terremotos, todavía queda mucho para establecer predicciones probabilísticas fiables, y aun así, se desconoce hasta

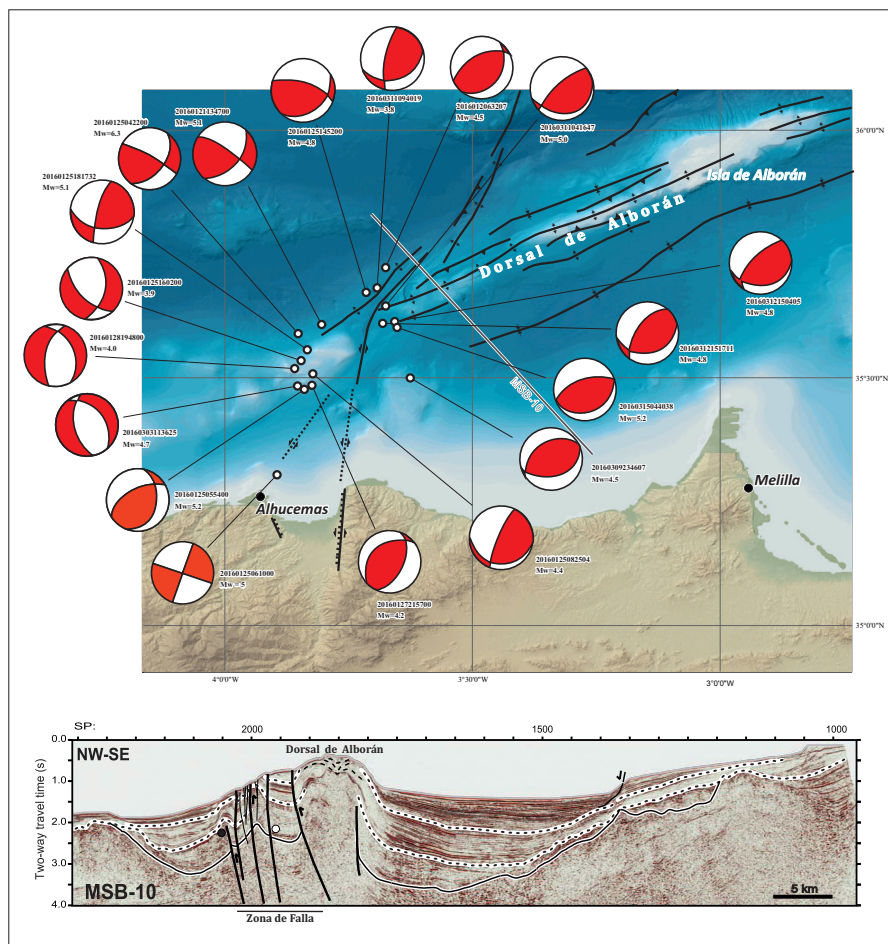


Fig. 3. Estructuras activas (Martínez-García et al., 2013; D'Acremont et al., 2014 y Galindo-Zaldívar, 2015) y mecanismos focales calculados para los terremotos mayores, ocurridos entre el 20 y el 28 de marzo de 2016 (IGN, web <http://www.ign.es/ign/main/index.do>). Las áreas rojas de los estereogramas de los mecanismos focales indican extensión, y las blancas compresión. El mapa incluye la posición de la línea sísmica MSB-10, que se muestra debajo del mapa (modificada de Martínez-García et al., 2013).

qué punto estas predicciones pueden anticiparse con el tiempo suficiente para proteger a la población. Por este motivo, es muy importante educar a la población en qué comportamientos y pautas deben seguir cuando ocurre un terremoto, así como realizar el reforzamiento de edificios e infraestructuras existentes, y su construcción siguiendo

la Norma Sismorresistente vigente en las zonas de riesgo sísmico. Sólo de este modo minimizaremos los daños en la población e infraestructuras, tal y como nos demuestran aquellos países con una cultura sísmica más implantada, como Japón y Chile. ●

#### Referencias

- D'Acremont, E., Gutscher, M.A., Rabaute, A., Mercier de Lépinay, B., Lafosse, M., Poort, J., Ammar, A., Tahayt, A., Le Roy, P., Smit, J., Do Couto, D., Cancouët, R., Prunier, C. Ercilla, G. y Gorini, C. (2014). High-resolution imagery of active faulting offshore Al Hoceima, Northern Morocco. *Tectonophysics*, 632, 160-166.
- Galindo-Zaldívar, J., Chalouan, A., Azzouz, O., Sanz de Galdeano, C., Anahnah, F., Ameza, L., Ruano, P., Pedrera, A., Ruiz-Constán, A., Marin-Lechado, C., Benmakhlof, M., López-Garrido, A.C., Ahmamou, M., Saji, R., Roldán-García, F.J., Akil, M. y Chabli, A. (2009). Are the seismological and geological observations of the Al Hoceima (Morocco, Rif) 2004 earthquake ( $M = 6.3$ ) contradictory? *Tectonophysics*, 475, 59-67.
- Martínez-García, P., Comas, M., Soto, J.I., Lonergan, L. y Watts, A.B. (2013). Strike-slip tectonics and basin inversion in the Western Mediterranean: the Post-Messinian evolution of the Alboran Sea. *Basin Research*, 25, 361-387.