



Geodesia eta geofisikako biltzar hispano portugaldarra

**Asamblea hispano
portuguesa de
geodesia y geofísica**

*Assembleia luso-
espanhola de
geodesia y geofísica*

Portuguese-Spanish Assembly of Geodesy and Geophysics

23-28 / 06 / 2012

S02 *Sismologia eta Lurraren Barnealdeko Fisika*
Sismología y Física de Interior de la Tierra
Sismología e Física do Interior da Terra
Seismology and Physics of the Earth's Interior

Fernando Carilho
José Antonio Peláez Montilla
José Ignacio Badal Nicolás
Suzana Custodio

Estudio de las series sísmicas de Arquillos, abril de 2010 - julio de 2011, y Baeza, mayo - diciembre de 2011, en la zona centro de la provincia de Jaén.

Study of the Arquillos, April 2010 - July 2011, and Baeza, May - December 2011, seismic swarms, in the central part of the province of Jaén.

J.A. Peláez(1,2), M. Hamdache(3), F. Pérez Valera(4), J. Henares(2), M. Sánchez Gómez(4,2), y C. López Casado(5,2). 1 Dpto. de Física, Universidad de Jaén. 2 Grupo andaluz de de investigación Riesgo sísmico y Tectónica activa. 3 Dpt. d'Études et Surveillance Sismique, CRAAG, Argel. 4 Dpto. de Geología, Universidad de Jaén 5 Dpto. de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada.

SUMMARY

Here we present the description and study of two small seismic swarms happened in the central part of the province of Jaén, being overlapped partly in the time and practically also in the space. The recorded maximum earthquakes were those of 04/04/2010, mbLg 3.2, located at the NE of Vilches, in the case of the so called seismic swarm of Arquillos, and that of 14/10/2011, mbLg 2.7, located at the SE of Baeza, in the case of the so called seismic swarm of Baeza. None of them, including more than 50 events, responds to one of the well-known typical patterns of a seismic swarm. A statistical study of both series is also performed (b-parameter, fractal dimension, density of probability of the inter-events distance), as well as a proposal of its seismotectonic setting. Both seismic swarms are located along a N-S transect crosscutting the Guadalquivir Basin, from the flexural bulge of the Variscan basement to the north, until the present-day axis of the basin. Although the main structures in the region has been considered inactive since the upper Miocene, the swarms alignment suggest an active structure, as it could be a tear fault zone that accommodate different overloads due to tectonic thickening of the Betic Units.

RESUMEN

Presentamos aquí la descripción y estudio de dos pequeñas series sísmicas ocurridas en la zona centro de la provincia de Jaén, solapándose en parte en el tiempo y prácticamente también en el espacio. Los máximos terremotos registrados fueron los de NE de Vilches de 04/04/2010, de magnitud 3.2 mbLg, en el caso de la llamada serie sísmica de Arquillos, y el de SE de Baeza de 14/10/2011, de magnitud 2.7 mbLg, en el caso de la llamada serie sísmica de Baeza. Ninguna de ellas, con más de 50 eventos, responde a uno de los conocidos típicos patrones de serie sísmica. Se realiza también un estudio estadístico de ambas series (parámetro b, dimensión fractal, densidad de probabilidad de la distancia entre eventos) y se propone su encuadre sismotectónico. Ambas series sísmicas se sitúan a lo largo de una transversal N-S en la Cuenca del Guadalquivir, desde la flexura del basamento Varisco que la limita al norte hasta el centro de la misma. Aunque todas las estructuras descritas en la zona se suponen inactivas desde el Mioceno medio, la alineación de eventos podría ser compatible con una compartimentación del basamento mediante una zona de falla tipo "tear" que acomodara distintas sobrecargas de las unidades Béticas.



Geodesia eta geofisikako biltzar hispano portugaldarra

Asamblea hispano
portuguesa de
geodesia y geofísica

*Assembleia luso-
espanhola de
geodesia y geofisica*

Portuguese-Spanish Assembly of Geodesy and Geophysics

donostia-san sebastián

23-28 / 06 / 2012



Geodesia eta geofisikako biltzar hispano portugaldarra

**Asamblea hispano
portuguesa de
geodesia y geofísica**

*Assembleia luso-
espanhola de
geodesia y geofísica*

Portuguese-Spanish Assembly of Geodesy and Geophysics

Proceedings

Editor

J. Zurutuza

Donostia – San Sebastián

25-29 / 06 / 2012



ARANZADI

zientzia elkarteak . society of sciences
sociedad de ciencias . société de sciences

Estudio de las series sísmicas de Arquillos, abril de 2010 - julio de 2011?, y Baeza, mayo - diciembre de 2011?, en la zona centro de la provincia de Jaén *Study of the Arquillos, April 2010 - July 2011?, and Baeza, May - December 2011?, seismic swarms, in the central part of the province of Jaén*

José A. Peláez^(1,5), Mohamed Hamdache⁽²⁾, Fernando Pérez Valera⁽³⁾, Jesús Henares⁽⁵⁾, Mario Sánchez Gómez^(3,5), y Carlos López Casado^(4,5)

⁽¹⁾Dpto. de Física, Universidad de Jaén, Jaén

⁽²⁾Dpt. d'Études et Surveillance Sismique, CRAAG, Argel

⁽³⁾Dpto. de Geología, Universidad de Jaén, Jaén

⁽⁴⁾Dpto. de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Granada

⁽⁵⁾Grupo Andaluz de Investigación "Riesgo sísmico y Tectónica activa"

SUMMARY

Here we present the description and study of two small seismic swarms happened in the central part of the province of Jaén, being overlapped partly in the time and practically also in the space. The recorded maximum earthquakes were those of 04/04/2010, m_{bLg} 3.2, located at the NE of Vilches, in the case of the so called seismic swarm of Arquillos, and that of 14/10/2011, m_{bLg} 2.7, located at the SE of Baeza, in the case of the so called seismic swarm of Baeza. None of them, including more than 50 events, responds to one of the well-known typical patterns of a seismic swarm.

A statistical study of both series is also performed (b -parameter, fractal dimension, density of probability of the inter-events distance), as well as a proposal of its seismotectonic setting.

Both seismic swarms are located along a N-S transect crosscutting the Guadalquivir Basin, from the flexural bulge of the Variscan basement to the north, until the present-day axis of the basin. Although the main structures in the region has been considered inactive since the upper Miocene, the swarm alignment suggest an active structure, as it could be a tear fault zone that accommodate different overloads due to tectonic thickening of the Betic Units.

1. INTRODUCCIÓN

En esta comunicación pretendemos describir y estudiar dos pequeñas series sísmicas que ocurren en la parte central de la provincia de Jaén a lo largo del 2010 y 2011. De hecho, aún en la actualidad se siguen registrando terremotos de muy baja magnitud (0.6-1.5 m_{bLg}) en dicha zona, desconocidos con anterioridad a dichas series.

Son las que llamaremos la serie de Arquillos, de la que se han localizado unos 60 terremotos, cuyo centroide se encuentra justo al Sur de la población de Arquillos y del pantano de Guadalén, y la de Baeza, de la que se llegaron a localizar unos 70 eventos, cuyo centroide se encuentra a unos 20 km al Sur del anterior, justo al Sur de la población de Baeza.

Aunque no tienen una especial importancia desde los puntos de vista de la peligrosidad sísmica o puramente sismológico, el hecho de que las series sean sucesos inusuales en esta zona, así como que son indicativas de una cierta actividad tectónica, hacen que sean merecedoras de destacarse.

Los datos utilizados son los registrados por la Red Sísmica Nacional y proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional. No han sido reprocesados. No ha sido posible una relocalización diferencial de los eventos, lo que quizás hubiera podido aportar más información. Tampoco, dada la baja magnitud de los eventos y alta relación señal ruido, ha sido posible calcular algún mecanismo focal, ni siquiera del evento más energético de cada una de las series.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS SERIES

Las figuras 1 y 2 muestran las distribuciones espacial y temporal, respectivamente, de ambas series. Nos basaremos en ellas para su descripción. El criterio para determinar si un evento pertenece a una serie en cuestión o no, ha sido su proximidad espacial al centroide del agrupamiento. Es posible que algunos de los eventos más distantes no pertenezcan estrictamente a la serie. Si se ha considerado que sí pertenecen, ha sido porque con anterioridad a la serie esta zona no tenía sismicidad, por lo tanto, cuando menos, sí son eventos relacionados.

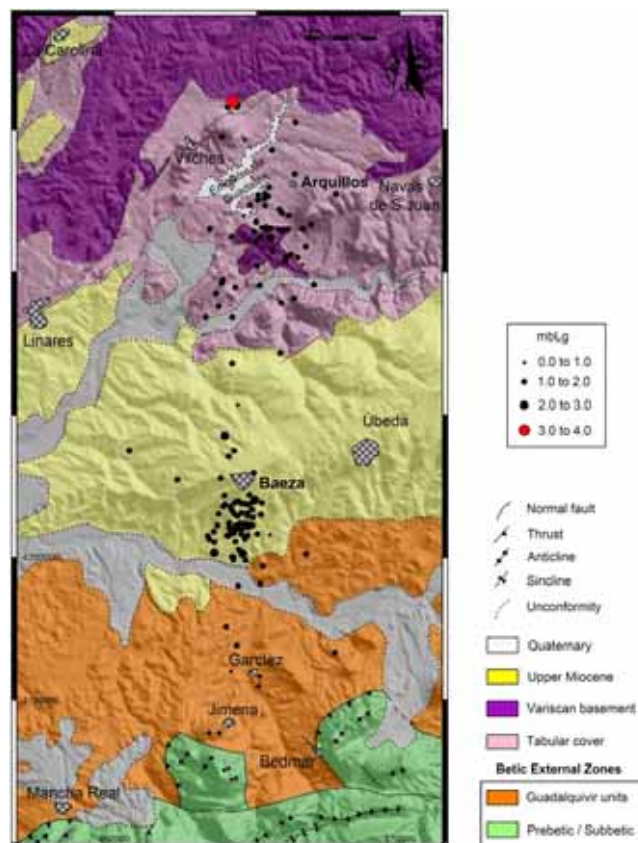


Figura 1 - Distribución espacial de los eventos localizados en las series de Arquillos y Baeza. Encuadre geológico. (Spatial distribution of the located events in the seismic swarms of Arquillos and Baeza. Geological sketch)

La serie de Arquillos comienza con el terremoto de NE de Vilches de 04/04/2010, de magnitud 3.2 m_{bLg} (figuras 1, 2 y 3). Es el primero y más energético de los 59 eventos localizados hasta diciembre de 2011 que conforman esta serie sísmica. Este primer

terremoto es seguido en los siguientes días por otros tres aproximadamente en la misma localización. Tras dos meses de quietud, y con la excepción de un terremoto de transición, la serie se traslada a una nueva ubicación, con un centroide a unos 10 km al SSE de la ubicación del terremoto principal.

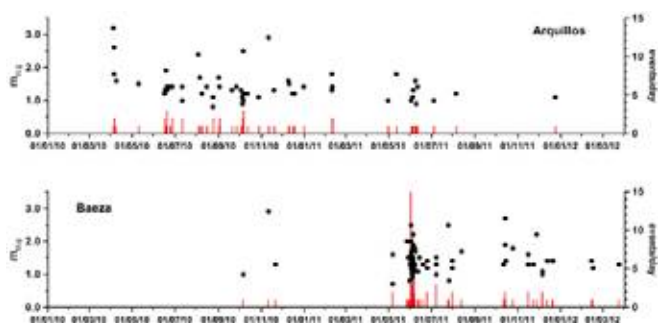


Figura 2 - Distribución temporal de las series de Arquillos y Baeza.
(Temporal distribution of the seismic swarms of Arquillos and Baeza)

En principio, la serie sísmica continúa hasta marzo de 2011, y tras un nuevo impás de dos meses, vuelven a localizarse de nuevo eventos en la zona entre junio y agosto, aunque en menor número. Aún siguen registrándose en este momento eventos esporádicos en la región. En general, es una serie que presenta una tasa de eventos baja, alcanzándose sólo en dos ocasiones el valor de 3 eventos/día.

Utilizando los valores de profundidad de los eventos mejor localizados, podemos indicar que la mayoría de ellos se localizan a unos 10-11 km de profundidad, con la excepción de tres de ellos, claramente registrados a 21-22 km de profundidad, estando todos localizados, por lo tanto, en el basamento.

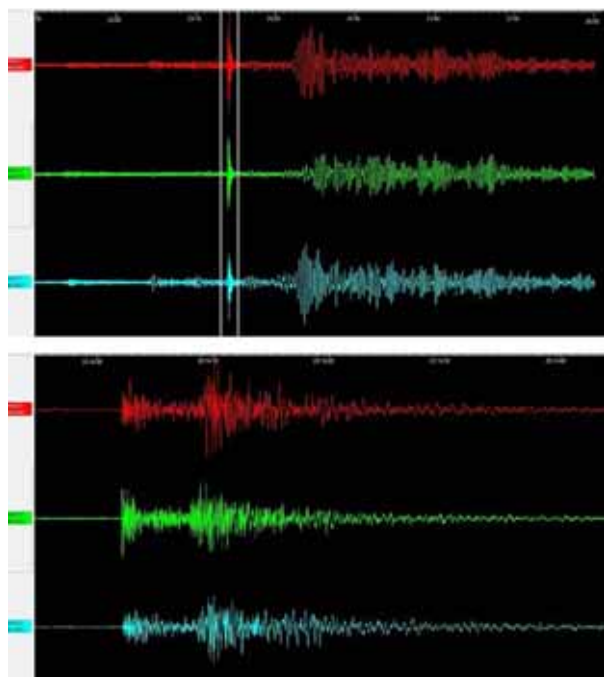


Figura 3 - Registro en la estación de banda ancha de la Universidad de Jaén. Arriba: Registro superpuesto del terremoto de NE de Vilches de 04/04/2010 al telesismo de Sierra El Mayor (Baja California, México) de magnitud 7.2 M_w . Abajo: Detalle del terremoto de NE de Vilches de 04/04/2010. (Record of the University of Jaén broad band station. Top: Superimposed records of the 04/04/2010 NE Vilches and the Sierra El Mayor (Baja California, México), M_w 7.2, events. Bottom: Detail of the 04/04/2010 NE Vilches earthquake)

De los terremotos de la serie de Arquillos sólo hay constancia de haber sido sentidos dos de ellos, los de mayor magnitud. Son el principal de la serie, el de 04/04/2010, de magnitud 3.2 m_{bLg} , sentido con intensidad máxima III en Vilches, Arquillos, La Carolina,

Linares, Bailén y Mengíbar, y el de NW de Ibros de 11/11/2010, de magnitud 2.9 m_{bLg} , sentido también con intensidad máxima III en las poblaciones de Linares, Rus y Canena.

La serie de Baeza comienza el día 07/05/2011 con dos pequeños terremotos de magnitudes 1.6 y 0.7 m_{bLg} , y a partir del 27/05/2011 ya de forma continua. Aunque se registran tres terremotos en la zona siete meses antes, no es claro que pertenezcan a la misma serie sísmica. Dos de ellos, equidistantes de los centroides de las series de Arquillos y de Baeza, ya han sido considerados como pertenecientes a la anterior serie, el más importante, el citado anteriormente de NW de Ibros de 11/11/2010. Aunque estos tres terremotos se han incluido en la figura 2, no se han considerado como pertenecientes a esta serie sísmica. Esta serie la conforman un total de 71 eventos localizados hasta marzo de 2012. El terremoto más energético es el terremoto de S de Baeza de 14/10/2011, de magnitud 2.7 m_{bLg} .

Temporalmente hablando, presenta también un comportamiento irregular. Comienza en mayo de 2011, tiene su mayor número de terremotos en junio, y continúa con menor intensidad en julio y agosto. Tras un período sin terremotos en septiembre, continúa desde octubre a diciembre del mismo año. Al igual que en la serie de Arquillos, aún siguen registrándose en este momento eventos esporádicos en la región. Presenta una tasa de eventos netamente superior a la de Arquillos, alcanzándose al principio de la serie sísmica los 15 y 10 eventos/día. Hay por tanto un solapamiento temporal entre el comienzo de esta serie y el final de la anterior (figura 2).

Al igual que en la serie de Arquillos, los valores de profundidad de los eventos mejor localizados nos dan una profundidad media de 10-12 km, con la excepción de dos de ellos, uno registrado a 21 km y otro a 30 km de profundidad, este último localizado unos 11 km al SE del centroide de la serie.

De los terremotos de la serie de Baeza sólo hay constancia de haber sido sentidos dos de ellos. Son el de SW de Baeza de 02/06/2011, de magnitud 2.5 m_{bLg} , sentido con intensidad máxima II en Baeza y Begíjar, y el más energético, el anteriormente citado de S de Baeza de 14/10/2011, de magnitud 2.7 m_{bLg} , sentido con intensidad máxima III en Baeza.

Tras utilizar una relación entre la energía liberada mediante ondas sísmicas y la magnitud, podemos indicar que en la serie de Arquillos se liberó la energía equivalente a un terremoto de magnitud 3.4 m_{bLg} , y en el caso de la serie de Baeza, la equivalente a un terremoto de magnitud 3.1 m_{bLg} .

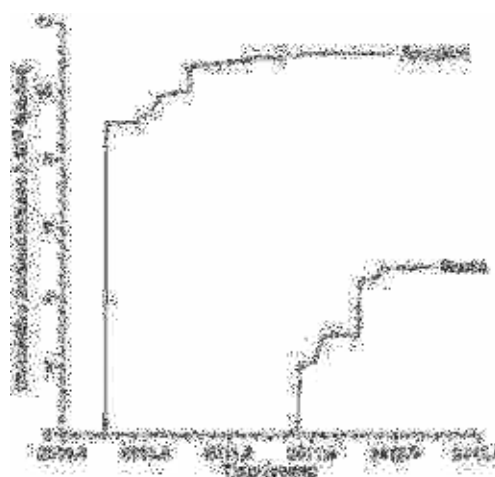


Figura 4 - Momento sísmico liberado en función del tiempo para las series sísmicas estudiadas. (Cumulative moment released vs. time for the two studied seismic swarms)

En la figura 4 se muestra el momento sísmico liberado en ambas series en función del tiempo. En el caso de la serie de Arquillos, la mayor parte de éste se relaja durante el primer evento, el de mayor magnitud de la serie (3.2 m_{bLg}). En la serie de Baeza el gráfico es

más escalonado, mostrando varios eventos que contribuyen, aunque de forma dispar, al momento sísmico total.

3. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

El primero que consideraremos es el parámetro b de la relación de Gutenberg-Richter. En la figura 5 se observa para ambas series el ajuste entre el número acumulativo de terremotos y la magnitud.

En el caso de la serie de Arquillos, el ajuste global de los datos no es bueno. Hemos considerado que la magnitud umbral en lo tocante a la completitud de la serie (magnitud a partir de la cual la relación es lineal) toma el valor 2.3 $m_{bl,g}$, obteniéndose así, para los terremotos por encima de dicha magnitud, un valor para b igual a 0.89 ($\sigma = 0.08$). Aunque este ajuste sólo incluye los cinco eventos más energéticos de la serie, lo hemos preferido a la hora de dar más peso a los terremotos de mayor magnitud de la serie. Es un valor bajo para lo usual en este tipo de sucesos.

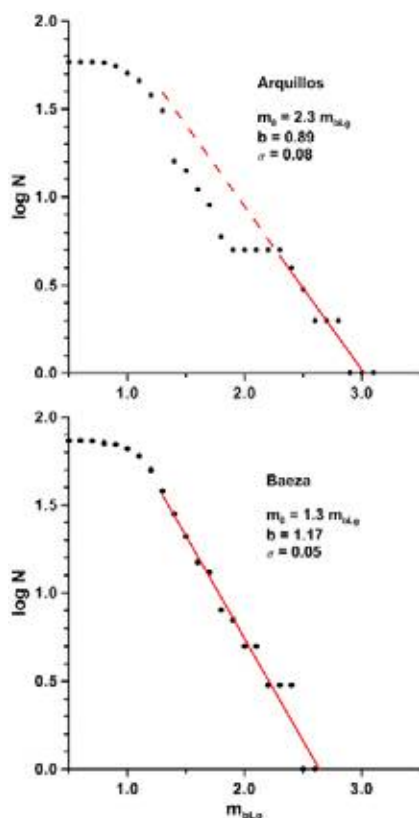


Figura 5 - Número acumulativo de terremotos para las dos series sísmicas estudiadas. (Cumulative number of earthquakes for the two studied seismic swarms)

Para la serie de Baeza, el ajuste es significativamente mejor. Considerando una magnitud umbral igual a 1.2 $m_{bl,g}$ se obtiene un valor para el parámetro b igual a 1.17 ($\sigma = 0.05$), un valor típico para series y enjambres de terremotos (Scholz, 1968).

Se ha calculado también, haciendo uso del llamado criterio de información de Akaike (AIC, Akaike Information Criterion) (Akaike, 1974), la probabilidad P_b de que ambas secuencias de terremotos pertenezcan a una única población (serie). Se utiliza la expresión

$$P_b = \exp\left(\frac{-\Delta AIC}{2} - 2\right) \tag{1}$$

en donde

$$\Delta AIC = -2(N_1 + N_2) \ln(N_1 + N_2) + 2N_1 \ln\left(N_1 + \frac{N_2 b_1}{b_2}\right) + 2N_2 \ln\left(N_2 + \frac{N_1 b_2}{b_1}\right) - 2 \tag{2}$$

siendo N_i y b_i el número de terremotos y el parámetro b , respectivamente, de cada una de las series.

El resultado, $P_b = 0.109$, parece mostrar claramente que son dos series independientes, o al menos con valores de b significativamente diferentes. Este resultado no parece concordar con el hecho de que en una zona en la que no hay sismicidad, de pronto aparezcan dos series, con independencia de sus características, que se solapan parcialmente en el tiempo y el espacio. Con independencia de este resultado, sí parecen estar relacionadas en alguna forma ambas secuencias sísmicas.

A la hora de estudiar las características fractales de ambas series, hemos calculado la dimensión de correlación D_2 (Grassberger and Procaccia, 1983) a partir de las expresiones

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \tag{3}$$

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |x_i - x_j|) \tag{4}$$

en donde $C(r)$ es la llamada integral de correlación; simplificando, es función de la probabilidad de que dos terremotos estén separados por una distancia inferior a r . En la anterior expresión, H es la función de Heaviside, y las x las coordenadas de los epicentros. El tramo lineal de la integral de correlación, es decir, el rango de escala o intervalo de comportamiento fractal, se obtiene a partir del gráfico de la primera derivada de la integral de correlación (Spada *et al.*, 2011).

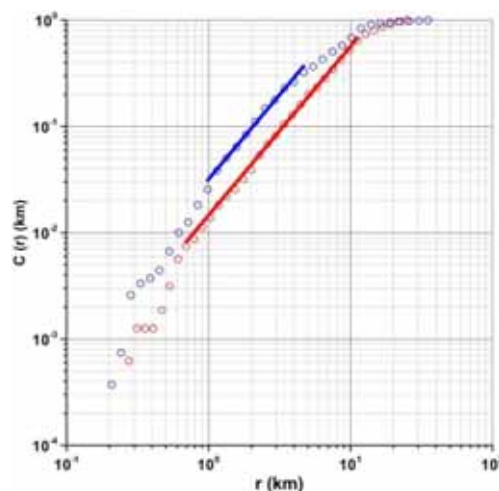


Figura 6 - $C(r)$ vs. r . La pendiente de la recta es la dimensión fractal D_2 . Rojo: serie sísmica de Arquillos. Azul: serie sísmica de Baeza. ($C(r)$ vs. r . Red: Arquillos seismic swarm. Blue: Baeza seismic swarm)

Los valores de D_2 obtenidos son 1.59 ($\sigma = 0.07$) y 1.26 ($\sigma = 0.20$) para las series de Arquillos y Baeza, respectivamente. Son un reflejo del grado de dispersión de ambas series, mayor en la primera de ellas cuando se compara con la segunda.

4. ENCUADRE GEOLÓGICO

Los terremotos de ambas series se distribuyen por una heterogénea geología de superficie que incluye tres dominios bien diferenciados. Al norte afloran los materiales del Macizo Ibérico, de edad Varisca, sobre los que se sitúa la Cobertera Tabular Mesozoica, que como su nombre indica está poco deformada. En la parte central se encuentra el relleno de la Cuenca del Guadalquivir, de edad Miocena, también poco o nada deformado. Sin embargo, en el límite sur, los materiales pertenecientes a las Béticas presentan una compleja historia de deformación Miocena (Pérez Valera *et al.*, 2011), que continúa de forma más o menos intensa hasta el Cuaternario, observándose terremotos que pueden ser correlacionados con estructuras visibles en superficie (Sánchez Gómez *et al.*, 2008; Pérez Valera *et al.*, en prensa).

No obstante, dada la profundidad de los terremotos, todos ellos se generaron en materiales del Macizo Ibérico, que se prolonga como basamento tanto de la Cuenca del Guadalquivir como de todas las Zonas Externas Béticas (Galindo Zaldívar *et al.*, 1997; Ruano *et al.*, 2004). Por lo tanto, no es esperable que exista una correspondencia directa entre los terremotos y las estructuras de posible edad Cuaternaria que se llegaran a observar, excepto si se identificara alguna en las unidades Variscas o de la Cobertera Tabular. Las fallas más evidentes que pudieran ser candidatas a estar en relación, aunque sea indirecta, con el estado de esfuerzos que generó las series sísmicas, son fallas normales de orientación NNW-SSE que tienen un funcionamiento Cuaternario, al menos dentro del frente montañoso Bético (García Tortosa *et al.*, 2008), pero que también afectan al basamento, por ejemplo al sur de Arquillos (figura 1), si bien todavía no han sido identificadas dentro de la Cuenca del Guadalquivir.

Otras estructuras señaladas como activas son los propios cabalgamientos del frente montañoso, pero que deberían producir series sísmicas con una mayor dispersión E-W, como la ocurrida en 1993 en Mancha Real (Peláez *et al.*, 2005), y no afectar al basamento al encontrarse por encima del nivel de despegue basamento-cobertera.

Por otra parte, la alineación N-S de los epicentros sugiere también un reajuste del basamento a lo largo de una línea que

delimita el extremo oriental de la Cuenca del Guadalquivir. Es decir, la respuesta de uno de los bordes del sector ante la situación actual de esfuerzos, ya que en todo caso, la Cuenca del Guadalquivir presenta aquí características tectónicas singulares (Pérez Valera *et al.*, en prensa) que quizás permitirían diferenciarla tectónicamente.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Grupo Andaluz de Investigación “Riesgo Sísmico y Tectónica Activa”, y el proyecto de investigación CGL2011-30153-C02-02.

6. REFERENCIAS

- Akaike, H. (1974): “A new look at the statistical model identification”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **19**, 716-723.
- Galindo Zaldívar, J., A. Jabaloy, F. González Lodeiro and F. Aldaya (1997): “Crustal structure of the central sector of the Betic Cordillera (SE Spain)”. *Tectonics*, **16**, 18-37.
- García Tortosa F.J., C. Sanz de Galdeano, M. Sánchez Gómez, y P. Alfaro (2008): “Tectónica reciente en el Frente de Cabalgamiento Bético. Las deformaciones de Jimena y Bedmar (Jaén)”. *Geogaceta*, **44**, 59-62.
- Grassberger, P. and I. Procaccia (1983): “Measuring the strangeness of strange attractors”. *Physica D*, **9**, 189-208.
- Peláez, J.A., M. Sánchez Gómez y C. López Casado (2005): “La serie sísmica de Mancha Real de 1993”. *Boletín del Instituto de Estudios Giennenses*, **191**, 169-183.
- Pérez Valera, F., M. Sánchez Gómez, L.A. Pérez Valera and A. Pérez López (2011): “Kinematics of the northern Betic Cordillera from gypsum fabrics (south Spain): tectonic implications. Deformation mechanism, Rheology and Tectonics”. *DRT 2011 Meeting*, Oviedo, 2011.
- Pérez Valera, F., M. Sánchez Gómez, J.A. Peláez y L.A. Pérez Valera (en prensa): “Fallas de edad Pleistoceno superior en el entorno del terremoto de Huesa Jaén (4.4 m_{bl}, 31/01/2012): Implicaciones sismotectónicas”. *Geogaceta*, **52**.
- Ruano, P., J. Galindo Zaldívar and A. Jabaloy (2004): “Recent tectonic structures in a transect of the Central Betic Cordillera”. *Pure and Applied Geophysics*, **161**, 541-563.
- Sánchez Gómez, M., J.A. Peláez, F.J. García Tortosa, F. Torcal, P.J. Soler Núñez y M. Ureña (2008): “Aproximación geológica, geofísica y geomorfológica a la actividad tectónica en el valle del alto Guadalquivir”. *6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Tomar, Portugal, 2008.
- Scholz, C.H. (1968): “The frequency-magnitude relation of microfracturing rock and its relation to earthquakes”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**, 399-415.
- Spada, M., S. Weimer and E. Kissling (2011): “Quantifying a potential bias in probabilistic seismic hazard assessment: seismotectonic zonation with fractal properties”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**, 2694-2711.