

Parámetros focales de terremotos ibéricos a partir de la recuperación y estudio de sismogramas antiguos

Focal parameters of Iberian earthquakes through the recovery and study old seismograms

J. Batlló¹, D. Stich², R. Macià³ y J. Morales²

1 Institut Geològic de Catalunya, c. Balmes 209-211. 08006 Barcelona. jbatllo@igc.cat

2 Instituto Andaluz de Geofísica, UGR, Campus Universitario de Cartuja s/n. 18071 Granada. daniel@iag.ugr.es; morales@iag.ugr.es

3 Dept. Matemàtica Aplicada II, UPC, Pla de Palau 18. 08003 Barcelona. ramon.macia@upc.edu

Resumen: La península Ibérica es un área de sismicidad moderada. Por eso en muchas regiones no disponemos de registros modernos digitales de terremotos comparables con los históricamente ocurridos y que nos permitan un análisis a fondo las características del foco sísmico, fundamental para otros estudios posteriores. La recuperación, análisis y estudio de los registros analógicos de terremotos más antiguos se presenta en estos casos como una alternativa que extiende el período de observación y permite revisar antiguos eventos que aportan así nueva información valiosa para los fines propuestos. Esta recuperación implica el desarrollo de técnicas y metodologías que permitan pasar de los registros analógicos al estudio de las formas de ondas registradas en ellos con los métodos digitales modernos disponibles. Presentamos aquí los principales resultados obtenidos en los últimos años para algunos de los terremotos más importantes ocurridos en la península en la primera mitad del siglo XX y apuntamos las implicaciones de aquellos para el conocimiento de la sismicidad regional.

Palabras clave: sismogramas antiguos, recuperación de sismogramas, terremotos ibéricos, técnicas digitales, parámetros focales.

Abstract: *The Iberian Peninsula is an area of moderate seismicity. As a consequence, we usually do not dispose of modern digital recordings of earthquakes that are comparable in magnitude to those that have occurred historically, and that would permit an in-depth analysis of the seismic sources, fundamental for a range of subsequent studies. An alternative to this situation is the recovery, analysis and study of old analogue records of past earthquakes. In this way our period of observation can be extended significantly and new and valuable information on the topics of our interest can be retrieved. Such kind of analysis implies the development of techniques and methodologies to handle the sequence from the old analog records to the analysis of the waveforms with the modern digital tools available. The results obtained in the last years for some of the most important earthquakes occurred in the Iberian Peninsula on the first half of the XX century are presented. Also, the implication of the obtained results for the regional seismicity understanding is pointed.*

Key words: *old seismograms, seismogram recovery, Iberian earthquakes, digital techniques, faulting parameters.*

INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica ha sufrido a lo largo de su historia diversos terremotos clasificados de moderados a grandes (con epicentro en tierra y en el mar). Por este hecho, podemos considerar que la Península Ibérica presenta una peligrosidad sísmica entre moderada y elevada. Sin embargo, desde el año 1954 no se han registrado grandes terremotos (de magnitud superior a 7.0) en esta región y además en ese caso, el terremoto se localizó a 640 km de profundidad con una magnitud $M_w=7.8$. La caracterización de las zonas sismogénicas es de primordial importancia para la evaluación de la peligrosidad y el riesgo sísmico. Esta caracterización consiste actualmente tanto en la definición de la localización geográfica de dichas zonas, como en la estimación de su potencial sismogénico (esto es, conocer el terremoto máximo de dicha zona y

parámetros de fallamiento asociados a esta zona). Además, los terremotos fuertes son los que nos permiten definir mejor el estado de esfuerzos presente en una región. Por tanto, el análisis de los terremotos moderados y grandes ocurridos durante el siglo XX en la Península Ibérica permite complementar la información que ofrece la sismicidad instrumental reciente (obtenida recurriendo a modernos sismógrafos digitales). En la figura 1 se muestra la localización de los epicentros de los terremotos con magnitud aproximadamente igual o mayor que 5 ocurridos en la península Ibérica. El número total de eventos, descontadas las réplicas, no llega a 50. En la última mitad del siglo XX la Península Ibérica se ha visto afectada por dos terremotos fuertes, registrados en toda la red sismográfica mundial (WWSSN): son el terremoto del 15 de Marzo de 1964 y el terremoto del 28 de Febrero de 1969, ambos en la zona de contacto de

las placas Euroasiática y Africana en la zona Azores-Gibraltar. Los registros de estos 2 grandes terremotos se encuentran en formato analógico, pero es posible recuperar prácticamente toda la información a ellos asociada. Sin embargo, los registros conservados de los terremotos que ocurrieron en la 1ª mitad del siglo XX son mucho más escasos (la red mundial WWSSN fue instalada en la década de 1960) y su recuperación es mucho más difícil: no solo los registros se encuentran en peor estado de conservación, sino que, a veces, es difícil (si no imposible) la recuperación de algunos de los parámetros instrumentales del registro. Por este motivo su recuperación y estudio se hace difícil. Por todo esto en la última década se han desarrollado técnicas novedosas que permiten recuperar mucha de la información valiosa contenida en estos sismogramas históricos.

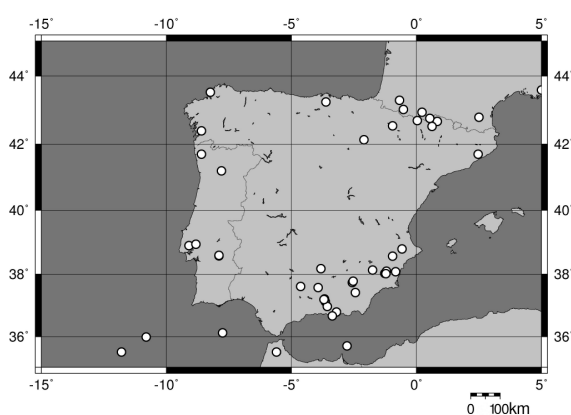


FIGURA 1. Localización de los terremotos que han afectado la península Ibérica entre los años 1900 y 1985 y con magnitud aproximadamente igual o mayor de 5. No llegan a una cincuenta de eventos y será difícil disponer de registros aceptables para el estudio de la mitad o más de ellos.

En el contexto europeo, disponemos de sismogramas en un período que cubre ya un siglo. Sin embargo, la utilización de aquellos anteriores a 1960 es muy limitada. Por una parte, se trata de documentos únicos, a veces no muy bien conservados y, por otra, se obtuvieron con instrumentos que ofrecen unas prestaciones y resolución muy reducidas respecto a los actuales estándares. A pesar de estas limitaciones, es evidente que su uso permite duplicar largamente el período de disponibilidad de datos instrumentales útiles y, asimismo, permite el análisis instrumental de terremotos únicos sucedidos en esa época. En este sentido, el proyecto EUROSEISMOS ha procurado, en los últimos años, salvaguardar en formato digital los sismogramas de los principales terremotos europeos (http://storing.ingv.it/es_web/). En la península Ibérica y como ya se ha apuntado, se da el caso que una gran parte de los terremotos instrumentales de interés, por su magnitud y efectos sobre la población, se han producido en la primera mitad del siglo XX. Por este motivo se hace aun más importante su estudio.

Los sismogramas pertenecientes a terremotos principalmente de la primera mitad del siglo XX son sin duda un patrimonio que debe y necesita ser recuperado

y analizado (no sólo en la península Ibérica) con las técnicas de tratamiento digital que se han desarrollado fundamentalmente en la última década. Su análisis, unido también al desarrollo en técnicas de computación y de digitalización y almacenamiento, permite abordar los estudios específicos y de detalle de terremotos que hasta fechas recientes se tenían por inabordables con la subsiguiente pérdida de información de sismos muy importantes como son los ocurridos en la primera mitad del siglo XX.

Además, y en el caso de la península, la obtención de parámetros de la fuente sísmica mediante la inversión del tensor momento para estos terremotos de la primera mitad del siglo XX amplía significativamente la distribución geográfica del conjunto de estos datos permitiendo sacar conclusiones sobre el campo de deformación litosférica en la región, utilizando los mecanismos focales como indicadores para la orientación de los ejes principales del campo de esfuerzos. Eso tiene su importancia especialmente para aquellas regiones donde los terremotos moderados o grandes ocurren con largos lapsos de tiempo.

METODOLOGIA

Desde hace unos años, los autores del presente trabajo, en colaboración con investigadores de otros institutos, han abordado el estudio de los principales terremotos que han afectado la península Ibérica en el período de registro instrumental anterior al despliegue de las redes de registro telemétricas y digitales, así como de las técnicas y metodologías que permitan obtener los mejores resultados para cada evento analizado.

De modo general, para cada evento a estudiar se forma una colección de boletines y otros documentos escritos sobre el terremoto. A continuación se sistematiza la información contenida en los mismos y posteriormente, esta información servirá para la caracterización de la fuente de los eventos seleccionados.

En paralelo, se forma una librería de sismogramas para cada terremoto y se rasterizan y digitalizan los sismogramas disponibles. La adquisición digital de los registros y su restitución, hasta la obtención de una forma de onda digitalizada susceptible de ser tratada con las herramientas de análisis moderno, se realiza con software desarrollado a lo largo del proyecto. Los avances informáticos han introducido cambios en la metodología; pero no han afectado a la esencia del proceso presentado en Batlló *et al.*, (1997) y Dineva *et al.*, (2002) y recientemente revisado en Batlló *et al.*, (2008a). Así, en una primera fase se obtiene una imagen digital del antiguo registro analógico mediante su pasterización. A continuación se digitalizan las trazas del terremoto seleccionado en dimensiones reales sobre la banda de registro (usualmente en milímetros). En el siguiente paso se corrigen las distorsiones indeseables introducidas en el registro por el sismógrafo como son la curvatura debida a la longitud de la pluma inscriptora,

la inclinación del registro, las irregularidades en la velocidad de registro, etc. obteniéndose una traza interpolada en coordenadas de tiempo y amplitud del registro. Finalmente, se corrige la traza para la respuesta instrumental del sismógrafo en cuestión (corrección no siempre evidente para los aparatos antiguos) y se obtiene la forma de onda en formato y condiciones adecuadas para ser tratada como un moderno sismograma adquirido con un equipo digital.

En concreto, en lo que concierne a la determinación del tensor momento, y dada la naturaleza de los terremotos analizados, nuestro análisis ha debido ceñirse a registros realizados a distancias locales y regionales. La base de la metodología utilizada para este tipo de análisis ha sido explicada por Stich *et al.*, (2003a). Pero el rango dinámico limitado de los sismógrafos, su ancho de banda y el bajo número y distancia entre las estaciones sísmicas disponibles en esa época introducen, respecto a los estudios de terremotos actuales, complicaciones muy importantes en el análisis de formas de ondas de los terremotos antiguos. El ancho de banda limitado de los registros antiguos hace que el análisis de la fuente deba basarse en períodos fácilmente perturbables por heterogeneidades estructurales de pequeña escala. En concreto, y para estabilizar el proceso de inversión que nos lleva a la obtención de información sobre el foco sísmico, hemos desarrollado una metodología que procesa directamente las componentes horizontales de los sismogramas sin rotar, en vez de la usual descomposición en componentes radial y transversal (Stich *et al.*, 2005), así reducimos las distorsiones introducidas con la rotación de pares de componentes horizontales incorrectamente alineadas, velocidades de registro irregulares y correcciones imprecisas de la respuesta instrumental.

RESULTADOS

Hasta este momento se han analizado ya los dos mayores terremotos ocurridos en la península anteriores a 1950, como son los terremotos de Benavente de 23 de Abril de 1909 y de Adra, de 10 de Junio de 1910. Además, se han obtenidos resultados definitivos para la serie de terremotos ocurridos en la provincia de Jaén en 1951 (figura 2).

En concreto, y para el terremoto de 23 de Abril de 1909, ocurrido en Benavente, cerca de Lisboa, a partir del análisis de 29 sismogramas pertenecientes a 13 observatorios europeos hallamos una magnitud momento $M_w = 6.0$, claramente menor que la magnitud de ondas superficiales ($M_s = 6.6$) anteriormente considerada para este terremoto. También hemos definido su mecanismo focal, desconocido hasta el momento, consistente en un movimiento de falla inversa bajo el bajo valle del Tajo (Stich *et al.*, 2005). A pesar de ser coherente con el conocimiento tectónico regional, no se esperaba este resultado por la falta de expresión en superficie de este sistema de falla, y puede tener implicaciones en la determinación del la peligrosidad sísmica en el área de Lisboa.

Para el terremoto de Adra del 16 de Junio de 1910, el mayor terremoto superficial de la península Ibérica en el siglo XX cuya magnitud solo tiene parangón en la zona en los terremotos de 23 de diciembre de 1993 y 4 de Enero de 1994, con $M_w=4.8$ y 4.9 respectivamente (Stich *et al.*, 2001), y a pesar de disponer solamente de doce sismogramas correspondientes a cinco estaciones, conseguimos invertir el tensor momento usando dichos sismogramas. El resultado obtenido es de un movimiento de falla de desgarre oblicua (Stich *et al.*, 2003b), que confirma otros resultados obtenidos en la zona con terremotos más recientes, y una magnitud $M_w = 6.1$. En este caso, al disponer del registro de una réplica de $M_w = 5.5$ también se pudo obtener la función temporal de la fuente y estimar parámetros como el área de ruptura y la caída de esfuerzos.

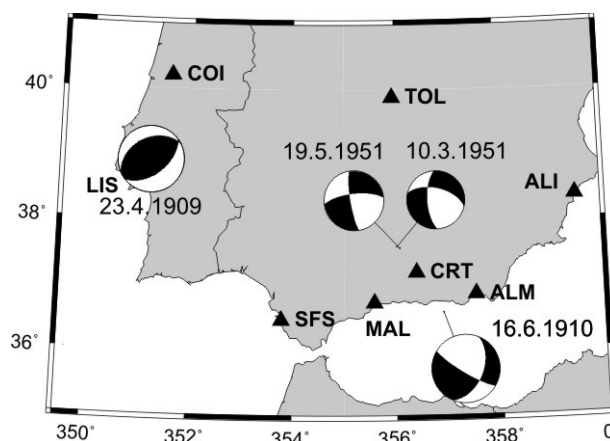


FIGURA 2. Soluciones del tensor momento para algunos terremotos relevantes del siglo XX (M_w 5.2-6.1; componente doble par en proyección al hemisferio inferior) y observatorios sísmológicos (triángulos) del sur de la península Ibérica en la era pre-digital.

Finalmente, para la serie de terremotos que afectaron la provincia de Jaén en 1951, con dos eventos principales ocurridos el 10 de Marzo (M_w 5.2) y 19 de Mayo (M_w 5.3), y un centenar de réplicas, un análisis y revisión especialmente cuidadosos de los tiempos de llegada, así como el modelado de las formas de onda, nos ha permitido confirmar que ambos eventos se localizan en la corteza inferior ($h \sim 20$ km) y a una distancia del orden de los 10 km uno del otro, tratándose de un doblete sísmico, aspectos de los que existían muchas dudas hasta el momento (Batlló *et al.*, 2008b). Asimismo, se ha podido determinar sus mecanismos focales mediante la inversión del tensor momento y la función temporal de la fuente mediante la deconvolución usando réplicas como funciones de Green.

Por tanto, se demuestra que el estudio y análisis de los sismogramas de terremotos anteriores a los años sesenta es una herramienta muy útil y que aporta resultados importantes al conocimiento sobre la magnitud real, el estilo de fallamiento, el estado de esfuerzos y la peligrosidad sísmica regional. Además, en regiones de sismicidad moderada, como la península Ibérica se convierte en la única herramienta útil para el análisis de terremotos regionales por encima de cierto

grado de magnitud, dada la ausencia de eventos recientes comparables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado mediante los proyectos CGL2005-04541-C03-01-BTE y Topo-Iberia: CSD2006-00041.

REFERENCIAS

- Batlló, J., Susagna, T. y Roca, A. (1997): A processing system for old records of regional earthquakes: Analysis of the 19th November 1923 earthquake in the Pyrenees. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 13: 149-157.
- Batlló, J., Stich, D. y Macià, R. (2008a): Quantitative análisis of Early Seismograph Recordings. En: *Historical Seismology* (J. Fréchet, M. Meghraoui and M. Stucchi, eds.), Springer Verlag, Berlin, [in press].
- Batlló, J., Stich, D., Palombo, B., Macià, R. y Morales, J. (2008b): The 1951 Mw 5.2 and 5.3 Jaén, Southern Spain, Earthquake Doublet Revisited, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98: [in press].
- Dineva, S., Batlló, J., Mihailov, D. y van Eek, T. (2002): Source parameters of four strong earthquakes in Bulgaria and Portugal at the beginning of the 20th century. *Journal of Seismology*, 6: 99-123.
- Stich, D., Alguacil, G. y Morales, J. (2001): The relative locations of multiplets in the vicinity of the Western Almeria (southern Spain) earthquake series 1993-1994. *Geophysical Journal International*, 146: 801-812.
- Stich, D., Ammon, C. J. y Morales, J. (2003a): Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region. *J. geophys. Res.*, 108: 2002JB002057.
- Stich, D., Batlló, J., Morales, J., Macià, R. y Dineva, S. (2003b): Source parameters of the 1910 Mw=6.1 Adra earthquake (southern Spain). *Geophysical Journal International*, 155: 539-546.
- Stich, D., Batlló, J., Macià, R., Teves-Costa, P y Morales, J. (2005): Using single component historical seismograms in moment tension inversion: the 1909 Lambesc (France) and Benavent (Portugal) earthquakes. *Geophysical Journal International*, 162: 850-858.