

Aproximación a la peligrosidad sísmica en la ciudad de Teruel asociada a la falla de Concud (NE España)

An approach to the seismic hazard at Teruel city associated to the Concud fault (NE Spain)

José L. Simón Gómez, Luis E. Arlegui Crespo, Lope Ezquerro Ruiz, Paloma Lafuente Tomás y Carlos L. Liesa Carrera

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.

jsimon@unizar.es, arlegui@unizar.es, lope@unizar.es, palomalt@unizar.es, carluis@unizar.es

ABSTRACT

This paper presents the results of a probabilistic seismic hazard analysis at Teruel city from seismological and geological information. The characteristic earthquake of the Concud fault ($M \approx 6.8$; recurrence period = 7.3 ± 2.7 ka) has a probability of occurrence within a 500-year period ranging from 2.3 to 26.1%. Its parameters fit precisely the magnitude-frequency pattern obtained from the historical seismicity of the Teruel and Jiloca grabens. This coherency supports an estimate of the maximum expectable seismicity within a 500-year period: $M = 5.4 \pm 0.3$. Empirical correlations indicate a potential intensity at Teruel over $I = VII$ for this earthquake, and minimum peak ground acceleration $a_p = 0.105$ g, higher than that specified by earthquake-resistant building regulations.

Key-words: Seismic hazard, characteristic earthquake, seismic acceleration, Concud fault, Teruel basin.

RESUMEN

Se presentan los resultados de un análisis probabilístico de peligrosidad sísmica en el entorno de Teruel a partir de la información geológica y sismológica. El terremoto característico de la falla de Concud ($M \approx 6,8$; periodo de retorno = $7,3 \pm 2,7$ ka) tiene una probabilidad de ocurrencia en un plazo de 500 años de entre 2,3 y 26,1 %. Sus parámetros se ajustan bien a la extrapolación de la curva frecuencia-magnitud de la sismicidad histórica en el entorno de las fosas de Teruel y Jiloca. En consecuencia, se hace una estimación de la magnitud del seísmo esperable en 500 años: $M = 5,4 \pm 0,3$. Por correlación empírica se atribuye a éste una intensidad potencial en Teruel por encima de $I = VII$, y una aceleración de pico mínima $a_p = 0,105$ g, superior a la especificada en la Norma Sismorresistente.

Palabras clave: Peligrosidad sísmica, terremoto característico, aceleración sísmica, falla de Concud, fosa de Teruel.

Geogaceta, 56 (2014), 7-10.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 31 de enero de 2014
Fecha de revisión: 29 de abril de 2014
Fecha de aceptación: 30 de mayo de 2014

Planteamiento y objetivos

En 2008, al revisarse el plan urbanístico de Teruel para recalificar los terrenos en que está proyectado construir un nuevo hospital público, sugerimos al Gobierno de Aragón que encargase un análisis de peligrosidad sísmica del emplazamiento partiendo de los estudios recientes sobre paleosismicidad en la zona. Se cuestionaba así la valoración de amenaza mínima que la Norma Sismorresistente en vigor atribuía a Teruel (aceleración esperable a 500 años $< 0,04g$), y se alertaba a la Administración acerca del peligro que supone la proximidad de la ciudad a la falla activa de Concud. Dicho análisis de peligrosidad no fue abordado en profundidad en el estudio geológico y geotécnico previo, y el proyecto del hospital, atendiendo estrictamente las prescripciones de la Norma Sismorresistente, no contempló ninguna medida antisísmica específica.

Cuando se promulgó la Norma Sismorresistente española no existía el conocimiento científico que hoy se posee sobre las fallas activas de la Península, lo que explica que no se tuviesen en cuenta las fuentes sísmicas. La comunidad científica española ha tratado de persuadir a la Administración para cambiar ese planteamiento (Capote y Martínez-Díaz, 2001), y recientemente se ha implementado una base de datos pública (García-Mayordomo *et al.*, 2010) que el Instituto Geográfico Nacional (IGN) ya ha utilizado para elaborar un nuevo mapa de peligrosidad de la Norma que parece va a ser promulgado en breve. Dentro de esta nueva perspectiva, el Gobierno de Aragón recabó el pasado año sendos informes de peligrosidad sísmica a nuestro equipo de la Universidad de Zaragoza, al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y al IGN, y ha anunciado finalmente que, a partir de esos resultados

se modificará el proyecto constructivo del hospital.

En este trabajo sintetizamos los resultados de nuestro análisis de peligrosidad teniendo en cuenta la información geológica y sísmica disponible sobre el potencial sísmico de la falla de Concud (Fig. 1). Aunque también contigua al emplazamiento, la falla de Teruel no ha sido tenida en cuenta en el cálculo por disponerse en ella de muy escasa información paleosísmica. El trabajo incluye un análisis con criterio probabilista basado en el modelo del terremoto característico (Schwartz y Coppersmith, 1984, 1986) y utilizando la información paleosísmica de la falla de Concud. Por otro lado, hacemos una estimación de la aceleración sísmica esperable en un periodo de 500 años. No incluimos ningún análisis del efecto de sitio, por lo que los resultados son extensibles a toda la ciudad de Teruel.

Consideraciones metodológicas

El cálculo probabilista puro de peligrosidad sísmica se basa en un modelo fenomenológico que no tiene en cuenta las fuentes sísmicas, que considera los seísmos como eventos independientes y distribuidos aleatoriamente en el tiempo (patrón de ocurrencia *poissoniano*). Para una región homogénea desde el punto de vista tectónico y sísmico, ello se traduce en una proporcionalidad inversa entre magnitud y logaritmo de la frecuencia (ley de Gutenberg-Richter).

La moderna geología de terremotos considera que los eventos que determinan el nivel de peligrosidad real de una región son los producidos de forma cíclica por las grandes fallas (*terremoto característico*; Schwartz y Coppersmith, 1984, 1986). La metodología paleosismológica (p. ej., Allen, 1986; McCalpin, 1996) permite estimar los parámetros básicos de dicho terremoto característico: magnitud potencial, desplazamiento cosísmico, periodo medio de retorno y tiempo transcurrido desde el último evento. La peligrosidad se expresa habitualmente como probabilidad de que ese terremoto ocurra en un determinado plazo. Para ello se tiene en cuenta la distribución de periodos intersísmicos (duración media y desviación estándar) y la edad del último evento.

En la medida en que los modelos *poissoniano* y de *terremoto característico* armonicen entre sí, la información sismológica y geológica podrá integrarse sólidamente en el cálculo de peligrosidad. Sin embargo, esto habitualmente no es así. En muchas zonas sísmicas, la magnitud y frecuencia que se obtienen para el terremoto característico a partir de la paleosismología excede claramente la proyección que se hace a partir de la curva de Gutenberg-Richter (Schwartz y Coppersmith, 1984).

En realidad, la coherencia entre ambos modelos no es algo absoluto; depende del ámbito espacial para el que se haya recopilado el catálogo sísmico. Cuanto más extensa sea la región, mayor será la frecuencia para un determinado rango de magnitudes, y mayor la probabilidad de que el punto correspondiente al terremoto característico coincida con la curva de tendencia de Gutenberg-Richter. En tal caso, puede considerarse que toda el área analizada se comporta como una zona sismotectónica homogénea con un patrón común de disipación de energía: una parte se disipa en

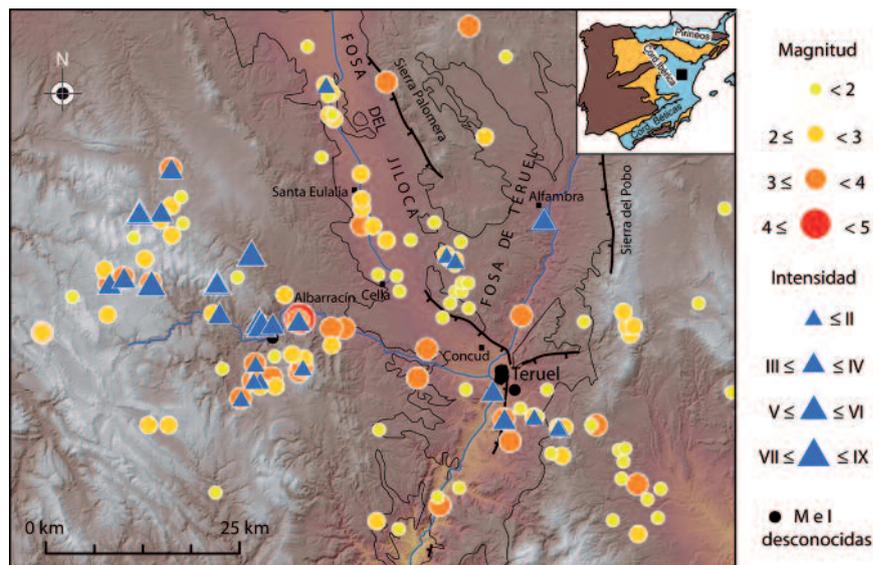


Fig. 1.- Esquema estructural y mapa de epicentros del área de Teruel (fuente: IGN). FC: falla de Concud.

Fig. 1.- Structural sketch and epicentre map of the Teruel area (source: IGN). FC: Concud fault.

múltiples movimientos sobre fallas o segmentos de falla pequeños; otra parte se invierte, muy episódicamente, en la rotura de la totalidad de una falla mayor como es la de Concud provocando su terremoto característico. Esa zona sismotectónica sería el ámbito apropiado para interpolar entre la información del registro histórico e instrumental y la paleosísmica.

Análisis de peligrosidad basado en el concepto de terremoto característico

Estudios paleosismológicos en la falla de Concud (Simón *et al.*, 2005, 2012; Lafuente *et al.*, 2010a,b; Lafuente, 2011). evidencian que ésta ha tenido una actividad reciente continuada, con tasas de movimiento de 0,08 mm/año (promedio desde el Plioceno medio) a 0,33 mm/año (Pleistoceno superior), y potencialidad para producir terremotos de magnitud $M \approx 6,8$. Se han identificado en el registro geológico al menos nueve terremotos prehistóricos de edades comprendidas entre 74,5 y 15,0 ka BP, con periodos intersísmicos de entre 4 y 11 ka, y saltos de falla asociados de 0,6 a 2,7 m. El último gran evento tendría una edad imprecisa, acotada sólo entre 15,0 ka y 3,4 ka BP. Sin embargo, el estudio (aún no publicado) de una nueva trinchera cerca del extremo sureste de la falla (La Mataueta) permite disminuir algo ese margen de incertidumbre, hasta dejarlo entre $12,8 \pm 0,7$ ka y $3,4 \pm 0,7$ ka (rango absoluto entre

13,5 ka y 2,7 ka). De acuerdo con ello, nuestro análisis de peligrosidad considera tres hipótesis distintas sobre el tiempo transcurrido desde el último evento: 13,5 ka, 8 ka (valor medio del intervalo) y 2,7 ka. Éstos, a su vez, dan lugar a tres valores diferentes para el intervalo intersísmico medio: $7,1 \pm 3,5$ ka, $7,3 \pm 2,7$ ka y $8,0 \pm 3,3$ ka, respectivamente.

Asumiendo una distribución de probabilidad normal, y considerando cada una de las tres hipótesis mencionadas, puede calcularse la probabilidad condicionada de que se produzca un seísmo equivalente al terremoto característico en un plazo de 500 años siguiendo el procedimiento propuesto por Schwartz y Coppersmith (1986). Los resultados son 26,1 %, 19,3 % y 2,3 %, respectivamente. Se observa cómo el tiempo transcurrido desde el último evento resulta ser un parámetro crítico en dicho cálculo, y que la incertidumbre que queda al respecto se traduce en una horquilla amplia de valores de probabilidad.

Cálculo de la magnitud sísmica esperable en un periodo de 500 años

La actividad sísmica histórica e instrumental ha sido compilada para el área representada en la figura 1 (datos del Instituto Geográfico Nacional contabilizados hasta diciembre de 2010). Se ha realizado el recuento de frecuencias para cada rango de magnitud (Tabla I). La frecuencia media

anual ha sido computada teniendo en cuenta el periodo de tiempo transcurrido desde que se registra el primer sismo dentro de cada rango hasta diciembre de 2010. Para terremotos históricos en los que no consta valor de magnitud, ésta ha sido estimada utilizando la correlación empírica propuesta para la región por Alfaro *et al.* (1987): $M = 0,32 I + 2,26$. La representación gráfica de estos valores de magnitud y frecuencia muestra una buena relación log-lineal (Fig. 2).

Extrapolando esa tendencia es posible estimar la magnitud esperable en un plazo de 500 años. Los márgenes de incertidumbre en que nos movemos se aprecian trazando una envolvente superior y otra inferior para los puntos representados (Fig. 2). Por otra parte, se han introducido en la misma gráfica los parámetros del terremoto característico: magnitud $M \approx 6,8$; periodo de recurrencia $\approx 7,3 \pm 2,7$ ka (valor medio considerado), que supone una frecuencia anual de 10^{-4} a $2,5 \cdot 10^{-4}$. Ese punto se sitúa próximo a la envolvente superior extrapolada, lo que sugiere la coherencia entre ambos patrones. Ello justifica la interpolación que nos permite estimar el valor esperable de magnitud sísmica en un plazo de 500 años (Fig. 2). Esta estimación arrojaría un valor de: (i) $M = 5,7$ si adoptamos la envolvente superior, coherente con el patrón paleosísmico; (ii) $M = 5,4$ usando la recta de regresión s.s.; (iii) $M = 5,2$ usando la envolvente inferior.

Cálculo de la aceleración sísmica en Teruel en un plazo de 500 años

Correlación empírica entre magnitud e intensidad

Obtener el valor esperable de aceleración sísmica en el emplazamiento estudiado requiere la estimación previa de la intensidad. La correlación entre magnitud e intensidad no es sencilla, estando condicionada por variables como la distancia al foco sísmico, propiedades de la litosfera, orientación de la trayectoria de propagación o tipo de movimiento de la falla. Se han propuesto diversas ecuaciones empíricas de correlación para distintas regiones del planeta, entre las que hemos seleccionado seis que consideramos más adecuadas para nuestra zona de estudio (Tabla II).

Algunas de las ecuaciones incluyen como variable la distancia D al foco sísmico.

Magnitud	Año inicio de cómputo	Frecuencia parcial	Frecuencia acumulada	Nº años cómputo	Frecuencia media anual	Log frecuencia anual
≥ 1	2002	31	178	9	19,8	1,30
$\geq 1,5$	1997	30	147	14	10,5	1,02
≥ 2	1967	25	117	44	2,7	0,43
$\geq 2,5$	1967	30	92	44	2,1	0,32
≥ 3	1848	25	62	163	0,38	-0,42
$\geq 3,5$	1761	30	37	250	0,15	-0,82
≥ 4	1760	7	7	251	0,028	-1,55

Tabla I.- Cómputo de frecuencias de sismos históricos e instrumentales en el área de Teruel (representados en la Fig. 1).

Table I.- Frequencies of historic and instrumental seisms in the Teruel area (represented in Fig. 1).

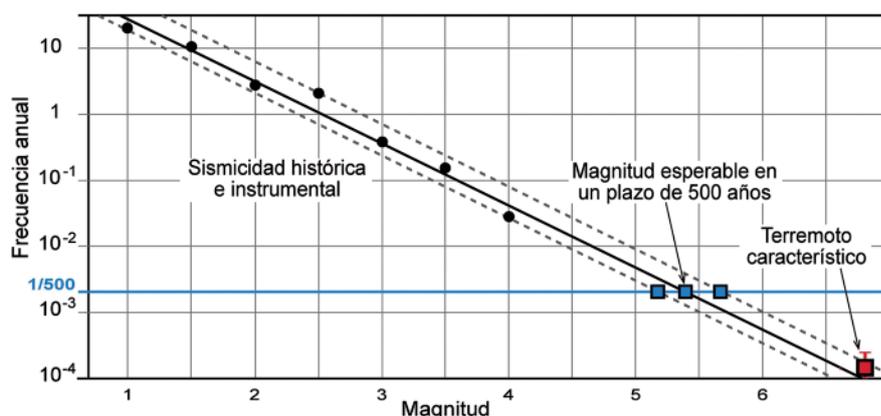


Fig. 2.- Gráfico magnitud-frecuencia para la actividad sísmica histórica e instrumental en el área de Teruel, que muestra una relación log-lineal entre ambas variables. Ese patrón se compara con los parámetros del terremoto característico de la falla de Concud, y se interpola gráficamente para obtener la magnitud del terremoto esperable en un plazo de 500 años.

Fig. 2.- Frequency-magnitude graphic for the historical and instrumental seismic activity in the area of Teruel showing a log-linear relationship. This pattern is compared with the parameters of the characteristic earthquake of the Concud fault, and it is interpolated graphically to obtain the magnitude of the expectable earthquake within 500 years.

En nuestro caso, al hallarnos junto a la falla de Concud, el peligro más relevante y probable que cabe considerar es el originado por ésta. A ella hay que atribuir el mayor terremoto potencial (terremoto característico), pero también el esperable en un plazo de 500 años. Un escenario realista para éste sería una rotura no propagada por toda la

falla, sino sólo en un segmento de longitud y profundidad limitados. El valor de D podría hallarse en un rango entre 1 y 18 km. Hemos adoptado un valor intermedio ($D = 12$ km) que reflejaría bien cualquiera de estas situaciones: (i) foco en la vertical del punto más próximo al emplazamiento y en la base de la corteza frágil, sobre el nivel de

Relación empírica	Fuente	Intensidad estimada terremoto esperable a 500 años ($M = 5,4 \pm 0,3$)
(1) $M = 0,63 I + 0,5$	Karnik (1969)	$7,6 \pm 0,5$
(2) $M = 0,42 I + 1,07 \log D + 1,49$	Munuera (1969)	$6,6 \pm 0,8$
(3) $M = 0,32 I + 2,26$	Alfaro <i>et al.</i> (1987)	$9,5 \pm 1,0$
(4) $M = 3,18 (\log D / 1,72 + I / 3,63 - 1)$	Herak (1989)	$7,4 \pm 0,4$
(5) Ábaco fig. 3	Benouar (1994)	$7,8 \pm 0,5$
(6) $M = (I + 3,29 + 0,0206 D) / 1,68$	Bakun y Wentworth (1997)	$5,4 \pm 0,6$
	Promedio	$7,4 \pm 1,5$

Tabla II.- Resultados del análisis probabilístico de peligrosidad sísmica a partir de los parámetros del terremoto característico de la falla de Concud (procedimiento propuesto por Schwartz y Coppersmith, 1986).

Table II.- Results of the probabilistic analysis of seismic hazard from the parameters of the earthquake characteristic of the Concud fault (procedure proposed by Schwartz and Coppersmith, 1986).

despegue regional en el que enraizan las fallas extensionales (Roca y Guimerà, 1992); (ii) foco superficial cerca del extremo NO de la falla de Concud; (iii) foco en una posición intermedia en distancia y profundidad.

Tomando como base ese valor de D , se han calculado las intensidades I aplicando las seis relaciones empíricas a los valores de M del terremoto de 500 años. Los resultados (expresados en sistema decimal, Tabla II) arrojan un valor promedio $I = 7,4 \pm 1,5$.

Correlación empírica entre intensidad y aceleración sísmica

La estimación de la aceleración sísmica a partir del valor promedio de intensidad debe basarse también en correlaciones empíricas. Algunas de las propuestas por diferentes autores se encuentran recogidas en la figura 3. El valor de aceleración de pico que se obtendría mediante la correlación de Richter (1958; en Trifunac y Brady, 1975), que es la utilizada por la Norma Sismorresistente en vigor, sería $a_p = 0,105$ g. El resto de curvas proporcionan valores superiores, si bien parece sensato excluir las propuestas por Wald *et al.* (1999) y Linkimer (2008) por corresponder a contextos tectónicos norte y centroamericanos muy distintos del nuestro. Considerando el resto, el valor promedio obtenido para $I = 7,4$ sería $a_p = 0,145 \pm 0,04$ g (Fig. 3).

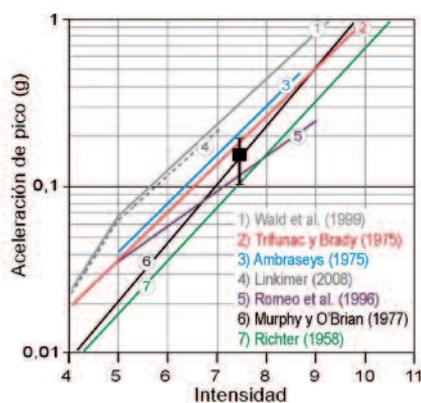


Fig. 3.- Curvas de correlación entre intensidad sísmica y aceleración de pico según diversos autores. Cuadrado negro: valor promedio de aceleración obtenido para $I = 7,4$ (terremoto esperable con un periodo de retorno de 500 años).

Fig. 3.- Correlation curves between seismic intensity and ground peak acceleration according to diverse authors. Black square: average acceleration value obtained for $I = 7.4$ (expectable 500-year earthquake).

Conclusiones

Mediante una aproximación basada en el modelo del terremoto característico, se ha definido el mayor seísmo que puede generar la falla de Concud: $M \approx 6,8$, con periodo de retorno medio de $7,3 \pm 2,7$ ka. Su probabilidad de ocurrencia en un plazo de 500 años variaría entre 2,3 % y 26,1 %, dependiendo del tiempo transcurrido desde el último evento (parámetro aún deficientemente acotado con los datos paleosísmicos disponibles).

El patrón de actividad sísmica e instrumental muestra una cierta congruencia con la actividad paleosísmica si consideramos un entorno regional suficientemente amplio alrededor de las fosas de Teruel y Jiloca. Los parámetros del terremoto característico de la falla de Concud se ajustan razonablemente a la extrapolación de la curva frecuencia-magnitud sísmica elaborada para dicho entorno. Ello permite hacer una estimación del terremoto esperable en un plazo de 500 años en la ciudad de Teruel, bajo el supuesto de que (i) corresponde a la rotura de un segmento limitado de la falla de Concud, y (ii) la distancia al foco sísmico es de 12 km. Dicho seísmo tendría una magnitud potencial $M = 5,4 \pm 0,3$, una intensidad potencial $I \approx VII$ (rango VI a IX, atribuible al emplazamiento estudiado y a todo el casco urbano de Teruel), y una aceleración de pico mínima $a_p = 0,105$ g (a_p probable: $0,145 \pm 0,04$ g). Este valor es significativamente más alto que el que especifica la Norma Sismorresistente actualmente en vigor ($a < 0,04$ g).

Agradecimientos

El trabajo está financiado por el proyecto CGL2012-35662 (Ministerio de Economía y Competitividad-FEDER). Agradecemos los comentarios de R. Pérez y de otro revisor anónimo.

Referencias

Alfaro, J.A., Casas, A.M. y Simón, J.L. (1987). *Estudios Geológicos* 43, 445-458.
 Allen, C.R. (1986). En: *Active Tectonics*. National Academy Press, Washington, 148-154.
 Ambraseys, N. (1975). *Bulletin of the European Commission of Earthquake Engineering* 4, 7-18.
 Bakun, W.H. y Wentworth, C.H. (1997). *Bulletin*

of Seismological Society of America 87, 1502-1521.
 Benouar, D. (1994). *Annali di Geofisica* 37, 529-539.
 Capote, R. y Martínez-Díaz, J.J. (2001). En: *El riesgo sísmico. Prevención y Seguro*. Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid, 1-26.
 García-Mayordomo, J., Insua, J.M., Martínez-Díaz, J.J., Jiménez, A., Álvarez, J.A., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Martín-González, F., Giner, J., Masana, E., Nemser, E.S. y Cabral, J. (2010). En: *Contribución de la Geología al Análisis de la Peligrosidad Sísmica* (J.M. Insua y F. Martín-González, Eds.), Sigüenza, 189-192.
 Herak, M. (1989). *Geofizika* 6, 13-21.
 Karnik, V. (1969). *Seismicity of the European area*. Reiding Publ. Company, Dordrecht, parte I, 364 p.
 Lafuente, P. (2011). *Tectónica activa y paleosismicidad de la falla de Concud (Cordillera Ibérica central)*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 253 p.
 Lafuente, P., Arlegui, L.E., Liesa, C.L. y Simón, J.L. (2010a). *International Journal of Earth Sciences* 100, 1713-1732.
 Lafuente, P., Arlegui, L.E., Liesa, C.L. y Simón, J.L. (2010b). En: *Contribución de la Geología al Análisis de la Peligrosidad Sísmica* (J.M. Insua y F. Martín-González, Eds.), Sigüenza, 67-70.
 Linkimer, L. (2008). *Revista Geológica de América Central* 38, 81-94.
 McCalpin, J. (1996). *Paleoseismology*. Academic Press, London, 588 p.
 Munuera, J.M. (1969). *El mapa de zonas sísmicas generalizadas de la Península Ibérica*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 50 p.
 Murphy J.R. y O'Brien, L.J. (1977). *Bulletin of the Seismological Society of America* 67, 877-915.
 Roca, E. y Guimerà, J. (1992). *Tectonophysics* 203, 203-218.
 Romeo, R.W., Tranfaglia, G. y Castenetto, S. (1996). En: *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1466, Elsevier.
 Schwartz, D.P. y Coppersmith, K.J. (1984). *Journal of Geophysical Research* 89, 5681-5698.
 Schwartz, D.P. y Coppersmith, K.J. (1986). En: *Active Tectonics* (R.E. Wallace, Ed.), National Academy Press, Washington, 215-230.
 Simón, J.L., Lafuente, P., Arlegui, L.E., Liesa, C.L. y Soriano, M.A. (2005). *Geogaceta* 38, 63-66.
 Simón, J.L., Arlegui, L.E., Lafuente, P. y Liesa, C.L. (2012). *Journal of Iberian Geology* 38, 127-144.
 Trifunac, M. y Brady, A.G. (1975). *Bulletin of the Seismological Society of America* 65, 139-162.
 Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. y Kanamori, H. (1999). *Earthquake Spectra* 15, 557-564.
 Wells, D.L. y Coppersmith, K.J. (1994). *Bulletin of the Seismological Society of America* 84, 974-1002.