

# PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA



**Autores: M.J. Crespo<sup>1</sup>, F. Martínez<sup>1</sup> y J. Martí<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> PRINCIPIA Ingenieros Consultores, [principia@principia.es](mailto:principia@principia.es)

## RESUMEN

Se estudia la peligrosidad sísmica en la Península Ibérica con una metodología no paramétrica basada en estimadores de densidad kernel; la tasa de actividad se deduce del catálogo, tanto en cuanto a su dependencia espacial (prescindiendo de zonificación) como en relación con la magnitud (obviando la ley de Gutenberg-Richter). El catálogo es el del Instituto Geográfico Nacional, complementado con otros en zonas periféricas, homogeneizado en su cuantificación de los terremotos y eliminando eventos espacial o temporalmente interrelacionados para mantener un modelo temporal de Poisson.

La tasa de actividad sísmica viene determinada por la función kernel, el ancho de banda y los períodos efectivos. La tasa resultante se compara con la obtenida usando estadísticas de Gutenberg-Richter y una metodología zonificada. Se han empleado tres leyes de atenuación: una para terremotos profundos y dos para terremotos superficiales, dependiendo de que su magnitud fuera superior o inferior a 5.

Los resultados se presentan en forma de mapas de peligrosidad para diversas frecuencias espectrales y períodos de retorno de 475 y 2475 años, lo que permite construir espectros de peligrosidad uniforme.

*Palabras clave: peligrosidad sísmica, Península Ibérica, kernel*

## SUMMARY

The seismic hazard of the Iberian Peninsula is analysed using a non-parametric methodology based on statistical kernel functions; the activity rate is derived from the catalogue data, both its spatial dependence (without a seismogenetic zonation) and its magnitude dependence (without using Gutenberg-Richter's law). The catalogue is that of the Instituto Geográfico Nacional, supplemented with other catalogues around the periphery; the quantification of events has been homogenised and spatially or temporally interrelated events have been suppressed to assume a Poisson process.

The activity rate is determined by the kernel function, the bandwidth and the effective periods. The resulting rate is compared with that produced using Gutenberg-Richter statistics and a zoned approach. Three attenuation laws have been employed, one for deep sources and two for shallower events, depending on whether their magnitude was above or below 5.

The results are presented as seismic hazard maps for different spectral frequencies and for return periods of 475 and 2475 years, which allows constructing uniform hazard spectra.

*Keywords: seismic hazard, Iberian Peninsula, kernel*

## Introducción

El diseño sísmico de una estructura requiere definir una acción sísmica adecuada para el emplazamiento. En España la información más reciente de carácter global es el mapa de peligrosidad de la Norma de Construcción Sismorresistente Española NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2003), elaborado hace una decena de años.

La evaluación de la peligrosidad sísmica ha experimentado numerosos avances en este período:

- Existen nuevos métodos de cálculo que no precisan delinear zonas sismogénicas.
- El catálogo ofrece datos sobre distintas medidas de magnitud y sobre cuantificación de incertidumbres, que los nuevos métodos permiten incorporar al análisis.
- Los modelos de atenuación disponibles han crecido en cantidad y calidad, y hay estudios que tratan de ordenar toda esta información y orientar en su uso.

En paralelo, el diseño sísmico de estructuras también ha ido evolucionando:

- Las necesidades: los datos se necesitan en zonas distintas de los grandes centros urbanos, como pueden ser zonas marítimas o costeras.
- La caracterización de la acción sísmica, más allá de la máxima intensidad sentida o la aceleración pico del terreno.
- Los niveles de probabilidad para los que se desea proyectar.

En consecuencia parece apropiado reevaluar la peligrosidad sísmica en la Península Ibérica, aprovechando los recientes avances y poniéndolos a disposición de las necesidades ingenieriles actuales.

## Metodología

La construcción de la tasa de actividad sísmica está inspirada en la estimación de densidad no paramétrica (Silverman, 1986; Vere-Jones, 1992). La estimación mediante funciones kernel se define:

$$f_k(\mathbf{x}) = \frac{1}{nH^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{X}_i}{H}\right) \quad (1)$$

donde:  $n$  es el número de eventos de la muestra estadística

$H$  es el ancho de banda

$K$  es una función kernel

$\mathbf{X}_i$  es el vector de posición del evento  $i$

Si la muestra la constituyen los terremotos de un catálogo, la transformación de este estimador kernel en una tasa de actividad sísmica, que proporcione un número de eventos por unidad de área y unidad de tiempo, se logra (Woo, 1996a):

- Eliminando la normalización con el número de eventos  $n$
- Dividiendo la contribución de cada función kernel por un período efectivo  $T(\mathbf{X}_i)$

El resultado se concreta en la expresión de la tasa de actividad sísmica  $\lambda_k$ :

$$\lambda_k(\mathbf{x}, M) = \frac{1}{H(M)^2} \sum_{i=1}^n \frac{K\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{X}_i}{H(M)}\right)}{T(\mathbf{X}_i)} \quad (2)$$

Se trata de un sumatorio de funciones kernel situadas sobre cada evento del catálogo, ponderadas con un período efectivo  $T(\mathbf{X}_i)$ ; el resultado depende de la posición y la magnitud

de forma continua pero no predefinida. El ancho de banda  $H(M_w)$  depende de la magnitud.

## Catálogo Sísmico

La base de datos del IGN ha sido la principal fuente de información, aunque para algunas zonas como el noreste de España se debe contar con la sismicidad de áreas sólo parcialmente cubiertas por este catálogo. El catálogo del IGN se ha complementado aquí con datos provenientes de dos instituciones internacionales (USGS y ISC), catálogos de países vecinos (BRGM, 2010; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004) y publicaciones descriptivas de la sismicidad de países vecinos (Vilanova et al, 2002; Peláez et al, 2007).

La homogeneización del catálogo se ha realizado en términos de magnitud momento  $M_w$ . Desde 2002 el IGN ha asignado este tipo de magnitud a algunos terremotos, además de la tradicional  $m_b$  o  $m_{bLg}$ , lo que ha permitido al propio IGN desarrollar correlaciones intensidad-magnitud y magnitudes  $m_b$ - $M_w$  o  $m_{bLg}$ - $M_w$  (Cabañas, 2010).

Se han eliminado los eventos dependientes con la metodología clásica de posicionar una ventana espacio-temporal alrededor de los eventos principales (Gardner y Knopoff, 1974), modificada para evitar reconsiderar el evento principal. Las dimensiones de la ventana dependen de la magnitud momento  $M_w$  según la propuesta de Peláez et al (2007). Como resultado, un 36% de los eventos fue desestimado como eventos dependientes.

Se ha incorporado la información del catálogo sobre incertidumbres relativas a la magnitud y posición del epicentro, estimando esos datos cuando el catálogo no los ofrece. En el caso de eventos para los que se ha empleado una de las correlaciones anteriores, dicha correlación se ha tenido en cuenta al cuantificar la incertidumbre.

## Modelo de Atenuación

Al elegir un modelo de atenuación, lo ideal es contar con uno elaborado a partir de datos específicos de la zona. Esto es raramente factible en zonas de sismicidad media o baja, como es el caso de la Península Ibérica.

Recientemente se han publicado recomendaciones para adoptar o descartar modelos de atenuación: Cotton et al (2006) propusieron siete criterios, difíciles de satisfacer en su totalidad; Bommer et al (2010) los reformularon y ampliaron a diez, que se han intentado respetar aquí al seleccionar modelos de atenuación para los terremotos superficiales.

La mayoría de los modelos de atenuación filtran la base de datos con terremotos de magnitud  $M_w$  superior a 5, lo que sólo deja un pequeño porcentaje de eventos en zonas de sismicidad media-baja. Bommer et al (2007) alertan sobre el empleo de leyes de atenuación fuera de su rango de soporte y presentan un estudio preliminar de atenuación de bajas magnitudes, con resultados afines a los de Bragatto y Slejko (2005).

En el presente trabajo se han adoptado tres modelos de atenuación:

- los terremotos superficiales con magnitud  $M_w$  superior a 5,0 se atenúan con el modelo de Ambraseys et al (2005);
- los terremotos superficiales con magnitud  $M_w$  inferior o igual a 5,0 se atenúan con el modelo de Bragatto y Slejko (2005);
- los terremotos profundos se atenúan con el modelo de Youngs et al (1997).

Hay muy pocas leyes de atenuación para terremotos profundos, normalmente para zonas de subducción. Se conoce por tanto la sismicidad asociada a terremotos de una cierta profundidad, que no deberían atenuarse como los sismos corticales; pero que tampoco se identifican de forma clara con una zona de subducción que justifique aplicarles un modelo de

atenuación específico. Descartada la opción de atenuarlos con un modelo superficial, las alternativas son ignorarlos o atenuarlos con alguno de los modelos disponibles, a pesar de las incertidumbres en cuanto al esquema tectónico. Aquí se ha optado por el de Youngs et al (1997), que es el que mejor parece cumplir las indicaciones de Bommer et al (2010).

Seleccionadas las leyes, deben armonizarse las medidas de distancia y magnitud, así como el movimiento del suelo que proporcionan. Para ello, además de las descripciones que los autores dan de los parámetros, se han considerado las sugerencias de Beyer y Bommer (2006). Se supone un suelo con velocidad de ondas de cortante en sus primeros 30 m entre 360 m/s y 750 m/s, correspondiente aproximadamente a un suelo tipo II de la NCSE-02.

### Actividad Sísmica

La actividad sísmica se calcula de acuerdo con la ecuación (2). La función kernel empleada es la denominada *Inverse Bi-Quadratic* (IBQ), que es la inicialmente recomendada por Woo (1996a, b). El ancho de banda  $H(M_w)$  depende de la magnitud  $M_w$  según:

$$H(M_w) = c \exp(dM_w) \quad (3)$$

donde  $c$  y  $d$  son parámetros a ajustar en cada cálculo.

La relación entre  $H$  y  $M_w$ , recomendada por Woo (1996a), proviene de la correlación logarítmica habitual entre magnitud y otros parámetros sísmicos. Para determinar  $c$  y  $d$  se agrupan los sismos por niveles de magnitud y a cada nivel se le asigna un ancho de banda, que es la media de las mínimas distancias entre terremotos de igual magnitud. Este esquema ha sido empleado ya con éxito en el pasado (Crespo y Martí, 2002; Crespo et al, 2003, 2007), tras conversaciones con Woo (2000). La determinación de los parámetros  $c$  y  $d$  se hizo de forma independiente para terremotos superficiales y profundos.

Para el cálculo de los períodos efectivos, se ha distinguido entre terremotos superficiales, con epicentro terrestre o marino, y terremotos profundos. La Tabla 1 muestra los años de referencia considerados. Una vez definidos la función kernel  $K(\mathbf{x})$ , el ancho de banda  $H(M_w)$  y los períodos efectivos  $T(\mathbf{x}_i)$ , se dispone de todos los elementos para calcular la tasa de actividad de acuerdo con la expresión (2); el resultado depende de la posición espacial y la magnitud, como puede verse en el ejemplo de la Figura 1.

Tabla 1 Años de referencia

Magnitud $M_w$	superficiales		profundos
	terrestres	marinos	
>7,7	800	1595	--
7,2 – 7,7	900	1620	--
6,6 - 7,1	1000	1645	--
6,0 - 6,5	1155	1670	1930
5,4 - 5,9	1478	1796	1930
4,8 - 5,3	1735	1821	1930
4,2 - 4,7	1787	1842	--
3,6 - 4,1	1838	1849	--
3,0 - 3,5	1940	1948	--

Fijado un nivel de magnitud, se puede representar la variación espacial de esta función dando el número de terremotos con  $M_w > 5$  por unidad de área y tiempo; y fijado un punto concreto del espacio, puede darse la variación de  $\lambda_k$  con la magnitud para el punto marcado con una cruz. Esta segunda gráfica equivale, a salvo de un factor de superficie, a la tasa de actividad tradicional de la ley de Gutenberg-Richter.

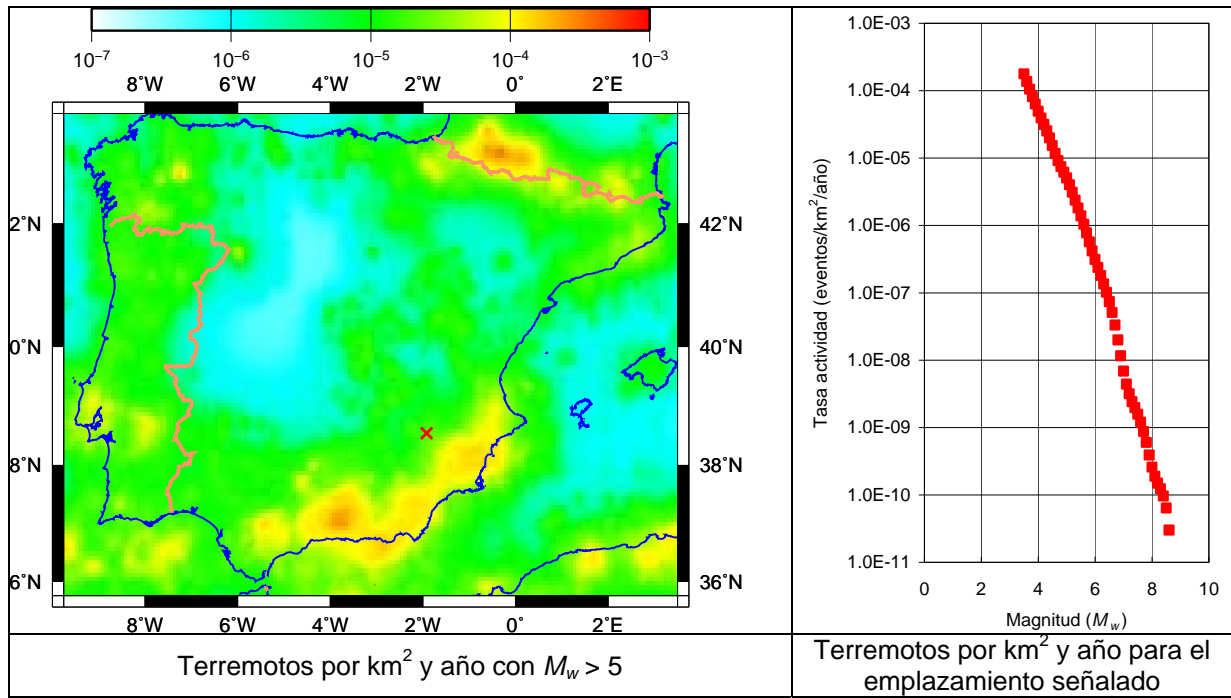


Figura 1 Tasa de actividad sísmica

## Resultados

La aceleración pico del terreno (PGA) se muestra sobre un área rectangular que cubre toda la Península Ibérica para períodos de retorno de 475 (Figura 2) y 2475 años (Figura 3).

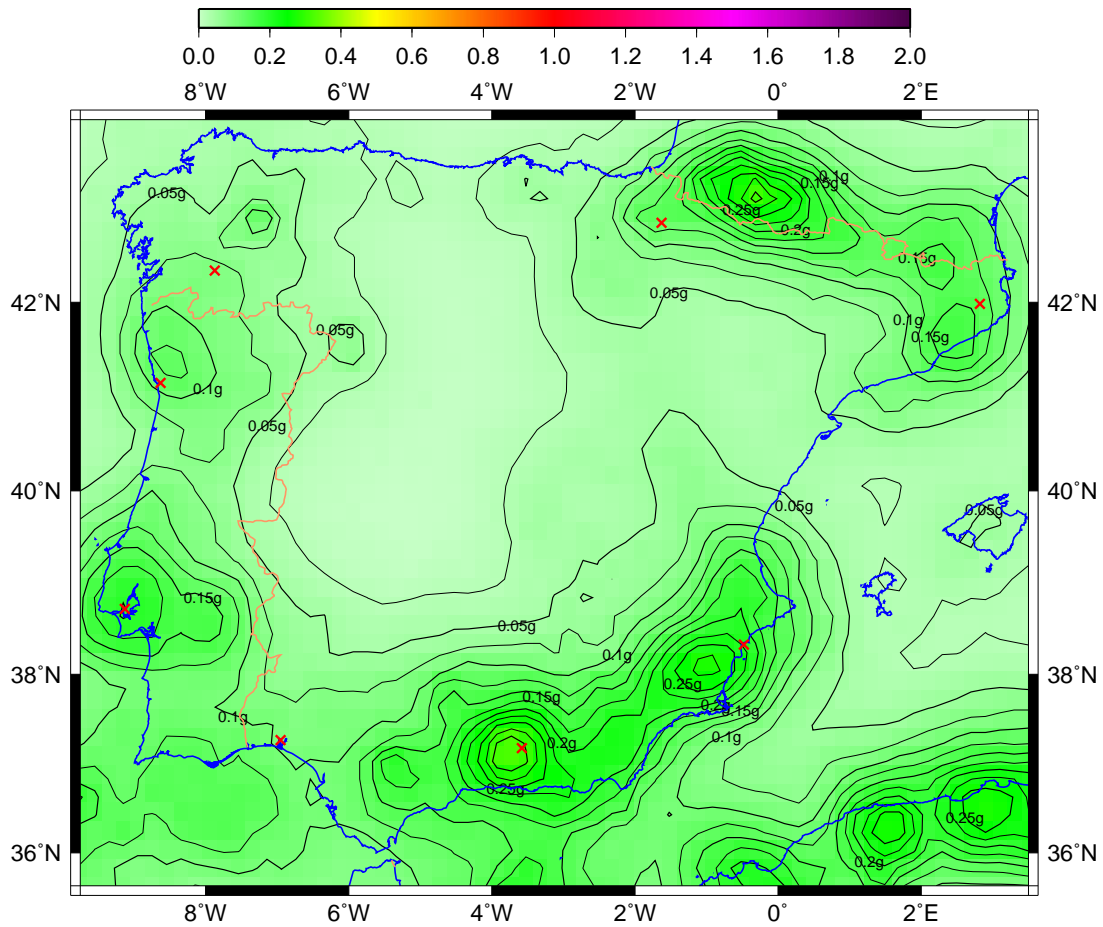


Figura 2 PGA para La Península Ibérica y 475 años

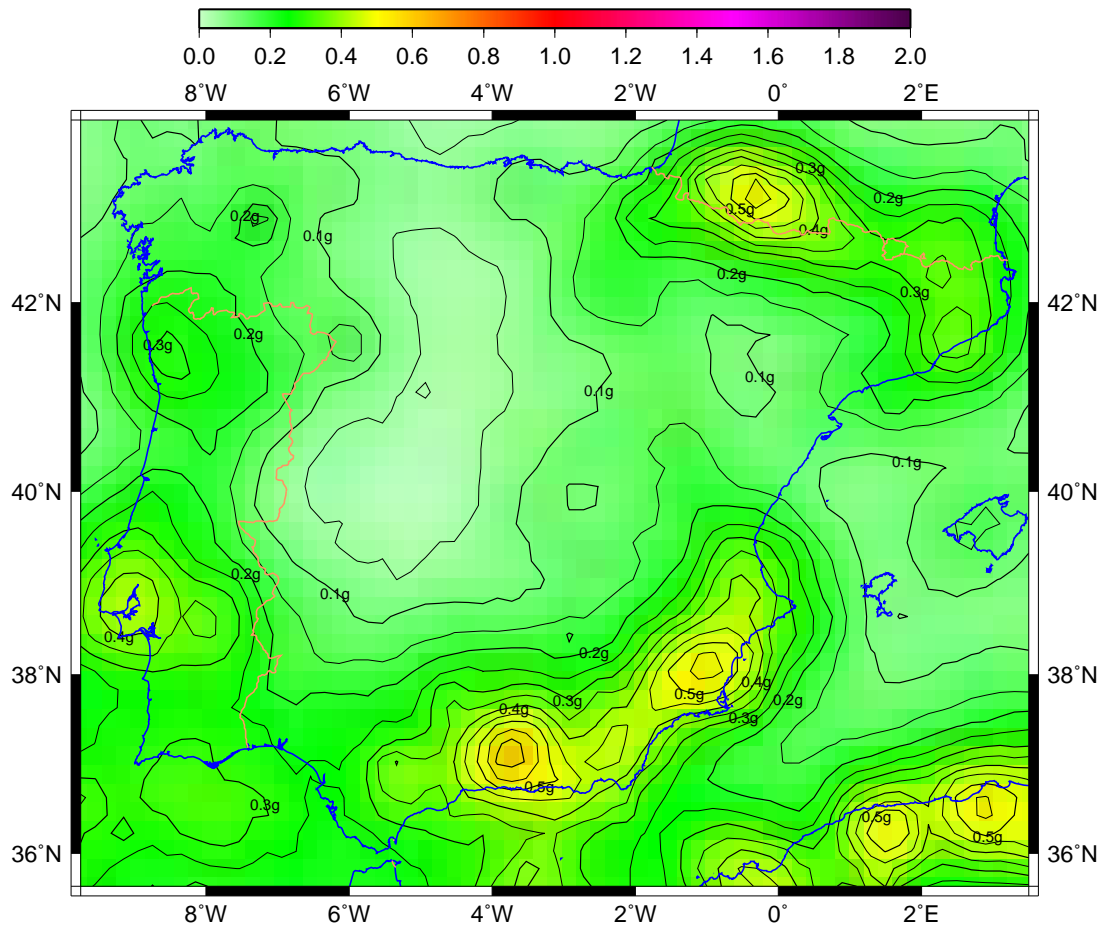


Figura 3 PGA para La Península Ibérica y 2475 años

Las zonas con mayor nivel de aceleración son Granada y la vertiente francesa del Pirineo Central, donde se alcanza 0,30g, y el Sur de Alicante con 0,27g. Estos resultados son coherentes con la tasa de actividad mostrada en la Figura 1. La PGA para 475 años coincide en general con la obtenida en estudios recientes de carácter local (Benito et al, 2010; Secanell et al, 2008) o es ligeramente superior. Este tipo de comparaciones debe tener siempre presente la medida de aceleración y tipo de terreno considerados.

En la zona sur de Alicante los valores obtenidos superan a los resultados regionales obtenidos con metodologías zonificadas (Benito et al, 2007; García-Mayordomo, 2005), pero concuerdan con los generados por Peláez (1999) usando una variante de la metodología no zonificada de Frankel (1995).

Las PGA para un período de retorno de 2475 años resultan ser aproximadamente el doble de las correspondientes a 475 años, que es la relación esperable utilizando la fórmula que da la NCSE para comparar distintos períodos. Aunque 2475 años es un período cada vez más utilizado en normativa, lo que motivó su consideración en el presente trabajo, no se han encontrado estudios de peligrosidad con los que comparar los resultados obtenidos.

## Conclusiones

Los avances metodológicos en la evaluación de la peligrosidad sísmica y la evolución de las demandas de información que el diseño sísmico genera, han llevado a reanalizar la peligrosidad en La Península Ibérica.

Para ello se ha utilizado una metodología caracterizada por:

- Se usa una tasa de actividad no parametrizada, basada en estimadores de

- densidad kernel, que varía de forma continua con la posición y la magnitud.
- No se precisa delinear las fuentes sismogénicas, eliminando así una fuente importante de subjetividad.
  - Se incorporan las incertidumbres relativas a posición y magnitud de cada terremoto.

El catálogo sísmico está constituido en su mayor parte por la base de datos del IGN, complementada con otras bases de datos para algunas zonas periféricas, especialmente las relevantes para el estudio del noreste de La Península.

Dada la predominancia de terremotos de magnitud moderada-baja, el modelo de atenuación elaborado combina tres leyes de recientes, que se aplican sólo en su rango de soporte; se diferencian terremotos superficiales y profundos y entre los primeros los de magnitud superior o inferior a 5.

La tasa de actividad presenta una variación continua con la posición, coherente con la sismicidad local, y con la magnitud, similar a la del modelo de Gutenberg-Richter aunque difiera algo de la linealidad de este modelo.

Los niveles de aceleración para PGA y 475 años son similares o ligeramente superiores a los obtenidos en estudios recientes. Destaca la zona sur de Alicante, donde se calculan valores significativamente mayores a los obtenidos con metodologías zonificadas, aunque son coherentes con los publicados usando otra metodología no zonificada.

Se ofrecen valores de PGA para 2475 años, que es un período de retorno cada vez más empleado en diseño sísmico; los resultados están dentro del rango esperado.

#### Referencias:

- Ambraseys, N.N., J. Douglas, S.K. Sarma, y P.M. Smith (2005) "Equations for the Estimation of Strong Ground Motion from Shallow Crustal Earthquakes using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration." *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 3.
- Benito, M.B., J. Gaspar, J. García, M.J. Jiménez, y M.E. García (2006) "Riesgo Sísmico en la Región de Murcia. RISMUR. Volumen 1: Evaluación de la Peligrosidad Sísmica." Informe Técnico, Protección Civil.
- Benito, M.B., M. Navarro, F. Vidal, J. Gaspar-Escribano, M.J. García-Rodríguez, y J.M. Martínez-Solares (2010) "A New Seismic Hazard Assessment in the Region of Andalusia (Southern Spain)." *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 98, 739–766.
- Beyer, K. y J. Bommer (2006) "Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion." *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96.
- Bommer, J.J., P.J. Stafford, J.E. Alarcón y S. Akkar (2007) "The Influence of Magnitude Range on Empirical Ground Motion Prediction." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, pp. 2152–2170.
- Bommer, J.J., J. Douglas, F. Scherbaum, F. Cotton, H. Bungum, y D. Fäh (2010) "On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis." *Seismological Research Letters*, vol. 81, pp. 783–793.
- Bragatto, P.L. y D. Slejko (2005) "Empirical Ground-Motion Attenuation Relations for the Eastern Alps in the Magnitude Range 2.5-6.0." *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 95, pp. 252–276.
- BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2010) "Base de Données SISFRANCE." <http://www.sisfrance.net>.
- Cabañas, L. (2010). Comunicación personal, Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Cotton, F., F. Scherbaum, J.J. Bommer, y H. Bungum (2006) "Criteria for Selecting

and Adjusting Ground-Motion Models for Specific Target Applications: Applications to Central Europe and Rock Sites.” *Journal of Seismology*, vol. 6, pp. 137–156.

- Crespo, M.J. y J. Martí (2002) “The Use of a Zoneless Method in Four LNG Sites in Spain.” 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londres.
- Crespo, M.J., J. Martí, y F. Martínez (2003) “Metodología con y sin Zonas para 5 Emplazamientos y Comparación con la NCSE.” 2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Málaga.
- Crespo, M.J., J. Martí, y F. Martínez (2007) “Peligrosidad Sísmica en la Zona Central del Archipiélago Canario.” 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Gerona.
- Frankel, A. (1995) “Mapping Seismic Hazard in the Central United States.” *Seismological Research Letters*, vol. 66.
- García-Mayordomo, J. (2005) “Caracterización y Análisis de la Peligrosidad Sísmica en el Sureste de España.” Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Gardner, J.K. y L. Knopoff (1974) “Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 64, pp. 1363–1367.
- Gruppo di Lavoro CPTI (2004) “Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani.” versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna.
- Ministerio de Fomento (2003) “Norma de Construcción Sismorresistente Española. NCSE-02.”
- Peláez, J.A. (1999) “Agregación y Desagregación de Aceleraciones Esperadas en la Península Ibérica Utilizando Sismicidad de Fondo” Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.
- Peláez, J.A., M. Chourak, B.A. Tadili, L. Ait Brahim, M. Hamdache, C. López Casado, y J.M. Martínez Solares (2007) “A Catalog of Major Moroccan Earthquakes from 1045 to 2005.” *Seismological Research Letters*, vol. 78.
- Secanell, R., D. Bertil, C. Martin, X. Goula, T. Susagna, M. Tapia, P. Dominique, D. Carbon, y J. Fleta (2008), “Probabilistic Seismic Hazard Assessment of the Pyrenean Region.” *Journal of Seismology*, vol. 12.
- Silverman, B.W. (1986) “Density Estimation for Statistics and Data Analysis”, volume 26 of *Monographs on Statistics and Applied Probability*, Chapman and Hall.
- Vere-Jones, D. (1992) “Statistical Methods for the Description and Display of Earthquake Catalogs.” In *Statistics in the Environmental and Earth Sciences*, pp. 220–246, Arnold Publishers.
- Vilanova, S.P. y J.F.B.D. Fonseca (2002) “Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Portugal.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 97, pp. 1702–1717.
- Youngs, R.R., S.J. Chiou, W.A. Silva, y J.R. Humphrey (1997) “Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes.” *Seismological Research Letters*, vol. 68.
- Woo, G. (1996a) “Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Modelling.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 86.
- Woo, G. (1996b) “Seismic Hazard Program: KERFRAC. Program Documentation.”
- Woo, G. (2000) Comunicación personal.