



Metodologías aplicadas a las Ciencias de la Tierra

Ignacio Mora Gozález
Coordinador

Metodologías aplicadas a las ciencias de la Tierra

Ignacio Mora González
Coordinador



Metodologías aplicadas a las Ciencias de la Tierra

Coordinador

Ignacio Mora González

Primera Edición, 2015

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, bajo cualquier medio, electrónico o mecánico, sin la autorización por escrito de los titulares de la misma.

D. R. © Ignacio Mora González

© IETEC Editores

Av. Adolfo Ruiz Cortines No. 511

Col. Francisco Ferrer Guardia. C.P. 91020

Xalapa, Veracruz, México

Edimpa.arana@hotmail.com

Fotografía de la Portada: Sergio R. Rodríguez Elizarrarás

Compilación y edición: Irma Hernández Contreras

Captura y apoyo técnico: Clara Martínez Mora

ISBN: 978-607-9091-49-1

Impreso en México

ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO DE BARCELONA Y SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LA CIUDAD

Armando Aguilar
Luis G. Pujades
Alex Barbat,
Mario G. Ordaz
Nieves Lantada

Resumen

En el presente trabajo se describen los principales pasos empleados en la estimación probabilista del peligro sísmico de Barcelona, y se menciona cómo dicho peligro sísmico fue utilizado en la estimación probabilista del riesgo sísmico de la ciudad. Para fines comparativos, se estimó el peligro sísmico de Barcelona tanto en términos de tasas de excedencia de intensidades macrosísmicas, como en términos de tasas de excedencia de la aceleración máxima del terreno (PGA). En la estimación del peligro sísmico se empleó el código de cómputo CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008), el cual se basa en la metodología propuesta por Cornell (1968) y Esteva (1970). Dicho código incorpora valiosas herramientas que permiten hacer estimaciones del peligro sísmico, con un importante nivel de detalle. Además, el CRISIS2008 permite obtener resultados de peligro sísmico tanto en términos de tasas de excedencia versus PGA, como en términos de tasas de excedencia versus intensidades macrosísmicas. De acuerdo con los resultados, en Barcelona el valor de PGA igual a 85 cm/s^2 , tiene en promedio un periodo de retorno de 475 años. Mientras que los resultados obtenidos en términos de intensidades macrosísmicas, indican que la intensidad macrosísmica que tiene en promedio un periodo de retorno de 475 años, corresponde a un valor entre VI y VII. Las curvas de peligro sísmico en términos de tasas de excedencia versus intensidades macrosísmicas, se obtuvieron para ser empleadas en la estimación del riesgo sísmico de la ciudad mediante el método probabilista de índices de vulnerabilidad (Aguilar, 2011). De acuerdo con los resultados, en la ciudad hay edificios con un alto nivel de riesgo sísmico, esto último se debe a que a pesar de que Barcelona está ubicada en una zona de sismicidad entre baja a moderada, existe un porcentaje importante de edificios con niveles significativamente altos de vulnerabilidad sísmica. Las curvas de riesgo sísmico obtenidas se expresan en términos de frecuencias de excedencia versus grados de daño sísmico.

Abstrac

In this document the main steps used to estimate the probabilistic seismic hazard of Barcelona are described. Additionally, it is mentioned a procedure to use the seismic hazard results to estimate the seismic risk of the buildings of Barcelona. For comparative purposes, the seismic hazard of Barcelona is assessed using two procedures: 1) the seismic hazard is assessed considering the seismicity of the seismic sources in terms of macroseismic intensities, and attenuation laws in terms of macroseismic intensities, 2) the seismic hazard curves in terms of macroseismic intensities versus exceedance rates, are obtained through a transformation of the seismic hazard results available in terms of PGA versus exceedances

rates. The code CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008) was used to estimate the seismic hazard. This code is a versatile tool because it allows taking into account an important number of considerations to estimate the seismic hazard. On the other hand, the CRISIS2008 code allows obtaining seismic hazard results in terms of exceedance rates versus PGA, or in terms of exceedance rates versus macroseismic intensities. According to the results, in Barcelona the value of 85 cm/s² of PGA has in average a return period of 475 years. On the other hand, the seismic hazard results in terms of macroseismic intensities show that in Barcelona the macroseismic intensity that has a return period of 475 years is a value between VI and VII. The seismic hazard results were used to estimate the seismic risk of the buildings of Barcelona according to the probabilistic version of the vulnerability index methodology (Aguilar, 2011). According to the results, in Barcelona there are buildings with high levels of seismic risk. These kinds of results are explained due to the combination of buildings with high levels of seismic vulnerability located in places with moderate seismic hazard. The seismic risk obtained is expressed in terms of frequencies of exceedance versus seismic damage grades.

Introducción

Actualmente existen diversas metodologías para estimar el riesgo sísmico de edificios a escala urbana. Una de ellas fue recientemente propuesta y se conoce como metodología probabilista de índices de vulnerabilidad (Aguilar, 2011). En dicho método se considera tanto el peligro sísmico como la vulnerabilidad sísmica, para estimar el riesgo sísmico de edificios. Particularmente, el peligro sísmico o la amenaza sísmica se expresa en términos de frecuencias de excedencia de intensidades macrosísmicas. En el presente trabajo se describe el procedimiento y los principales resultados obtenidos al estimar el peligro sísmico de Barcelona, con la finalidad de emplear tales resultados de peligro en la estimación del riesgo sísmico de los edificios residenciales de Barcelona. Para tal fin, se analizan dos procedimientos: en el primero las curvas de tasas de excedencia de intensidades macrosísmicas se obtienen directamente, es decir, el peligro sísmico se estima a partir de datos de sismicidad de las fuentes sísmicas en términos de intensidades macrosísmicas y mediante el empleo de leyes de atenuación de intensidades macrosísmicas. Mientras que en el segundo procedimiento, las curvas de peligro sísmico en términos de intensidades macrosísmicas, se obtienen al transformar resultados de peligro sísmico obtenidos en términos de tasas de excedencia de la aceleración máxima del terreno (PGA). El primer procedimiento es el más recomendable para estimar la peligrosidad sísmica, requerida en el método probabilista de índices de vulnerabilidad para estimar el riesgo sísmico de edificios. Sin embargo, el segundo procedimiento se considera en el presente trabajo para fines de comparación, y porque este procedimiento incluye consideraciones que pueden tomarse en cuenta, en las regiones en las que los estudios de peligrosidad sísmica disponibles, están en términos de PGA.

Peligro sísmico en Barcelona

La ciudad de Barcelona está situada en el noreste de la península Ibérica que suele considerarse como una microplaca que forma parte de la placa euroasiática, actuando de rótula en la interacción entre las placas Euroasiática y la Africana (Casas-Sainz y De Vicente, 2009; Rosenbaum et al, 2002; Jabaloy et al, 2002). Por otra parte, la distancia más cercana desde Barcelona a los bordes de la placa Euroasiática con la placa Africana, es de más de 500 kilómetros. De manera que la sismicidad que tiene mayor efecto sobre Barcelona, no es la que se produce en los límites de dichas placas tectónicas, sino la que se genera en el interior de la placa Euroasiática. Es importante destacar que se ha estimado que en el Cretácico temprano – Hauteriviano (hace aproximadamente 135 millones de años), la península Ibérica constituía una sola placa tectónica (Casas-Sainz y De Vicente, 2009; Jabaloy et al, 2002).

En la Figura 1 se muestran los epicentros de sismos de intensidades mayores o iguales a V, ocurridos entre los años 1152 y 1998, en la región de Cataluña y zonas aledañas. Tales sismos son relevantes porque se considera que a partir del grado de intensidad V, se empieza a generar daño en edificaciones (Grünthal, 1998). En dicha figura puede observarse cómo la peligrosidad sísmica de la ciudad está bajo la influencia de las zonas costeras del mar Mediterráneo y, más al norte del Prepirineo y Pirineo.

Al observar la Figura 1 es posible identificar que en Barcelona y en la región que rodea a dicha ciudad, han ocurrido sismos importantes. De manera que se puede afirmar que Barcelona ha estado sometida a significativos niveles de intensidad sísmica. Por ejemplo, la Tabla I muestra algunas de las intensidades sísmicas que se estima se han presentado en Barcelona.

Debido a la importancia social y económica de la ciudad de Barcelona, se han desarrollado numerosas investigaciones relacionadas con la peligrosidad sísmica de dicha ciudad. Algunas de ellas corresponden a estudios específicos de la peligrosidad sísmica de Barcelona y Cataluña (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2004; Irizarry et al 2003b; Goula et al, 1997; Secanell, 1999), y otras corresponden a diferentes aspectos de la peligrosidad sísmica de Barcelona y de Cataluña (Secanell et al, 2008; Perea y Atakan, 2007; Ojeda et al, 2002; Jimenez et al, 2001; Secanell et al, 1999).

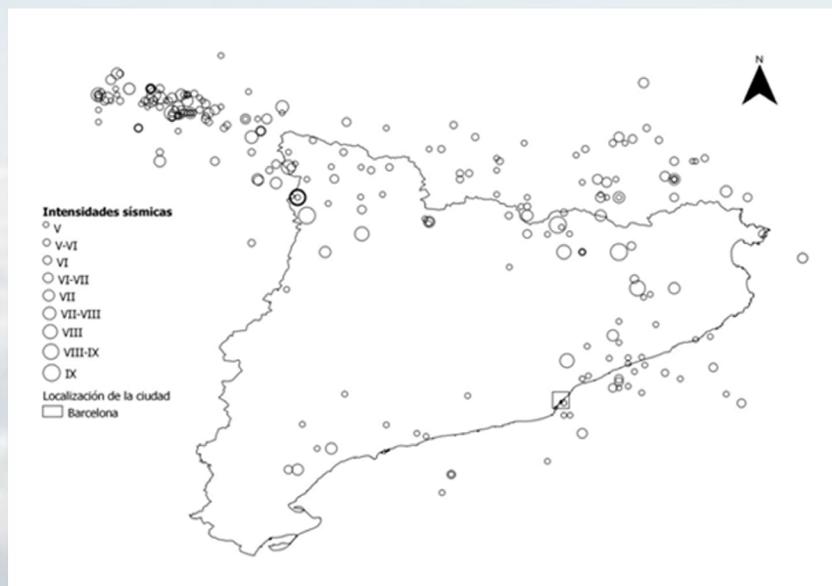


Figura 1. Ubicación de los principales epicentros de sismos con intensidades mayores o iguales a V, ocurridos entre los años 1152 y 1998 en la región de Cataluña y zonas aledañas (Susagna y Goula, 1999).

Fecha	Intensidad en la región de la ciudad de Barcelona
3-Marzo-1373	V-VI
2-Febrero-1428	VI-VII
25-Mayo-1448	V-VI

Tabla I. Grados de intensidad sísmica EMS-98 estimados en la ciudad de Barcelona, debidos a la ocurrencia de importantes sismos en los siglos XIV y XV (Olivera et al, 2006).

En el trabajo realizado por Secanell et al (1999), propusieron un mapa de zonas sísmicas de Cataluña, en términos de las intensidades MSK definidas por Medvedev, Sponheuer y Karnik (Musson y Cecic, 2002), asociadas a un periodo de retorno de 500 años. Específicamente, propusieron 5 zonas sísmicas para toda Cataluña, y ubicaron a Barcelona en la zona 2. A esta última zona le corresponde una intensidad

sísmica entre VI y VII (MSK), para un suelo duro, y para un periodo de retorno de 500 años. Este último tipo de suelo se caracteriza por ser un material compacto, granular, con una velocidad de onda de cizalla entre 400 y 800 m/s, y con características mecánicas de buenas a muy buenas (Fleta et al, 1998).

A pesar de los diversos estudios de peligrosidad sísmica que se han hecho para Barcelona, en el presente trabajo se ha considerado conveniente realizar una nueva estimación de la peligrosidad sísmica de dicha ciudad, con la finalidad de: 1) ilustrar el enfoque probabilista planteado en la metodología probabilista de índices de vulnerabilidad, para estimar el peligro sísmico, 2) obtener resultados específicos de peligro sísmico en términos completamente probabilistas, requeridos para estimar el riesgo sísmico mediante la metodología probabilista de índices de vulnerabilidad y, 3) incorporar a los análisis de peligro sísmico actualizaciones realizadas en el código CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008).

A continuación se describen los principales pasos considerados en el análisis de peligrosidad sísmica de Barcelona.

Geología

Los límites físicos de la actual ciudad de Barcelona han sido establecidos con la ayuda de cuatro elementos naturales: el mar Mediterráneo, la sierra de Collserola, el río Besòs y el río Llobregat (Figura 2). La mayor parte de la ciudad está situada sobre un llano, el cual tiene una suave inclinación hacia el mar. Por otra parte, desde el punto de vista geomorfológico es posible distinguir dos unidades: a) los relieves montañosos que constituyen el substrato de la ciudad y, b) el llano. En el caso de los relieves montañosos, es posible encontrar materiales Paleozoicos y Terciarios, mientras que el llano de Barcelona se puede dividir en otras dos unidades geomorfológicas: 1) la zona central de la ciudad, compuesta de materiales de edad Pleistocena (2.5 Millones de años), y 2) los depósitos deltaicos de los ríos Besòs y Llobregat, los cuales están compuestos por materiales de edad Holocena (0.012 Millones de años).



Figura 2. Imagen satelital de la ciudad de Barcelona (ICC, 2010).

Los materiales Paleozoicos de Barcelona están principalmente compuestos de materiales de origen sedimentario, afectados por diferentes grados de metamorfismo y por materiales plutónicos. Particularmente, se encuentran calizas, pizarras y granitos. Los materiales terciarios corresponden al Mioceno que forma el bloque de Montjuïc, y el Plioceno, más reciente, que constituye el substrato del Cuaternario en la zona central del distrito del Eixample y parte baja de la ciudad. El Mioceno está formado por series marinas potentes de aguas poco profundas, con capas alternadas de bancos de margas

azuladas, fosilíferas, areniscas rojo-grisáceas, y algún nivel de conglomerados. Mientras que el Plioceno está constituido por una capa inferior de margas azul-verdosas, con numerosos fósiles, y una capa superior con margas arenosas y arenas pardo-amarillentas.

Por otra parte, los materiales cuaternarios pueden diferenciarse por su edad en Pleistoceno u Holoceno. Los materiales del Pleistoceno están básicamente formados por arcillas compactas rojas, limos amarillentos de origen eólico y costra calcárea. Mientras que los materiales Holocenos son depósitos deltaicos de los ríos Besos y Llobregat, formados por arena gruesa y grava, limos y arcillas intermedias, arena fina o gruesa, limos plásticos color marrón y suelo humus (Cid et al, 2001). La Figura 3 muestra un mapa con la situación geológica en superficie de Barcelona (Cid et al, 1999).

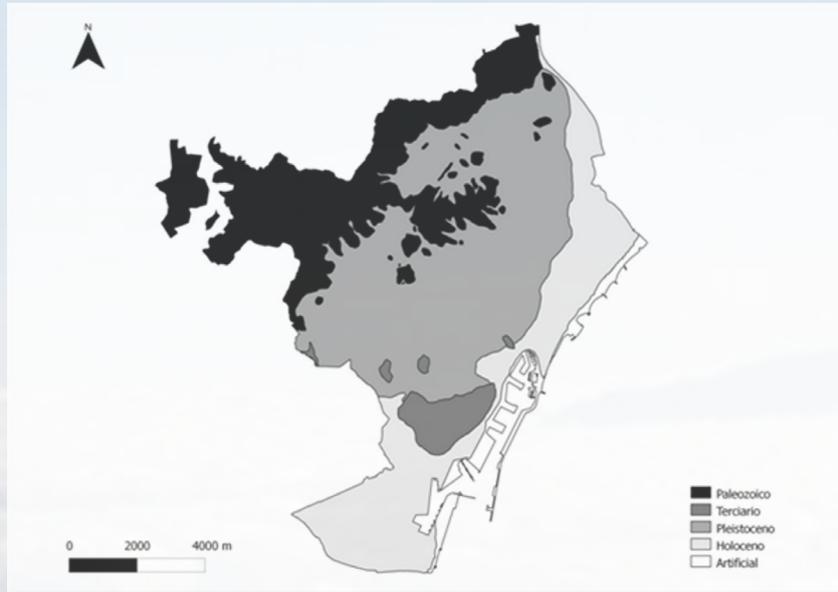


Figura 3. Situación geológica, en superficie, de la ciudad de Barcelona (Cid et al, 1999).

Fuentes sismogénicas

Geometría de las fuentes sísmicas

En el presente trabajo se consideraron las zonas sismotectónicas indicadas en la Figura 4 (Secanell et al, 2004). Dichas zonas coinciden con las empleadas por Secanell et al (2004) y con pequeñas modificaciones coinciden también con las que fueron propuestas originalmente por Goula et al (1997), las cuales a su vez tienen como referencia la propuesta de zonación sismotectónica de Cataluña realizada por Fleta et al (1996). Por otra parte las zonas sismotectónicas empleadas en el presente trabajo, han sido utilizadas en diversos estudios de peligrosidad sísmica de Barcelona y de Cataluña (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2004; Irizarry et al, 2003a).

Por otra parte, la geometría de cada fuente sísmica se definió en el programa CRISIS2008, mediante los datos de longitud, latitud y profundidad, de cada uno de los vértices del polígono que representa a cada una de las fuentes sísmicas.

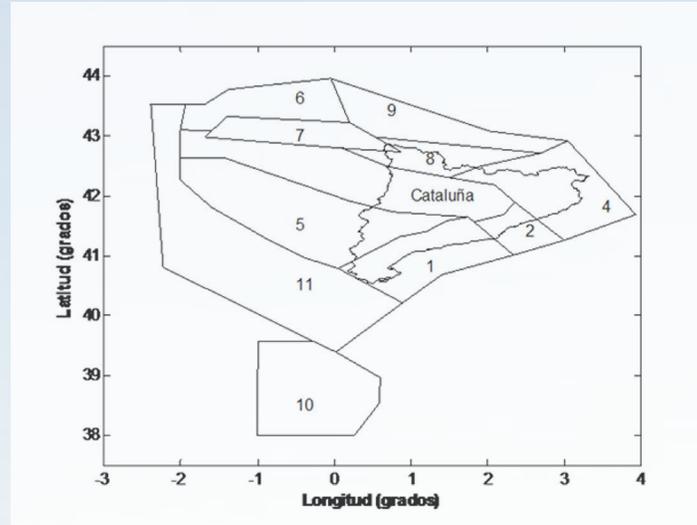


Figura 4. Representación geométrica de las fuentes sísmicas empleadas para estimar el peligro sísmico de Barcelona.

Potencial sísmico

La sismicidad de las fuentes sísmicas de la Figura 4 se modeló usando el modelo truncado Gutenberg-Richter, el cual se representa mediante la Ec. 1.

$$\lambda(I) = \alpha \frac{e^{-\beta(I-I_{\min})} - e^{-\beta(I_{\max}-I_{\min})}}{1 - e^{-\beta(I_{\max}-I_{\min})}} \quad (1)$$

donde $\lambda(I)$ es la frecuencia anual de excedencia de la intensidad macrosísmica I , I_{\min} es la mínima intensidad epicentral considerada, I_{\max} es la máxima intensidad epicentral posible en cada zona, α es la frecuencia anual de excedencia de las intensidades mayores o iguales a I_{\min} , y el valor de β es la pendiente relacionada con la ley Guttenberg-Richter (Goula et al, 1997; Ordaz et al, 2008).

Los parámetros de sismicidad correspondientes a cada fuente sísmica de la Figura 4 se indican en la Tabla II. Dichos parámetros fueron determinados a partir de un catálogo sísmico basado en intensidades macrosísmicas M.S.K (Secanell et al, 2004), y han sido empleados en estudios recientes del peligro sísmico de Barcelona y de otras regiones de Cataluña (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2004; Irizarry, 2004). Por tales motivos, en el presente trabajo se emplean los referidos parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas.

Tabla II. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 4 (Secanell et al, 2004).

Zona Sismotectónica	Superficie (km ²)	α	$\sigma(\alpha)^*$	β	$\sigma(\beta)^*$	h (km)*	I_{min}^*	I_{max}^*	I_{max} observada *
1	14100	0.100	0.030	1.864	0.559	7	V	VIII	VII
2	4600	0.128	0.033	1.608	0.324	7	V	IX	VIII
4	16300	0.157	0.030	1.256	0.186	10	V	X	IX
5	23100	0.040	0.014	1.319	0.373	10	V	IX	VIII
6	8000	0.099	0.025	1.977	0.640	10	V	VII	VI
7	7200	0.957	0.090	1.420	0.116	15	V	X	VIII
8	7700	0.218	0.040	1.716	0.246	15	V	IX	VIII
9	9600	0.070	0.020	1.737	0.214	10	V	VIII	VII
10	19700	0.635	0.059	1.201	0.083	10	V	XI	X
11	40100	0.060	0.016	0.886	0.242	10	V	IX	VIII

* $\sigma(\alpha)$ es la desviación estándar de α ; $\sigma(\beta)$ es la desviación estándar de β ; h es la profundidad en km; I_{min} es la intensidad epicentral mínima asignada a la fuente sísmica; I_{max} es la intensidad epicentral máxima asignada a la fuente sísmica; I_{max} observada es la máxima intensidad epicentral observada en la fuente sísmica.

Atenuación

Leyes de atenuación de la intensidad

En el presente trabajo se emplearon las leyes de atenuación de López Casado et al (2000). Dichas leyes se obtuvieron principalmente a partir de catálogos de mapas de isosistas de la Península Ibérica y se representan mediante la Ec. 2.

$$I = f(I_{epic}) - a_2 \ln \Delta - a_3 \Delta \quad (2)$$

donde I es la intensidad macrosísmica a una distancia focal Δ , $\Delta = (R^2 + R_0^2)^{1/2}$ con R la distancia epicentral en km, y R_0 un valor que se usa para mejorar el ajuste y que tiene el significado de profundidad focal en km (Tabla III); I_{epic} es la intensidad epicentral en la escala MSK; $f(I_{epic})$ se determina de acuerdo con la Tabla III; a_2 y a_3 son coeficientes que toman los valores indicados en la Tabla III.

Tabla III. Valores correspondientes a las leyes con una atenuación alta y una atenuación baja en la Península Ibérica de acuerdo con López Casado et al (2000).

Atenuación	$f(I_{epic})$	a_2	a_3	R_0	σ
Alta (Figura 5a)	$6.016 + 0.090 \cdot I_{epic} + 0.069 \cdot I_{epic}^2$	1.477	0.01035	4	0.46
Baja (Figura 5b)	$5.557 + 0.902 \cdot I_{epic} + 0.014 \cdot I_{epic}^2$	1.762	0.00207	2	0.59

σ es la desviación estándar de la intensidad macrosísmica I .

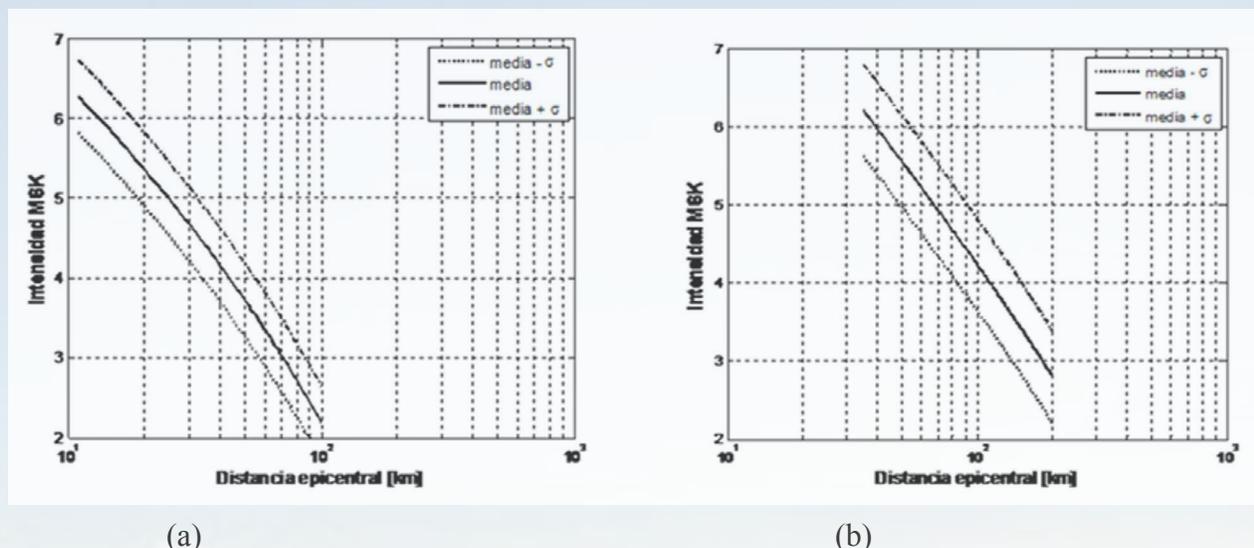


Figura 5. Atenuación de la intensidad de un sismo con intensidad epicentral VII, de acuerdo con: (a) la ley de atenuación “Alta” y, (b) la ley de atenuación “Baja” de López Casado et al (2000).

López Casado et al (2000) propusieron en total 5 leyes de atenuación, de las cuales dos se usan en el presente trabajo. Cada ley de atenuación fue definida en función del grado de atenuación, desde un grado de atenuación muy alto hasta un grado de atenuación muy bajo. Además, indicaron las regiones en las que consideran son válidas cada una de las leyes de atenuación propuestas. En función de lo anterior y al considerar la ubicación de las fuentes sísmicas empleadas en el presente trabajo, se determinó emplear únicamente dos leyes de atenuación, la correspondiente al nivel de atenuación bajo y la correspondiente al nivel de atenuación alto. Específicamente, se emplea la ley de atenuación baja para la fuente sísmica 7 ubicada en la región de los Pirineos (Figura 4), y la ley de atenuación alta se emplea para el resto de las fuentes sísmicas consideradas en el presente trabajo.

Ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno (PGA)

El modelo de atenuación sísmica elegido para estimar el peligro sísmico de Barcelona en términos de la aceleración máxima del terreno, es el que fue propuesto por Ambraseys et al (1996). Dicha ley de atenuación se obtuvo a partir de registros sísmicos de 157 sismos en Europa y regiones adyacentes (Ambraseys et al, 1996). Por otra parte dicha ley de atenuación fue elegida en el proyecto Risk-UE para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona, y ha sido considerada una opción adecuada para estimar la peligrosidad sísmica de la ciudad (Irizarry et al, 2010). Adicionalmente, la ley de Ambraseys et al (1996) ha sido empleada para realizar estudios previos de peligro sísmico de: a) regiones de Cataluña (Perea y Atakan, 2007); b) de la totalidad de Catalunya (Irizarry, 2004), y; c) de toda la península Ibérica (Jiménez et al, 2001). En la Figura 6 se muestran curvas debidas a la ley de atenuación de Ambraseys et al (1996).

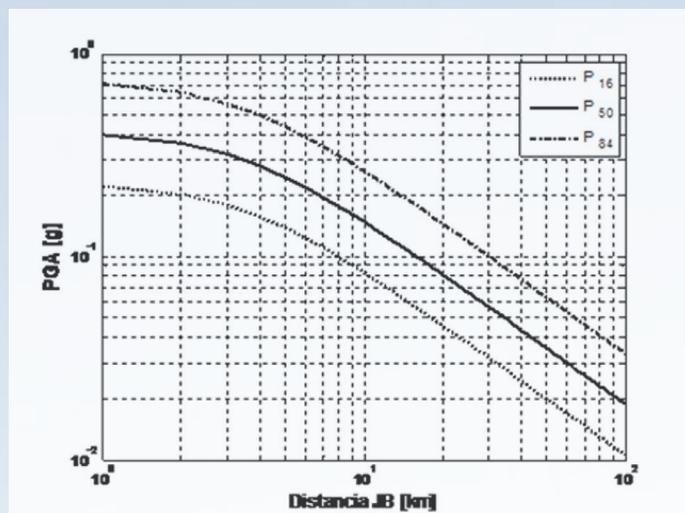


Figura 6. Curva de atenuación de los valores de PGA (g) vs. distancia Joyner y Boore (1981), obtenida mediante la ecuación de Ambraseys et al (1996), para una magnitud $M_s = 6$ y para un sitio en roca.

Curva de peligro sísmico a partir de intensidades macrosísmicas

En el código CRISIS2008 sí es posible realizar cálculos de peligrosidad sísmica mediante leyes de atenuación cuya distribución de los residuos es normal. De manera que es posible integrar directamente en los cálculos, la incertidumbre en las leyes de atenuación de la intensidad macrosísmica empleadas para Barcelona. Esto último es relevante, porque en general, se considera primordial que en la estimación de la peligrosidad sísmica se considere directamente la incertidumbre en las leyes de atenuación sísmica (Bommer y Abrahamson, 2006). Por lo tanto, al considerar en el CRISIS2008 las fuentes sísmicas de Figura 4, con sus correspondientes parámetros de sismicidad, y las leyes de atenuación de la Tabla III, fue posible obtener la curva de peligro sísmico de la Figura 7. De acuerdo con dicha curva la intensidad de VI tiene un periodo de retorno de 278 años, mientras que a la intensidad de VII le corresponde un periodo de retorno de 2041 años.

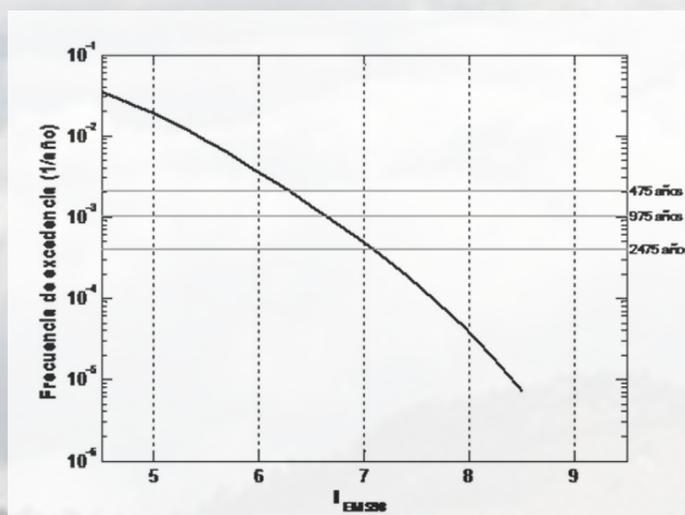


Figura 7. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida mediante el código CRISIS2008, en el que se integró directamente la incertidumbre en las leyes de atenuación de las intensidades macrosísmicas.

Curva de peligro sísmico a partir de la magnitud Ms

Una de las dificultades de estimar el peligro sísmico de Barcelona, mediante la sismicidad de las fuentes sísmicas expresada en términos de magnitudes sísmicas, es que en tal caso es necesario aplicar leyes de transformación de intensidades macrosísmicas a magnitudes M , por ejemplo, magnitudes M_s . El empleo de tales transformaciones es necesario porque para la región de Cataluña, el catálogo de sismicidad más completo para fines de estimar peligro sísmico, está en términos de intensidades macrosísmicas.

Por tal motivo, en el presente trabajo se emplearon tres relaciones Magnitud (M_s) - Intensidad epicentral (I_0). Adicionalmente, las tres relaciones se tomaron en cuenta mediante un árbol lógico y con ello fue posible obtener la curva de peligro sísmico mostrada en la Figura 8.

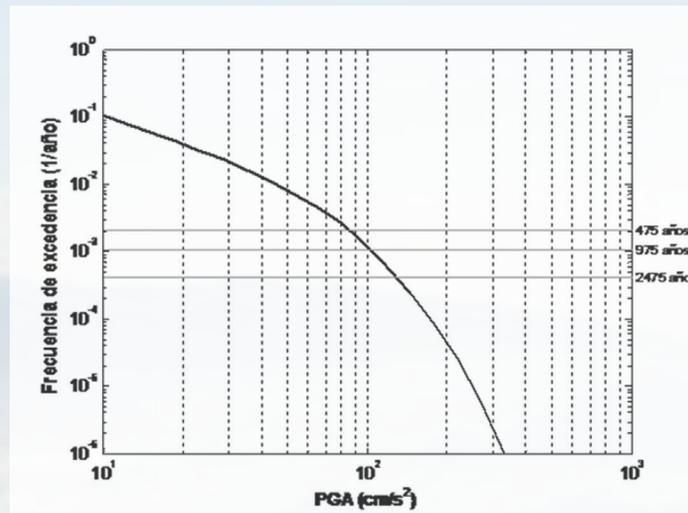


Figura 8. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida mediante el CRISIS2008.

De acuerdo con la curva de peligro sísmico de la Figura 8, el valor de PGA que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 85 cm/s^2 . Mientras que el valor de PGA que tiene un periodo de retorno de 975 años es igual a 102 cm/s^2 . Por otra parte, con la finalidad de emplear estos resultados de peligro sísmico en la estimación del riesgo sísmico mediante el método probabilista de índices de vulnerabilidad, es necesario convertir esta curva de peligro (Figura 8), en otra curva que esté en términos de intensidades macrosísmicas versus frecuencias de excedencia. Para tal fin, es posible emplear leyes de transformación de PGA a MMI.

En la Figura 9 se muestran 4 relaciones intensidad macrosísmica-PGA: a) la de Sorensen et al (2008) que fue propuesta a partir de datos de la región de Campania en Italia y en especial de registros del sismo de Irpina de 1980; b) la de Wald et al (1999) determinada a partir de datos sísmicos de California; c) la de Marin et al (2004) propuesta a partir de datos de Francia, y; d) la de las normas NCSE-94. En el presente trabajo se emplearon las cuatro relaciones para observar las curvas que se obtienen en cada caso. Particularmente, se emplearon dichas relaciones para transformar la curva de peligro sísmico de la Figura 8, y se obtuvieron las curvas de la Figura 10. Para fines de comparación en la Figura 10 se incluye también la curva de peligro sísmico de la Figura 7.

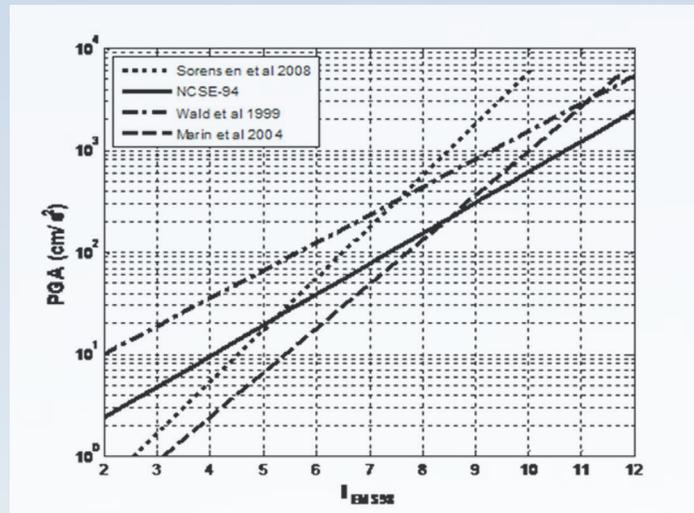


Figura 9. Relaciones intensidad macrosísmica-PGA consideradas en el presente trabajo.

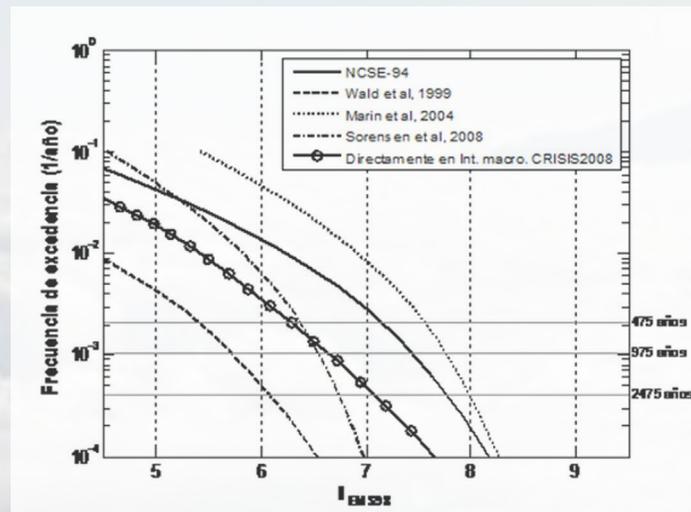


Figura 10. Comparación de las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar valores de PGA en intensidades macrosísmicas, con la curva de peligrosidad sísmica obtenida directamente en términos de intensidades macrosísmicas.

En la Figura 10 es posible observar que entre las curvas en términos de intensidades macrosísmicas obtenidas al transformar las curvas en términos de PGA, la obtenida mediante la relación de Sorensen et al (2008), es la que tiene las mayores similitudes con las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas directamente en términos de intensidades macrosísmicas. Especialmente, en los periodos de retorno comprendidos entre los 475 años y 975 años. Por lo tanto, debido a que las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas directamente mediante intensidades macrosísmicas, son las que acumulan menos incertidumbre, es posible concluir que para el presente estudio la relación de Sorensen es una relación razonablemente adecuada para el caso de Barcelona, especialmente, en intensidades macrosísmicas comprendidas entre V y VII. Por lo tanto, la curva de frecuencias de excedencia de intensidades macrosísmicas obtenida al transformar mediante la relación de Sorensen et al (2008), la curva de frecuencias de excedencia de valores de PGA de la Figura 8, puede considerarse una curva que representa en forma razonable la peligrosidad sísmica de Barcelona.

Es importante señalar que los resultados de peligro sísmico obtenidos en el presente estudio tienen importantes coincidencias con los resultados de peligro sísmico obtenidos en estudios previos, tanto en el caso de resultados en términos de intensidades macrosísmicas (Secanell et al, 2004; Peláez y López, 2002; Goula et al, 1997; NCSE-02, 2002) como en el caso de resultados en términos de PGA (Jiménez et al, 1999; Peláez y López, 2002; Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2008; NCSE-02, 2002).

Riesgo sísmico

Las curvas de peligro sísmico en términos de intensidades macrosísmicas versus frecuencias de excedencia, pueden emplearse para estimar riesgo sísmico mediante la metodología probabilista de índices de vulnerabilidad. Al hacerlo para la ciudad de Barcelona, y particularmente para 68982 edificios residenciales de la ciudad, es posible obtener por cada edificio curvas de riesgo sísmico como las mostradas en la Figura 11. Al promediar los resultados obtenidos, es posible obtener resultados de riesgo sísmico para la totalidad de los edificios de Barcelona estudiados. De acuerdo con estos últimos resultados, el distrito con mayor riesgo sísmico en la ciudad es el de Ciutat Vella. Es posible concluir también, que el riesgo sísmico de algunos edificios de Barcelona es importante, debido a que a pesar de que tales edificios están localizados en zonas con niveles moderados de peligro sísmico, los mismos tienen muy altos niveles de vulnerabilidad sísmica.

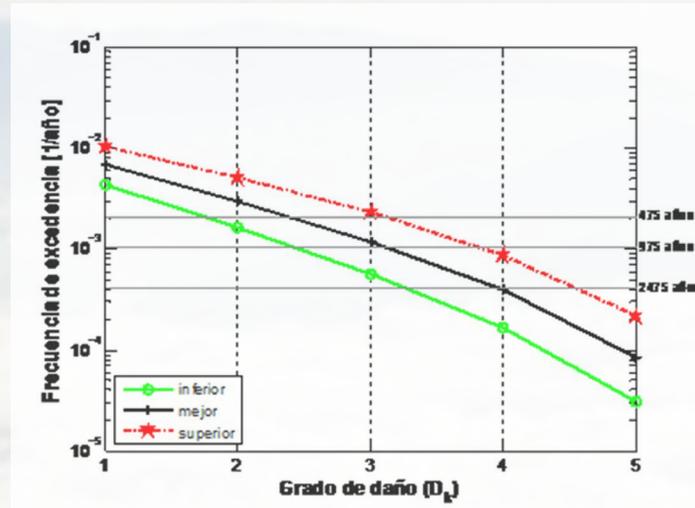


Figura 11. Curvas de riesgo sísmico de un edificio de Barcelona, obtenidas al aplicar la metodología probabilista de índices de vulnerabilidad (Aguilar, 2011) y al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona.

Conclusiones

La estimación de la peligrosidad sísmica de Barcelona implica retos importantes debido a que la ciudad está localizada en una región de sismicidad entre moderada y baja. Por tal motivo, emplear una metodología probabilista para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona constituye una de las mejores alternativas, para identificar la peligrosidad sísmica de la ciudad.

El código CRISIS2008 permitió estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona, directamente en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas. Por ejemplo, de acuerdo con los resultados, en Barcelona la intensidad de VI tiene en promedio un periodo de retorno de 278 años. De manera similar, se obtuvo que la intensidad que en Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno de 475 años es igual a 6.3 (VI-VII).

El riesgo sísmico de Barcelona no debe obviarse pues de acuerdo con los resultados los niveles de vulnerabilidad sísmica de algunos edificios son muy altos, y por lo tanto, los respectivos niveles de riesgo sísmico son también importantes.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo parcial de: 1) El Ministerio Español de Educación y Ciencia y con fondos FEDER (proyecto: CGL-2005-04541-C03-02/BTE); 2) el proyecto “Contribuciones sismológicas, geofísicas y de ingeniería a la predicción y prevención del riesgo sísmico” (CGL2008-00869/BTE); 3) La Comisión Europea y con fondos FEDER a través del proyecto de investigación “SisPyr: INTERREG: POCTEFA 2007- 2013/73/08”; 4) Proyecto PROMEP: “Análisis de sensibilidad en la estimación probabilista de peligro sísmico en regiones, y evaluación del código CRISIS2008 usado para calcular el peligro sísmico.” El primer autor reconoce el valioso apoyo de la Universidad Veracruzana, del Instituto de Ingeniería de la UNAM y de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Referencias

- Aguilar, A., 2011. Evaluación probabilista del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, Directores: Alex H. Barbat, Lluís G. Pujades y Mario G. Ordaz. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., Bommer, J. J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25: pp. 371-400.
- Bommer, J. J., Abrahamson, N. A., 2006. Why Do Modern Probabilistic Seismic-Hazard Analyses Often Lead to Increased Hazard Estimates?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (6): 1967-1977.
- Casas-Sainz, A. M., De Vicente, G., 2009. On the tectonic origin of Iberian topography; *Tectonophysics*; 474: 214-235.
- Cid, J., Figueras, S., Fleta, J., Goula, X., Susagna, T., Amieiro, C., 1999. Zonación Sísmica de la Ciudad de Barcelona. Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Murcia, España, pp. 263-271.
- _____, J. Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S., 2001. Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects; *Pure and Applied Geophysics*; 158: pp. 2559-2577.
- Cornell, A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, (5): pp. 1583-1606.
- Esteva, L., 1970. Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería. Institute of Engineering, Series-246, UNAM, Mexico.
- Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combes, Ph., Grellet, B., Granier, Th., 1996. Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la península Ibérica (Cataluña), *Geogaceta*, 20(4): pp. 853-856.
- _____, J., Estruch, I., Goula, X., 1998. Geotechnical characterization for the regional assessment of seismic risk in Catalonia. Proceedings 4th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, Barcelona, pp. 699-702.
- Goula, X., Susagna, T., Secanell, R., Fleta, J., Roca, A., 1997. Seismic Hazard Assessment for Catalonia (Spain). Proceedings Second Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, Barcelona, pp. 173-177.
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie*. Luxemburg; 15: pp. 1-99.

- ICC, 2010. Institut Cartogràfic de Catalunya. http://www.icc.es/vissir2/?lang=ca_ES (Consultado el 18 de diciembre de 2010).
- Irizarry, J., Goula, X., Susagna, T., 2003a. Analytical formulation for the elastic acceleration-displacement response spectra adapted to Barcelona soil conditions. Technical report. Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Irizarry, J., Goula, X., Susagna, T., 2003b. Evaluación de la peligrosidad sísmica de la ciudad de Barcelona en términos de aceleración espectral, 2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Málaga, España, pp. 389-399.
- Irizarry, J., 2004. An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban system of Barcelona. Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 406 pp.
- _____, J., Lantada, N., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Goula, X., Susagna, T., Roca, A., 2010. Ground-shaking scenarios and urban risk evaluation of Barcelona using the Risk-UE capacity spectrum based method; *Bulletin of Earthquake Engineering* (9) 2: 441-466.
- Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F., 2002. Palaeostress evolution of the Iberian Peninsula (Late Carboniferous to present-day); *Tectonophysics* 357: pp. 159-186.
- Jiménez, M-J., García-Fernández, M., GSHAP Ibero-Maghreb Working Group, 1999. Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region; *Annali di Geofisica*, 42(6): pp. 1057-1065.
- _____, M.J., Giardini, D., Grünthal, G., SESAME Working Group, 2001. Unified seismic hazard modeling throughout the Mediterranean region, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42 (1-2): pp. 3-18.
- Joyner, W. B., Boore, D. M., 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake; *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6): pp. 2011-2038.
- López Casado, C., Molina, S., Delgado, J., Peláez, J. A., 2000a. Attenuation of Intensity with Epicentral Distance in the Iberian Peninsula; *Bulletin of the Seismological Society of America*; 90: pp. 34-47.
- Marin, S., Avouac, J-P., Nicolas, M., Schlupp, A., 2004. A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France; *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6): pp. 2137-2163.
- Musson, R.M.W., Cecic, I., 2002. Macroseismology. In W. HK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger (Eds). *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, Volume 81A, pp. 807-822.
- NCSE-02, 2002. Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, Real Decreto 997/2002, Boletín Oficial del Estado No. 244, Madrid.
- NCSE-94, 1994. Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, Real Decreto 2543/1994, Boletín Oficial del Estado No. 33, Madrid.
- Ojeda, A., Atakan, K., Masana, E., Santanach, P., Jiménez, M-J., García Fernández, M., 2002. Integration and influence of paleoseismic and geologic data for the seismic hazard evaluation in the Catalan coastal ranges, Spain; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22: pp. 911-916.
- Olivera, C., Redondo, E., Lambert, J., Riera, A., Roca, A., 2006. The earthquakes of the XIV and XV centuries in Catalonia (NE Spain). First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Ginebra, Suiza, 10 pp.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V., 2008. CRISIS2008, Ver 3.8. Program for computing seismic hazard, UNAM, México.

- Peláez, J. A., López, C., 2002. Seismic Hazard Estimate at the Iberian Peninsula; *Pure and Applied Geophysics*; 159: pp. 2699-2713.
- Perea, H., Atakan, K., 2007. Influence of slow active faults in probabilistic seismic hazard assessment: the northwestern margin of the València trough; *Natural Hazards*, 43: pp. 379-396.
- Rosenbaum, G., Lister, G. S., Duboz, C. , 2002. Relative motions of Africa, Iberia and Europe during Alpine orogeny; *Tectonophysics*; 359: pp. 117-129.
- Secanell, R., 1999. Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics, PhD thesis, Universidad de Barcelona, Barcelona, 335 pp.
- _____, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Roca, A., 1999. Mapa de zones sísmiques de Catalunya. 1er Congreso nacional de Ingeniería Sísmica, Murcia, España, pp. 251-259.
- _____, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Roca, A., 2004. Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties, *Journal of Seismology*, 8: pp. 25-40.
- _____, R., Bertil, D., Martin, C., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Dominique, P., Carbon, D., Fleta, J., 2008. Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. *Journal of seismology*, 12: pp. 323-341.
- Sorensen, M. B., Stromeyer, D., Grünthal, 2008. Estimation of macroseismic intensity-New attenuation and intensity vs. ground motion relations for different parts of Europe. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 8 pp.
- Susagna, M. T., Goula, X., 1999. *Atlas Sísmic de Catalunya. Volum 1: Catàleg de sismicitat*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 413 pp.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., 1999. Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California; *Earthquake Spectra*, 15(3): pp. 557-564.



Metodologías aplicadas a las ciencias de la tierra es una obra editada en IETEC-Arana Editores en formato digital en el mes de marzo de 2015. El cuidado de la edición estuvo a cargo de Ignacio Mora González.

En este libro se incluye una selección de nueve de los trabajos más importantes presentados en las Primeras Jornadas de las Ciencias de la Tierra, los cuales están relacionados con diversas Metodologías aplicadas para el modelado de la estimación del riesgo por fenómenos naturales, para el monitoreo de la actividad sísmica de volcanes, procesos de remoción en masa, para el manejo integral de cuencas e instrumentos utilizados en la lucha contra el cambio climático en países de la Unión Europea.

Es el resultado de un esfuerzo editorial del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana donde se presenten los avances en el estudio de los fenómenos naturales y su relación con los fenómenos antrópicos encaminados a su aplicación de la prevención de desastres y a la gestión integral del riesgo.

