Revista Española de Física 16 (4), 2002

Peligrosidad sísmica en la Península Ibérica

ABSTRACT: We present a short account of the most recent methodology for the evaluation of seismic hazard. The calculations are initially based on stablishing a time, space and energetic modelization of seismicity in the study area, as well as an attenuation model. Afterwards, we make use of the well known total probability theorem in order to calculate the seismic hazard in a given region.
We present the seismic hazard results computed for the Iberian Peninsula in terms of the mean value of the ground horizontal acceleration for a exposure time of 475 years.

CARLOS LÓPEZ CASADO Y
JOSÉ ANTONIO PELÁEZ MONTILLA

1. Introducción

Definimos peligrosidad sísmica en una localización como la probabilidad de que un determinado parámetro representativo del movimiento del terreno, debido a la ocurrencia de terremotos, sobrepase en dicha localización un cierto valor en un determinado intervalo de tiempo. Independientemente de esta definición, el resultado final puede expresarse de diversas formas. En este trabajo, tal y como se acostumbra en la actualidad, expresaremos la peligrosidad en términos del valor medio de la aceleración horizontal del terreno para un determinado tiempo de exposición.

Desde que se dispone de suficientes registros de aceleración del terreno, distribuidos espacialmente de forma adecuada, para un número suficiente de terremotos en una determinada región de estudio, el parámetro representativo del movimiento del suelo elegido suele ser la aceleración, la velocidad, el desplazamiento, o cualquiera de las representaciones de estas funciones en el dominio de la frecuencia. Cuando esto no es así, se acostumbra a elegir la intensidad.

Sin pretender definir rigurosamente los términos, pero con idea de que el lector sepa diferenciarlos, queremos indicar que la magnitud de un terremoto es un parámetro instrumental relacionado con la energía sísmica liberada en el foco del terremoto, mientras que la intensidad es un parámetro no instrumental con el que se evalúan los efectos que ha producido el terremoto en una localización dada sobre las personas, edificios y el terreno.

En todo cálculo de peligrosidad sísmica, para que se considere completo, se ha de definir un modelo de generación de los terremotos causantes de la amenaza, un modelo de atenuación de la energía liberada en el foco con la distancia, un modelo de cálculo y, un modelo de incertidumbres de los resultados.

El modelo de generación de terremotos tiene que considerar la generación espacial, la energética y la temporal. El cómo se trate la generación espacial de terremotos implicará que el método sea o no zonificado, el modelo energético vendrá dado por una ley de recurrencia de magnitudes o bien por un terremoto que se genera periódicamente (terremoto característico), y finalmente, el cómo se trate la generación temporal de terremotos implicará que el método sea determinístico o probabilístico.

Los métodos de cálculo se han clasificado tradicionalmente en zonificados y no zonificados. En los primeros, la región que contribuye a la peligrosidad se divide en áreas en donde los futuros terremotos se pueden producir en cualquier lugar de éstas con igual probabilidad, y según leyes de actividad y tamaño obtenidas a partir de la sismicidad que las caracteriza. En los no zonificados no se establecen estas áreas, y se considera que los nuevos terremotos se van a producir allí donde se produjeron los antiguos.

Por otro lado, los métodos probabilísticos de cálculo, a diferencia de los determinísticos, se basan en el establecimiento de leyes estadísticas que definen el comportamiento sísmico de una zona o localización a partir de la sismicidad histórica e instrumental.

La falta de catálogos de terremotos completos, que abarquen períodos similares a los de los ciclos sísmicos de las regiones implicadas en el cálculo, así como el insuficiente conocimiento de las fuentes generadoras de terremotos, ha llevado a numerosos investigadores a decantarse por el llamado método probabilístico zonificado de cálculo de la peligrosidad sísmica.

La base de los métodos probabilísticos zonificados, los que más profusamente se han venido utilizando en las tres últimas décadas, fue establecida por Cornell (1968). Desde un punto de vista matemático se basa en el conocido teorema de la probabilidad total, el cual nos indica que la probabilidad de superación de un determinado valor de movimiento del terreno y puede calcularse a través de la relación

$$P(\zeta > y) = \int_x P(\zeta > y \,|\, \tilde{x})\, f_{\tilde{x}}(\tilde{x})\, d\tilde{x}$$

en donde $\tilde{x}$ incluye todas las variables estocásticas que influyen en el resultado (normalmente acostumbran a utilizarse sólo la magnitud m y la distancia r). La integral es múltiple y ha de calcularse a través de todas las variables que se incluyan en $\tilde{x}$, siendo f la función densidad de probabilidad y $P(\zeta>y|\,\tilde{x})$ la probabilidad condicionada de que se supere el valor y dándose un determinado valor de las variables $\tilde{x}$ que intervienen en el cálculo (*v.g.* la probabilidad de que dado un terremoto de magnitud m, en un lugar a una distancia r se supere un determinado valor y de aceleración del terreno).

2. Metodología

El método se basa en principio en delimitar fuentes sísmicas en el área de estudio. Son zonas en donde los procesos de recurrencia de los terremotos, tanto espacial como temporalmente, son homogéneos. Esta delimitación en zonas o fuentes sísmicas está influenciada y es consecuencia, en muchos casos, del desconocimiento de las fallas activas generadoras de los terremotos en la región de estudio, tanto desde un punto de vista puramente geométrico, como desde el de su potencialidad sísmica o el mismo proceso de fractura o ruptura. Aunque se ha avan-

zado bastante en el conocimiento de los aspectos físicos del proceso de ruptura, se está aún en la fase de tratar de implementar este conocimiento en la metodología de cálculo de la peligrosidad.

En cada una de estas zonas se establecen modelos de recurrencia (relaciones entre la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de los terremotos), tal que los parámetros de dichos modelos se obtienen a partir de la sismicidad histórica e instrumental. El modelo espacial agrupa los terremotos en fuentes sísmicas, en las que se establece que cualquier punto de la fuente puede generar cualquiera de los terremotos que la caracterizan con igual probabilidad. El cálculo de la peligrosidad sísmica se realizará computando la contribución de todas y cada una de las fuentes sísmicas que se hayan delimitado, mediante el teorema de la probabilidad total.

Los modelos de generación de terremotos tienen que incluir, aparte de una modelización espacial (fuentes sísmicas) una modelización temporal. El modelo más utilizado es el modelo de Poisson; es el modelo estocástico más simple en su formulación y aplicación. En el caso de la sismicidad se basa en estos tres postulados: i) un terremoto puede suceder en cualquier instante, ii) el número de ocurrencias en un determinado intervalo de tiempo es independiente del número de ocurrencias en otro intervalo, siempre que estos no se solapen, y iii) la probabilidad de ocurrencia de un terremoto en un determinado intervalo de tiempo Δt viene dado por $\nu\Delta t$, en donde n es la tasa de ocurrencia. Considerar que la ocurrencia de terremotos es Poissoniana implica que en cualquier análisis que se realice de la sismicidad pasada con fines de cálculo de la peligrosidad futura no pueden incluirse los terremotos llamados premonitorios, las réplicas, o los denominados enjambres (series de terremotos agrupados espacial y temporalmente).

Finalmente, es imprescindible también el considerar un determinado modelo de atenuación. Una relación de atenuación es una expresión que nos relaciona un determinado parámetro del movimiento del suelo (aceleración, intensidad sentida, …) en un lugar a una determinada distancia del foco sísmico con los parámetros que caracterizan el tamaño del terremoto (magnitud o intensidad epicentral), el medio en el que se propagan las ondas y las condiciones geológicas locales. Un modelo de atenuación, más o menos elaborado, es también totalmente imprescindible a la hora de calcular la función $P(\zeta>y|\tilde{x})$ que aparece en la expresión del teorema de la probabilidad total.

3. Cálculo de la peligrosidad sísmica en la Península Ibérica

Vamos a presentar a continuación parte de los resultados de peligrosidad sísmica que hemos obtenido recientemente para el conjunto de la Península Ibérica (Peláez, 2000; Peláez y López Casado, 2001), comentando los datos y parámetros utilizados, la propia metodología de cálculo y los resultados finales.

Ya que los métodos probabilísticos zonificados suavizan la peligrosidad al repartir la sismicidad uniformemente en las fuentes sísmicas consideradas, y los no zonificados tienen la limitación de no permitir la posibilidad de que la sismicidad se extienda a zonas que no sean las ya conocidas como sísmicas, vamos a utilizar una metodología que trate de evitar en parte los anteriores inconvenientes y a la vez incorpore las ventajas de cada uno de estos métodos. Se utilizan fuentes sísmicas a la hora de considerar zonas en donde ciertos parámetros de cálculo son constantes, como en los métodos zonificados, pero consideramos la sismicidad allí donde sabemos que se ha producido, tal y como se hace en los métodos no zonificados.

Para la realización de este cálculo se parte del catálogo de terremotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN). En principio, ha sido necesaria su revisión mediante asignación de magnitudes a terremotos que no disponían de ella, se han eliminado aquellos terremotos no Poissonianos utilizando un análisis tipo *cluster,* y se ha realizado un análisis de la fiabilidad y completitud de dicho catálogo. Como ejemplos, en la figura 1 se muestra parte de la sismicidad de nuestro entorno, y en la tabla 1, algunos de los terremotos más importantes que hemos sentido en los últimos 500 años. En ambos casos, los datos utilizados han sido los proporcionados por el IGN.

Posteriormente se ha realizado una delimitación del área en fuentes sísmicas. A partir de la sismicidad incluida en cada fuente se han calculado los parámetros de la relación de recurrencia de magnitudes (truncada en una magnitud umbral, a partir de la que empiezan a producirse daños, así como en la magnitud máxima que se puede generar en la fuente) en cada una de ellas.

En lo tocante a las relaciones de atenuación, hemos de indicar que éstas son una de las principales causas de incertidumbre en un cálculo de estas

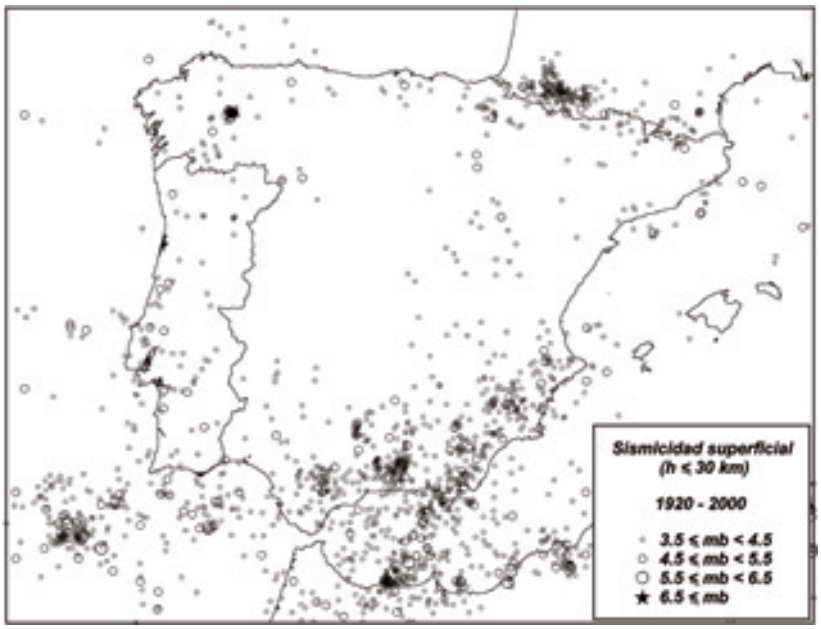

Figura 1. Sismicidad en la Península Ibérica y entorno geográfico próximo.

Tabla 1. Terremotos en la Península Ibérica y entorno próximo con intensidad máxima sentida IX o X en los últimos 500 años.

Localización	Fecha	I máxima
Carmona (Sevilla)	05/04/1504	IX
Vera (Almería)	09/11/1518	IX
Almería	22/09/1522	IX
Vila Franca Xira (PORTUGAL)	26/01/1531	IX-X
Alcoy (Alicante)	1645	IX
Bagneres de Bigorre (FRANCIA)	21/06/1660	IX
Alhaurín el Grande (Málaga)	09/10/1680	IX
Enguera (Valencia)	23/03/1748	IX
Juncalas (FRANCIA)	24/05/1750	IX
W Cabo de San Vicente	01/11/1755	X
W Cabo de San Vicente	31/03/1761	IX
Dalías (Almería)	25/08/1804	IX
Océano Atlántico	02/02/1816	IX
Torrevieja (Alicante)	21/03/1829	X
Setúbal (PORTUGAL)	11/11/1858	IX
Arenas del Rey (Granada)	25/12/1884	X
Benavente (PORTUGAL)	23/04/1909	IX

características; se debe preferir siempre una regionalización de la atenuación frente a relaciones generales. En este cálculo se han utilizado las obtenidas en el trabajo de López Casado *et al.* (2000), en donde se realizó una regionalización de la atenuación para la Península Ibérica en cinco categorías en base al valor del coeficiente de absorción del terreno.

A la hora del cálculo de la peligrosidad se evalúa el teorema de la probabilidad total utilizando la metodología recientemente propuesta por Frankel (1995), aunque con ciertas modificaciones. La metodología no se basa en el concepto de fuente a la hora de realizar la integración, sino sólo como medio de conocer los valores de los distintos parámetros de cálculo que interesan en una determinada localización. Se evita considerar las fuentes sísmicas en regiones en donde las estructuras que causan la sismicidad no son del todo conocidas, además de no imponer el que en extensas zonas la tasa de generación de terremotos sea constante. Toda el área de estudio se divide en celdillas cuadradas, tal que el teorema de la probabilidad total se calcula, no como una suma extendida a todas las fuentes que se consideran, sino como una suma extendida a todas las celdillas del área.

Una peculiaridad del método (Frankel, 1995) estriba en que se realiza un suavizado espacial, mediante un filtro Gaussiano, del número de terremotos contabilizado en cada celdilla; de esta forma se pretende incluir en el cálculo la incertidumbre que se tiene en las localizaciones de los terremotos. Nosotros, además, hemos suavizado diferentes parámetros de cálculo, en este caso para evitar fuertes variaciones de la peligrosidad obtenidas en localizaciones cercanas a los límites entre fuentes sísmicas (Bender, 1986).

En esta metodología también se trabaja con diferentes modelos de sismicidad: en vez de trabajar con la sismicidad conocida en un intervalo de tiempo determinado para calcular la peligrosidad, se trabaja con diferentes intervalos temporales. Se calcula la peligrosidad generada por cada uno de estos modelos de sismicidad y nos quedaremos como resultado final un valor promediado con diferentes pesos atendiendo a diversos criterios. En el cálculo que hemos realizado, los modelos de sismicidad considerados son cinco: i) la sismicidad superficial a partir de 1960 con magnitud superior a 3.6 m_b (intensidad epicentral IV-V) , con el que se tienen en cuenta los focos sísmicos más recientes que se conocen, ii) la sismicidad superficial a partir de 1920 con magnitud superior a 4.2 m_b (intensidad epicentral VI), con el que se completa espacialmente la sismicidad incluida en el primer modelo, iii) la sismicidad superficial a partir de 1700 con magnitud superior a 4.8 m_b (intensidad epicentral VII-VIII), en donde se incluye la sismicidad moderada que se ha producido en nuestro entorno, iv) la sismicidad superficial a partir de 1300 con magnitud superior a 5.4 m_b (intensidad epicentral VIII-IX), con lo que se incluyen los terremotos generados por estructuras tectónicas importantes, y v) la sismicidad con profundidad "intermedia" (30 - 60 km) a partir de 1960 con magnitud superior a 3.6 mb .

Algunos de los resultados obtenidos en nuestro análisis, que pasamos a indicar, se muestran en la figura 2, en donde se observa el valor medio de la aceleración horizontal pico que se espera para un tiempo de exposición de 475 años, intervalo de tiempo típicamente utilizado en Ingeniería Sísmica a la hora de tomar decisiones.

Se observa cómo la zona de mayor peligrosidad se encuentra en el SW peninsular, influenciada principalmente por la sismicidad de la falla Azores-Gibraltar, más concretamente por el núcleo de sismicidad que se genera a unos 150-250 km al SW y SSW del Cabo de San Vicente. Vemos que no hay zonas consideradas de muy alta peligrosidad sísmica (valores medios de la aceleración superiores a 4.0 m/s^2 para un tiempo de exposición de 475 años) en la Península Ibérica. Se puede

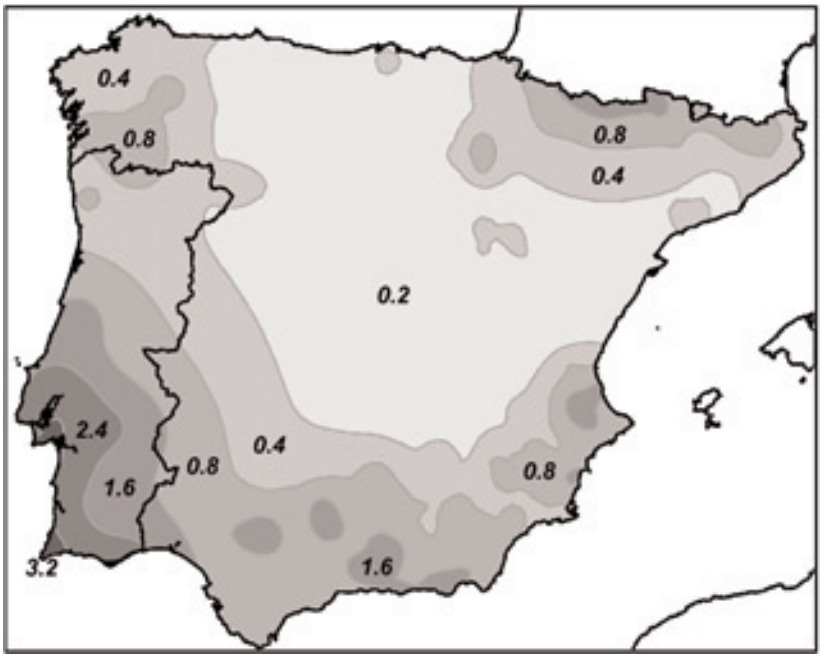

Figura 2. Peligrosidad sísmica obtenida para la Península Ibérica. Se muestra el valor medio de la aceleración (en m/s2) horizontal pico esperada con el 10% de probabilidad de ser superada en 50 años, es decir, para un tiempo de exposición de 475 años. Para su realización se ha utilizado la relación entre la intensidad macrosísmica y la aceleración horizontal pico del terreno propuesta por Murphy y O'Brien (1977).

considerar como zona de alta peligrosidad (valores de entre 2.4 y 4.0 m/s^2) el S y SW de Portugal, incluyendo la zona litoral del Algarve y del Bajo Alentejo, junto con la zona de Setúbal-Lisboa. Zonas de peligrosidad sísmica moderada (valores de entre 0.8 y 2.4 m/s^2) serían el tercio Central y S de Portugal, la mitad W de la provincia de Badajoz, la Depresión del Guadalquivir y la mayor parte de los Sistemas Béticos, las provincias de Murcia y Alicante, y S de la de Valencia, prácticamente toda la zona Pirenaica y entorno, así como la zona SW de Galicia. El resto de la península puede considerarse como una zona de baja peligrosidad sísmica.

Para hacernos una idea de lo que significan estos niveles de aceleración del terreno veamos estos dos ejemplos. Por un lado, en el terremoto de Ayamonte (Huelva) del 20/12/1989, de magnitud 5.0 m_b e intensidad máxima VI (datos proporcionados por el IGN), se llegaron a registrar a unos 17 km del epicentro valores de aceleración horizontal del terreno del orden de 60 cm/s^2, el máximo valor de aceleración, dados los pocos años que lleva funcionando la red de acelerógrafos, registrado hoy en día en España. En el otro extremo, en el terremoto de El Salvador del 13/01/2001, de magnitud 7.8, se llegaron a registrar, a distancias de 90-100 km del epicentro, valores de aceleración horizontal del terreno comprendidos entre 0.10 y 0.35 m/s^2.

Aunque no es la finalidad de este trabajo, vamos a terminar estableciendo una comparación entre la peligrosidad que hemos obtenido y la que puede observarse, para España, en la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-94), de obligado cumplimiento en todos los proyectos y obras de construcción que se realizan en nuestro país. La peligrosidad obtenida (figura 2), como no podía ser de otra forma, presenta prácticamente la misma morfología que la que se puede observarse en la Norma, calculada esta última mediante la metodología probabilista zonificada; no obtenemos nuevos escenarios de peligrosidad. Sin embargo, los niveles obtenidos en este trabajo no son los mismos que los que indica la Norma en todo el territorio. Por ejemplo, hemos obtenido mayor peligrosidad en ciertas zonas de la mitad sur de la península coincidentes con epicentros de importantes terremotos históricos, así como en la mitad sur de Galicia. En este último caso se debe a que la actual Norma no contempló los terremotos de Sarria y Becerreá (Lugo) de finales de 1995. En otras zonas ocurre lo contrario, marcando la Norma niveles superiores a los obtenidos en este trabajo. Esto último también es normal, debido al carácter conservador de ésta, ya que debe servir como referencia y cumplimiento de la normativa de construcción.

Agradecimientos

Agradecemos los comentarios de dos expertos anónimos, los cuales han contribuido en la mejora del manuscrito original. Este trabajo fue parcialmente subvencionado por la DGESIC (proyectos PB97-1267-C03-01 y REN2000-0777-C02-01 RIES) y por la Junta de Andalucía (grupo de investigación RNM-0217).

Referencias

[1] Bender, B. (1986). *Bull. Seism. Soc. Am.* **76**, 329-341.
[2] Cornell, A. (1968). *Bull. Seism. Soc. Am.* **58**, 1583-1606.
[3] Frankel, A. (1995). *Seism. Res. Letters* **66**, 4, 8-21.
[4] López Casado *et al.* (2000). *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 34-47.
[5] Murphy, J.R. and O'Brien, L.J. (1977). *Bull. Seism. Soc. Am.* **67**, 877-915.
[6] Peláez, J.A. (2000). Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
[7] Peláez, J.A. and López Casado (2001). *Pure and Appl. Geophys.* (en prensa).

Carlos López Casado
está en el Departamento de Física Teórica y del Cosmos. Facultad de Ciencias. Univ. de Granada.

José Antonio Peláez Montilla
está en el Dpto. de Física. Escuela Politécnica Superior. Univ. de Jaén.

Entrega de los Premios Andalucía de Investigación

El pasado 2 de julio tuvo lugar en Granada, presidido por el Excmo. Sr. Presidente de la Junta de Andalucía, el acto de entrega de los Premios Andalucía de Investigación. Entre los galardonados figuran dos físicos: El Premio Andalucía de Jóvenes Investigadores "Tercer Milenio", dotado con 2.254 euros y una placa acreditativa fue otorgado *exequo* al Dr. Adán Cabello Quintero, profesor del Departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Sevilla, por su trayectoria investigadora en los fundamentos y aplicaciones de la Mecánica Cuántica y al Dr. Eduardo Ros Vidal, profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de la Universidad de Granada, por su implementación mediante circuitos electrónicos de estructuras de procesamiento de información similares a las que utilizan los seres vivos.

En la fotografía uno de los galardonados, Adán Cabello, entre Manuel Chaves (izda.) y Francisco Gracia Navarro, Secretario General de Universidades e Investigación de la Junta de Andalucía (dcha.).