

Los terremotos no ocurren al azar en el espacio, sino que se generan cerca de donde ya tuvieron lugar terremotos previos. En este trabajo se elabora un mapa de pronóstico, basado en este hecho, para la península Ibérica, Baleares y Canarias. En primer lugar, se analiza hasta qué magnitud son completos los datos disponibles de terremotos en estas áreas, para tener en cuenta sólo los más fiables. Después se describe un método novedoso que calcula a qué distancia de terremotos previos es más probable que se genere el terremoto siguiente. Se comprueba, de manera retrospectiva, que este procedimiento hubiese marcado eficientemente las regiones donde se originaron el 90% de los terremotos ocurridos entre enero de 1985 y abril de 2009. Por último, se presenta el mapa de pronóstico para terremotos posteriores a esta fecha.



Mapa de localizaciones probables de futuros terremotos en

Pronosticando el temblor venidero

Por **ÁLVARO GONZÁLEZ GÓMEZ**. Licenciado en Ciencias Geológicas. Diplomado en Estudios Avanzados de Geología. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. Alvaro.Gonzalez@unizar.es <http://gmg.unizar.es/alvaro.html>



LatinStock

la península Ibérica, Baleares y Canarias

Los terremotos se distribuyen en el espacio de manera muy compleja, pero no azarosa: tienden a concentrarse en unas regiones, mientras que otras están desprovistas de ellos (figura 1). Esto se observa a todas las escalas, desde el conjunto de la Tierra a regiones pequeñas (1). Esta distribución es relativamente constante en el tiempo: a escala de décadas y siglos, los terremotos suelen ocurrir sistemáticamente en los mismos lugares. Se debe a

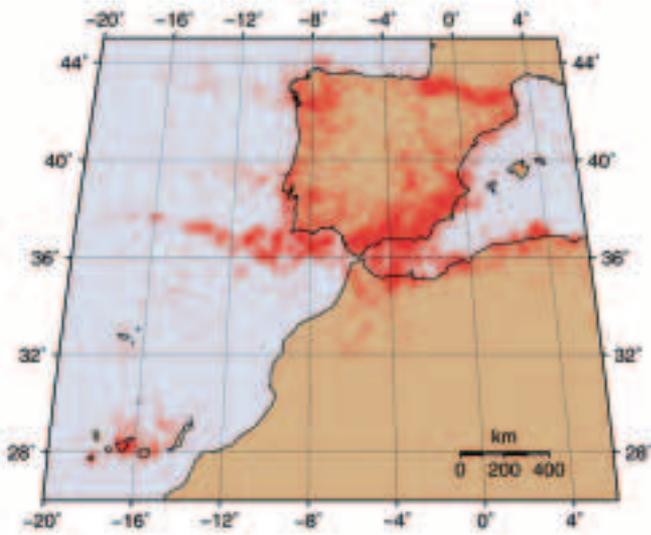
que los terremotos tienen lugar únicamente donde hay fallas capaces de generarlos, y en concreto, donde éstas concentran mayores tensiones (2).

No es posible, de momento, determinar con exactitud dónde ocurrirá el siguiente terremoto, ya que su generación es un proceso muy complejo e imposible de observar directamente. Todos los métodos de pronóstico propuestos hasta ahora fallan un cierto número de ocasiones, como ocurre en meteorología.

Para estimar la efectividad real del procedimiento es necesario testarlo, no con un terremoto en concreto, sino con muchos (3). Es conveniente, pues, mostrar cierto escepticismo ante afirmaciones rotundas de que un único terremoto particular fue pronosticado exitosamente.

Sólo en los últimos años se ha empezado a investigar de manera rigurosa hasta qué punto se puede pronosticar dónde ocurrirán futuros terremotos simplemente considerando dónde se

Figura 1. Mapa de 43.539 epicentros de terremotos localizados desde 1985 hasta abril de 2009 por el Instituto Geográfico Nacional en la península Ibérica, Baleares, Canarias y zonas adyacentes. Para percibir mejor los detalles de la distribución de puntos, todos se representan como círculos de igual diámetro, independientemente de su magnitud.



generaron otros previos (4-6). Se ha concluido que este supuesto tan sencillo es capaz de pronosticar futuras localizaciones de terremotos tan bien o mejor que ningún otro método más complicado de los propuestos hasta ahora (3,7).

De un modo u otro, siempre que se estima el riesgo sísmico en una región se supone que los futuros terremotos tenderán a ocurrir en, o cerca de, donde ya se produjeron otros en el pasado. Lo habitual, sin embargo, no ha sido tener en cuenta los lugares exactos donde éstos ocurrieron. Por el contrario, lo más común es delimitar en un mapa, según el criterio de cada investigador o grupo de investigadores, las zonas donde más terremotos tienden a ocurrir (8-9).

El mapa de riesgo sísmico en España (10) y los de otros muchos países de nuestro entorno (11) se basan en delimitar tales zonas (figura 2). El método supone que ningún terremoto relevante puede ocurrir fuera de ellas, y que dentro de ellas, los terremotos pueden generarse en cualquier lugar. Esta simplificación diluye los detalles de la distribución de los terremotos en el espacio. Como consecuencia, en general se sobreestima el riesgo, ya que algunos lugares dentro de una zona sísmica no generarán terremotos, a pesar de que supongamos lo contrario (12). Al revés, en algunos lugares aislados donde sí se han generado

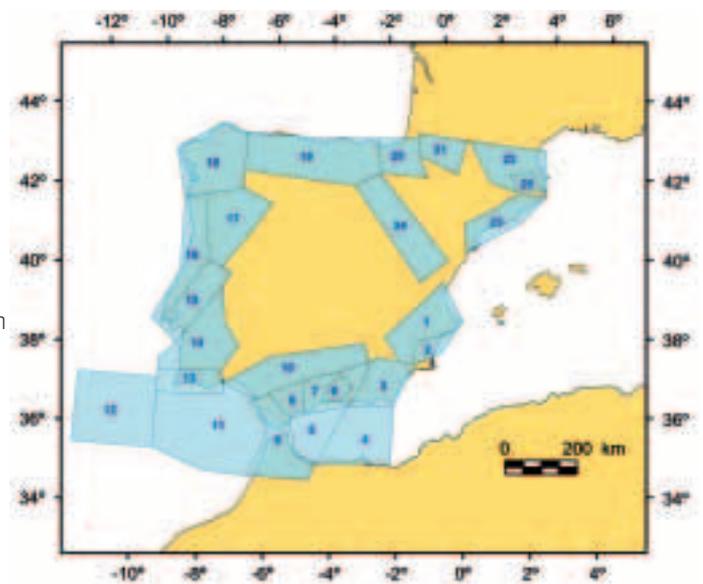
terremotos puede infravalorarse el riesgo al ser éste promediado con el de regiones inactivas de su alrededor. En general, la distribución de los terremotos (figura 1) es más compleja de lo que las zonas sugieren (figura 2), y muchos no ocurren dentro de ellas.

En este artículo se elabora un mapa que indica dónde se espera que se generen, con mayor probabilidad, futuros terremotos en la península Ibérica, Baleares y Canarias. Para ello se usa un método de pronóstico novedoso (13), que estima a qué distancia de terremotos anteriores es más probable que ocurran los terremotos futuros. En primer lugar, se

analiza la calidad de los datos disponibles y se seleccionan sólo los más completos y fiables. A continuación se explica el método de pronóstico y se testa de manera retrospectiva con terremotos ocurridos entre enero de 1985 y abril de 2009. Se comprueba que la mayoría de éstos efectivamente ocurrieron en regiones delineadas por terremotos previos, y que hubiese sido posible pronosticar un porcentaje de ellos, el 90%, fijado de antemano. En vista del éxito del ensayo retrospectivo, se elabora el mapa de pronóstico que indica las regiones donde se espera que se originen la mayoría (idealmente en torno al 90%) de los terremotos que ocurran a partir de mayo de 2009.

Los terremotos se distribuyen en el espacio de manera muy compleja, pero no azarosa, porque se originan cerca de donde ya tuvieron lugar terremotos previos

Figura 2. Zonas consideradas para estimar el riesgo sísmico oficial en la España peninsular, Baleares, Ceuta y Melilla (10). Según estas estimaciones, ningún terremoto capaz de causar daños debiera generarse fuera de estos veinticinco polígonos. Figura cortesía de Julián García Mayordomo.



Análisis de la calidad de los datos

Seguidamente se describen los datos empleados en este artículo y se analiza su calidad, para poder seleccionar únicamente los más fiables. El mapa elaborado aquí se basa exclusivamente en la localización de terremotos pasados. Se empleará el listado de terremotos más completo existente en la región: el elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Esta información es pública y se puede consultar libremente en Internet (14).

Sólo se puede detectar una parte de todos los terremotos que ocurren en una región. Se detectan preferentemente los de mayor magnitud y los que ocurren cerca de donde hay sismómetros en funcionamiento. Muchos de los terremotos pequeños o lejanos no llegan a detectarse. Este hecho se puede medir mediante la denominada magnitud de completitud. En un determinado lugar, sólo se pueden detectar todos los terremotos que tienen una magnitud mayor o igual a ésta. De los que tienen magnitud inferior a la de completitud, no todos se detectan.

Este hecho ha de tenerse en cuenta para realizar análisis estadísticos sobre los terremotos (1), y para elaborar y evaluar correctamente los pronósticos (15). Por ejemplo, sin tener en cuenta la calidad de los datos, podríamos pensar que en una región los terremotos tuvieron lu-

gar muy lejos unos de otros, cuando en realidad pudiera ser que sólo se hubiese detectado una minoría de los que ocurrieron. Esto distorsionaría nuestras medidas de las distancias que los separan. Del mismo modo, sólo se puede calcular el porcentaje real de terremotos pronosticados si se está razonablemente seguro de que en esa región, para las magnitudes consideradas, se detectaron todos los que ocurrieron. Es por ello necesario considerar sólo los terremotos de magnitud mayor o igual a la de completitud. Los de magnitudes más pequeñas

también aportan información, pero no deberían computarse en el análisis final.

La Red Sísmica Nacional, operada por el IGN, consiste en un conjunto de estaciones equipadas con sismómetros distribuidas por la geografía española. Los datos obtenidos con ella son la principal fuente de información usada por el IGN para localizar los terremotos y elaborar el listado usado aquí. Esta red ha experimentado sucesivas mejoras a lo largo del tiempo (16-18). El periodo de mejor calidad de los datos comenzó en 1985, cuando empezó a haber numero-



El 29 de enero de 2005 se registró un terremoto con una magnitud de 4,6 en la escala de Richter, y con epicentro entre las pedanías de Zarzilla de Ramos y La Paca, en el municipio murciano de Lorca.

No es posible, de momento, determinar con exactitud dónde ocurrirá el siguiente terremoto, ya que su generación es un proceso muy complejo e imposible de observar directamente

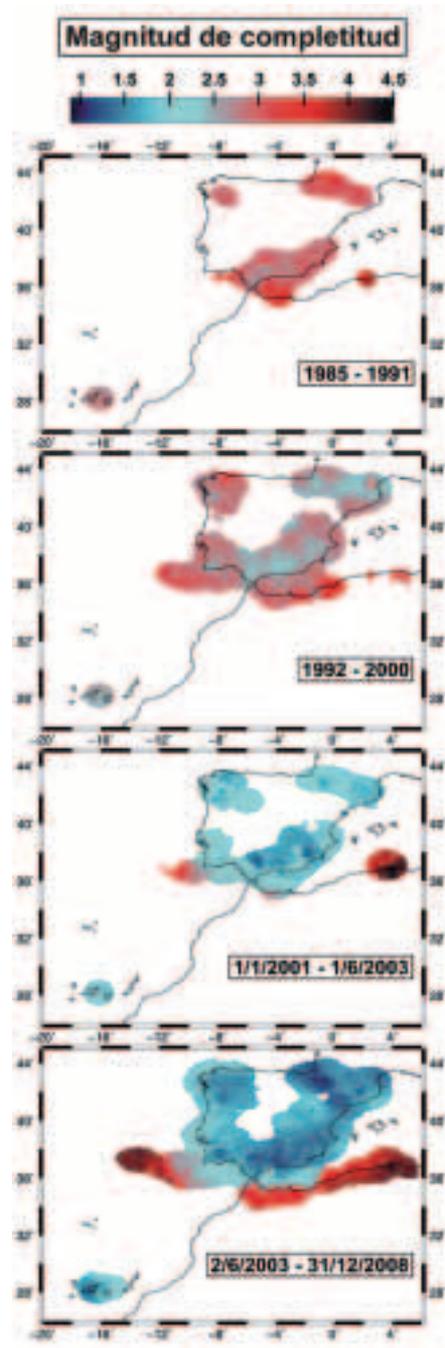


Figura 3. Magnitud de completitud promedio de los terremotos localizados por el Instituto Geográfico Nacional, en los periodos que se indican. Los datos en un lugar dado son completos para los terremotos de magnitud igual o superior a ésta. En las zonas en blanco no había terremotos suficientes como para realizar el análisis.

En este artículo se elabora un mapa que indica dónde se espera que se localicen, con mayor probabilidad, futuros terremotos en la península Ibérica, Baleares y Canarias

estas estaciones sísmicas que permitían localizar los terremotos en tiempo real. A partir de 1991 empezaron a usarse datos de un dispositivo muy sensible, formado por un grupo de sismómetros situados en torno a Sonseca, Toledo (18-19). En 2000 comenzaron a instalarse sismómetros digitales de banda ancha, que permiten un mejor registro del movimiento del suelo (18). El 2 de junio de 2003, el IGN comenzó a emplear un método mejorado para estimar las magnitudes de los terremotos (20). Debido a esta mejora, las magnitudes de eventos ocurridos antes y después de esa fecha no son enteramente equivalentes.

Se ha medido la magnitud de completitud de la base de datos del IGN para cuatro periodos diferentes, separados por los hitos en el desarrollo de la Red Sísmica Nacional ya mencionados. Esta magnitud se ha cartografiado empleando el llamado «método del rango completo de magnitud» (21). Siguen algunos detalles técnicos para lectores especializados. Se ha usado una malla de puntos de muestreo colocados cada 0.1° de longitud y latitud. Para cada punto se calcula la magnitud de completitud usando los 60 terremotos más próximos a él, siempre que el más alejado esté, como mucho, a 100 kilómetros de distancia. El resultado es el promedio de 200 remuestreos (*bootstraps*) por punto, y se calculó con el programa informático ZMAP (22).

La figura 3 muestra los mapas de magnitud de completitud. Se observa que és-

ta se ha ido reduciendo con el tiempo. Gracias a las mejoras en la Red Sísmica Nacional, los datos son cada vez más completos. La reducción brusca en el último periodo puede ser, en parte, un efecto del nuevo método usado para calcular las magnitudes. Los valores más bajos se observan en la península Ibérica y Canarias. En el Atlántico y la costa norte de África sólo se detectan los terremotos de magnitud relativamente elevada. Los resultados son coherentes con estimaciones independientes, realizadas con otro método, para los años 1993 (16) y 2002 (18).

Se ha decidido considerar únicamente los terremotos ocurridos dentro de dos polígonos que abarcan las regiones donde los datos son más completos. En



El 2 de febrero de 1999 se registraron dos sismos en la localidad murciana de Puebla de Mula, con una magnitud de 3,5 y 5,2 grados en la escala de Richter.

ellas los terremotos debieran estar, además, localizados con mayor precisión (23). Un polígono incluye la península Ibérica, Baleares y áreas marítimas circundantes. El otro hace lo propio con las islas Canarias. Para facilitar futuras comprobaciones de los resultados, las coordenadas de los vértices de los polígonos se listan en la tabla 1. La tabla 2 indica las magnitudes mínimas usadas aquí desde el momento que se indica, de manera que los datos sean razonablemente completos dentro de cada polígono.

Descripción del método de pronóstico

El método empleado aquí ha sido recientemente propuesto y testado hasta ahora con datos de todo el mundo y de

varias regiones de California (13). Sirve para pronosticar en qué regiones ocurrirán la mayoría de los terremotos, pero no informa del lugar exacto, ni de cuándo ocurrirán éstos o de la magnitud que tendrán. Como en otros métodos relacionados (4-6), consiste en dibujar círculos en torno a los epicentros de terremotos previos, y se espera que los terremotos futuros tiendan a ocurrir preferentemente dentro de ellos. La novedad del método aquí usado (13) es escoger ese radio basándose en las distancias entre terremotos, y así asignarle un significado físico. La hipótesis básica es que la distribución de distancias que separan a los terremotos ya ocurridos se puede extrapolar para averiguar a qué distancia de ellos ocurrirá, con mayor

El mapa consta de círculos en torno a los epicentros de terremotos previos, y se espera que los terremotos futuros tiendan a ocurrir preferentemente dentro de ellos

probabilidad, el siguiente terremoto. Las principales mejoras prácticas de este procedimiento con respecto a otros anteriores (4-6) consisten en que pronostica un porcentaje de terremotos fijado de antemano, y los mapas que produce se van refinando con el tiempo (13).

Este pronóstico es de tipo binario: se espera que el siguiente terremoto ocurra en unas zonas marcadas en el mapa, y no se espera fuera de ellas. No hay término medio entre estos dos extremos. Si el siguiente terremoto se genera dentro de las zonas marcadas, se considera que se ha pronosticado correctamente, y lo contrario si ocurre fuera. El objetivo es pronosticar el mayor número de terremotos marcando la menor área posible dentro de la región de estudio. Los pronósticos binarios se usan con frecuencia en meteorología, en afirmaciones tales como: «mañana lloverá (o no lloverá) en esta ciudad». Debido a la sencillez con la que se enuncian, se pueden evaluar estadísticamente de manera rigurosa (3, 24).

El método puede explicarse en detalle sin necesidad de emplear fórmula alguna, con las siguientes instrucciones (13):

- Se escoge una región de estudio y una fecha de inicio para el pronóstico. Sólo se considerarán los terremotos originados en esa región, a partir de esa fecha, de magnitud mayor o igual a la de completitud en cada momento.
- Se fija el porcentaje de terremotos que se desea pronosticar. Cuanto mayor



Agencia EFE

Tabla 1. Coordenadas de los vértices de los polígonos usados para delimitar las regiones de estudio.

Península Ibérica y Baleares		Canarias	
Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
3.6	43.0	-17.0	29.5
4.8	39.8	-13.0	29.5
-2.9	35.0	-13.5	28.0
-9.5	36.5	-17.0	27.0
-10.0	39.0	-18.5	27.5
-9.8	43.7	-18.5	29.0
-8.0	44.5		
-2.0	44.0		

sea, mayores deberán ser las áreas marcadas en el mapa. En este artículo se escoge un 90%.

- Inicialmente no se tienen datos sobre dónde ocurrirán los siguientes terremotos, así que se marca toda la región. Los dos primeros terremotos serán así trivialmente «pronosticados».
- Cuando ya han ocurrido dos terremotos o más, justo después de cada terremoto se hace lo siguiente:
 - Comprobar si el terremoto ocurrió donde se esperaba, y calcular el porcentaje de terremotos pronosticados.
 - Medir, para todos los epicentros, la distancia de cada uno a su «vecino» más próximo.
 - De entre todas esas distancias, escoger el percentil 90: la distancia tal que el 90% de todas sean menores o iguales que ella.
 - Dibujar un círculo en torno a cada uno de los epicentros de terremotos ya ocurridos, usando la distancia calculada en el punto anterior como radio. A modo de precaución, si se ha pronosticado menos del 90% de los terremotos, no se deja que el nuevo radio sea menor que el anterior.

Por tanto, el mapa resultante se testa con cada terremoto y se modifica justo después: se añade un nuevo círculo en torno a su epicentro y generalmente se

Tabla 2. Magnitudes mínimas de los terremotos utilizados en cada región, a partir del día que se indica.

Comienzo (día/mes/año)	Magnitud mínima	
	Península Ibérica y Baleares	Canarias
1/1/1985	3.4	2.9
1/1/1992	3.2	2.8
1/1/2001	2.5	2.3
2/6/2003	2.5	2.2

cambia el radio de todos los círculos. Cuantos más terremotos ocurren en la región, más densamente se apiñan. Por eso las distancias entre ellos disminuyen, y lo mismo suele ocurrir con el radio seleccionado. En consecuencia, como se muestra en la siguiente sección, las áreas marcadas tienden a reducirse: el mapa, por tanto, se refina automáticamente, de manera natural.

Resultados

Se ha aplicado retrospectivamente el método descrito en la sección anterior, por separado, a las dos regiones investigadas (tabla 1), para terremotos ocurridos entre el 1 de enero de 1985 y el 30 de abril de 2009, de magnitud mayor o igual a la indicada en la tabla 2. En total,

se trata de 3.390 terremotos en la región ibérica y de 340 en la canaria.

Los resultados se muestran en las figuras 4 a 6, y el mapa final, tal como queda tras el último terremoto considerado, se representa en la figura 7. Para medir las distancias entre epicentros, la forma de la Tierra se ha aproximado por una esfera de 6371 kilómetros de radio. Los mapas de las figuras 1, 4, y 7 se representan en proyección sinusoidal, en la que el área de cualquier región es proporcional a la que tiene en la realidad. Eso permite apreciar visualmente, de manera fiable, la extensión de las áreas marcadas.

En la figura 4 se representan, como ejemplo, los mapas de la región ibérica, tal como hubiesen sido justo antes de los dos terremotos de mayor magnitud ocurridos allí en el periodo investigado. Ambos eventos se hubiesen originado

El método de pronóstico se testa satisfactoriamente, de manera retrospectiva, con terremotos ocurridos entre enero de 1985 y abril de 2009

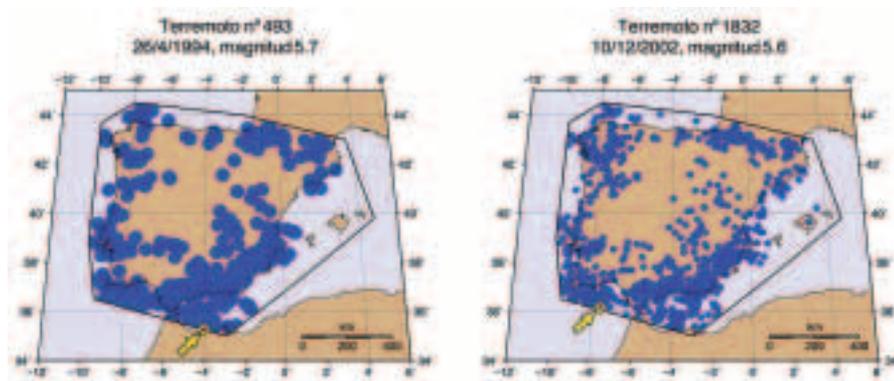


Figura 4. Aspecto que hubiesen presentado los mapas de pronóstico de haberse podido elaborar justo antes de los dos terremotos de mayor magnitud registrados en el periodo analizado. Los círculos azules están centrados en epicentros previos e indican las regiones donde se esperaba que ocurriese el siguiente terremoto con un 90% de probabilidad. Ambos eventos hubiesen ocurrido dentro de éstas, y muy cerca del borde sur del polígono de estudio.

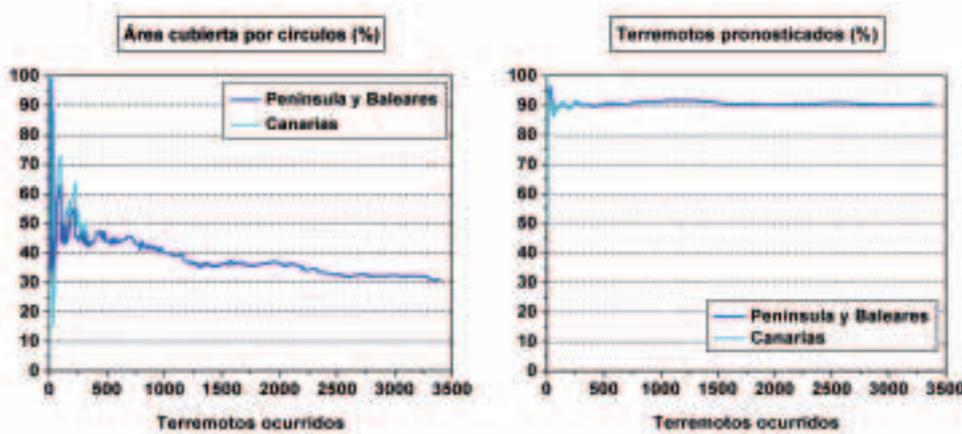


Figura 5. Resultados del pronóstico retrospectivo, de enero de 1985 a abril de 2009. Izquierda: área ocupada por círculos en los mapas de pronóstico. Conforme más terremotos han ocurrido, más círculos se añaden al mapa, a la vez que tiende a reducirse el radio de todos ellos. Las regiones marcadas tienden, con el tiempo, a ocupar un área menor, por lo que el mapa se va refinando cada vez más. Derecha: porcentaje de terremotos pronosticados. Debiera ser del 90%, como efectivamente se observa.

dentro de las zonas marcadas. Se puede apreciar que en el segundo mapa hay más círculos, pero éstos son más pequeños, y así el área marcada es menor (36.2% frente a 44.2%).

La evolución temporal del pronóstico se muestra en la figura 5. En el cuadro izquierdo se representa el área marcada por círculos. Inicialmente ésta es elevada y varía de manera irregular, pero pronto comienza a reducirse paulatinamente. El porcentaje de terremotos pronosticados (independientemente de su magnitud) se ha representado en el cuadro derecho. Tras las oscilaciones iniciales, se mantiene perfectamente estable en torno al 90% deseado, lo que confirma la hipótesis en la que se basa el método. El resultado también implica que el método optimiza el área marcada en cada momento, ajustándola automáticamente para pronosticar el porcentaje deseado de todos los terremotos. El porcentaje de aciertos es considerablemente mayor que el del área marcada, lo que confirma estadísticamente la capacidad predictiva del procedimiento. Además, al seguir pronosticándose el mismo porcentaje de terremotos, pero marcando cada vez menos área, el mapa mejora progresivamente.

El porcentaje de terremotos pronosticados en función de la magnitud se ha representado en la figura 6. El método pronostica aproximadamente el 90% de los terremotos, independientemente de la magnitud de éstos. La ligera diferencia para los terremotos de magnitud mayor o igual a cinco no es estadísticamente significativa, debido a que sólo hay trece eventos (once de los cuales, el 84.6%, hubieran sido pronosticados).

El mapa final, actualizado a 30 de abril de 2009, se muestra en la figura 7. En la región ibérica, los círculos tienen un radio de 10.9 kilómetros, y ocupan un 30.9% del área del polígono. En la región canaria, tienen un radio de 13.7 kilómetros y



El 15 de junio de 1964 un terremoto de media intensidad sacudió la provincia de Granada, provocando daños en las viviendas de varias localidades.

Agencia EFE

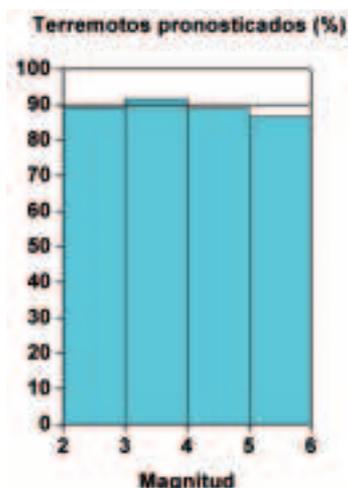


Figura 6. Porcentaje de terremotos pronosticados en el ensayo retrospectivo, para diferentes magnitudes. Se han considerado conjuntamente los resultados de las dos zonas de estudio (Península y Baleares, y Canarias). El método hubiese pronosticado aproximadamente el 90% de los terremotos, independientemente de la magnitud de éstos.

ocupan un 45.5% del área del polígono. Sumando el área de los dos polígonos, el porcentaje global ocupado por círculos es el 32.4%.

Conclusiones

En este artículo se demuestra, para la península Ibérica, Baleares y Canarias, que es posible pronosticar dónde ocurrirán futuros terremotos simplemente teniendo en cuenta dónde han ocurrido terremotos previos. Como en otras regiones donde se ha utilizado el mismo método (13), se observa que, marcando un área relativamente pequeña en la región investigada, se puede pronosticar un porcentaje de terremotos fijado de antemano (figura 5), independientemente de la magnitud de estos (figura 6).

El mapa resultante es más complejo y detallado (figura 7) que el de las zonas sísmicas oficialmente consideradas (figura 2). Se observa además que, fuera de estas zonas, hay numerosos lugares que aquí sí se indican como capaces de generar futuros terremotos. Esta investi-

Las regiones marcadas tienden, con el tiempo, a ocupar un área menor, por lo que el mapa se va refinando con el tiempo

gación sugiere que, para estimar el riesgo sísmico, pudiera ser conveniente considerar con más detalle dónde exactamente han ocurrido terremotos previos, calculando para esos lugares concretos el mayor riesgo. En esta línea ya se ha publicado al menos un trabajo para la península Ibérica (25).

Asimismo, estos resultados corroboran la importancia de detectar y localizar cuantos más terremotos y de menor magnitud, mejor (26). Ello permitiría, en un futuro, realizar mapas de pronóstico más refinados. En el interior de la península Ibérica y en el archipiélago canario los datos son completos hasta magnitudes pequeñas (figura 3). Pero no así en la periferia peninsular, precisamente donde son más frecuentes los terre-

mos de gran magnitud. Por ejemplo, los dos eventos mayores de los aquí estudiados (figura 4). O también el gran terremoto de Lisboa de 1755, que se originó al suroeste de la península Ibérica y causó gravísimos daños en Portugal y España (27). Por ello, convendría seguir invirtiendo en mejorar y ampliar las redes sísmicas para poder localizar más terremotos y con mayor precisión.

La limitación principal del mapa calculado (figura 7) es que, una vez remitido a su publicación (el 15 de mayo de 2009), no será actualizado conforme ocurran nuevos terremotos. Esto difiere del ensayo realizado con datos desde el 1 de enero de 1985 hasta el 30 de abril de 2009, en el que el mapa se actualizaba tras cada nuevo evento. Para que el mapa sea efectivo con terremotos futuros, el porcentaje de terremotos que ocurran dentro de las regiones marcadas (idealmente en torno al 90%) debiera ser considerablemente mayor al porcentaje de área que éstas ocupan (el 32.4%). Esto habrá de ser testado más adelante, ya que siempre es posible que ocurran terremotos relevantes

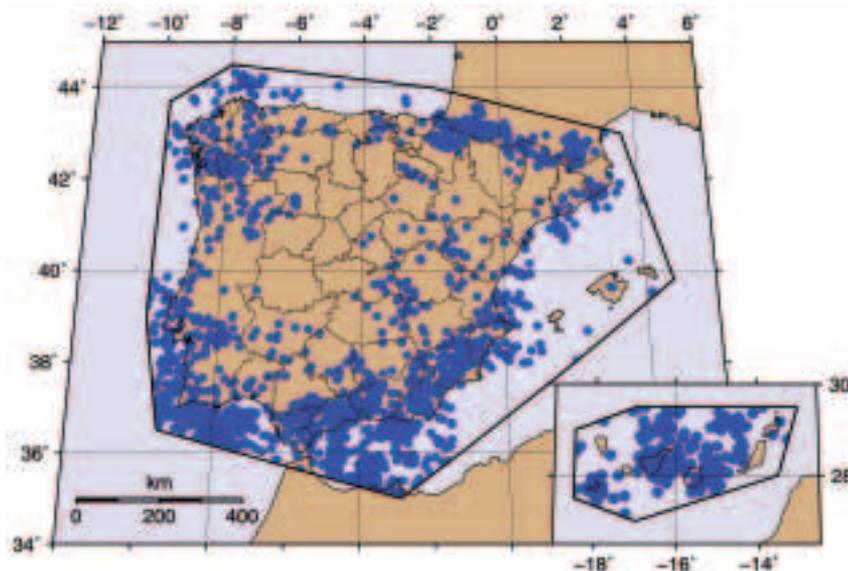


Figura 7. Mapa de pronóstico de la localización de futuros terremotos en la península Ibérica, Baleares y Canarias. Como referencia, se han representado los límites de las provincias españolas. Idealmente, en torno a un 90% de los epicentros ocurridos desde mayo de 2009 en adelante (de magnitud mayor o igual a 2.5 en el polígono ibérico, y a 2.2 en el canario) debieran localizarse dentro de las áreas marcadas en azul oscuro.