

REFLEXIONES EN TORNO A LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO. EL PAPEL DE LA UNIVERSIDAD

M^a Belén Benito Oterino
Catedrática de la Universidad Politécnica de Madrid

PROLOGO

Este artículo está dedicado a Margarita Salas, una científica de excelencia, pionera en España y referente para muchas investigadoras que hemos visto en ella un ejemplo a seguir, animándonos a cultivar nuestra vocación científica y a perder el miedo a adentrarnos en un terreno donde pocas mujeres habían llegado...

El artículo se centra en resolver algunas cuestiones sobre el fenómeno sísmico y a presentar medidas de mitigación del correspondiente riesgo, exponiendo reflexiones sobre la problemática de la investigación en esta temática y sobre el papel que puede jugar la universidad para contribuir al avance del estado del arte. Se presentan finalmente, a modo de ejemplo, algunos proyectos desarrollados por el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica (GIIS) de la Universidad Politécnica de Madrid.

1. INTRODUCCION

Los terremotos son uno de los fenómenos naturales que conllevan mayor potencial destructor, con mayor coste de vidas y pérdidas materiales, lo que hace que el riesgo sísmico sea uno de los riesgos naturales que más atención social reclaman. Dentro de ese potencial destructor hay que considerar no sólo los daños estructurales asociados directamente al sismo, sino también otros daños indirectos derivados de fenómenos tales como la licuefacción, los deslizamientos de laderas y los tsunamis. La catástrofe provocada por el tsunami del Sudeste asiático, en Diciembre de 2004 o el tsunami causado por el terremoto de Japón en marzo de 2011, que dio lugar al accidente de la Central Nuclear de Fukushima, dan buena cuenta de ello (Figura 1). Los terremotos que generaron esas catástrofes no pudieron evitarse, pero el coste de vidas humanas podría haberse paliado con políticas de mitigación de riesgo y sistemas de alerta.

Figura 1. Imágenes del área devastada por el tsunami causado por el terremoto del 11 de marzo de 2011 en Sendai (Japón) y del posterior incendio en la Central Nuclear de Fukushima.

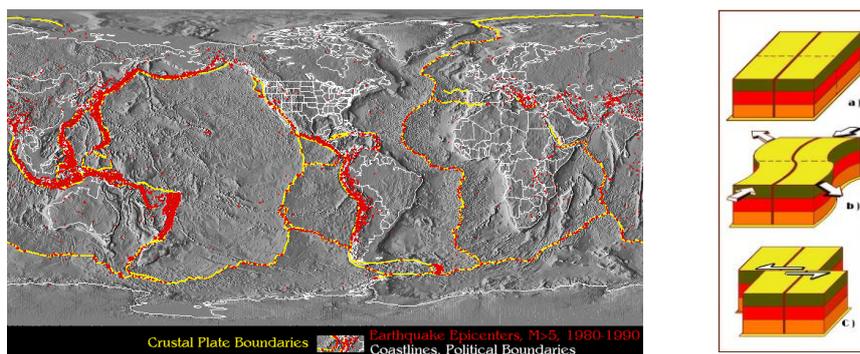


Antes de entrar en reflexiones sobre el papel de la sociedad, y en particular de la universidad, en la definición de acciones para mitigación de este riesgo, conviene aclarar algunas cuestiones técnicas que nos permitan situar mejor los posibles campos de actuación para prevenir la catástrofe.

Esencialmente hay tres cuestiones que pueden considerarse *clave* referidas a la ocurrencia de terremotos: ¿Dónde? ¿Cómo? y ¿Cuándo?

La primera cuestión- *dónde*- encuentra una respuesta en el marco de la Tectónica de Placas. La mayor parte de los epicentros de terremotos en todo el mundo están distribuidos en los márgenes de placas tectónicas, donde tienden a concentrarse los esfuerzos debidos al movimiento de las mismas, y donde se localizan la mayoría de las fallas geológicas, cuya ruptura súbita produce el movimiento sísmico. La representación de epicentros de terremotos de todo el mundo muestra los márgenes tectónicos, donde se produce el choque de placas y donde se localizan el 80% de terremotos de todo el mundo. (Figura 2 izquierda)

Figura 2 (Izquierda) Mapa de epicentros de terremotos de todo el mundo en la década de 1980 a 1990. (Derecha) Ilustración de la teoría del rebote Elástico (Reid, 1910)



La segunda cuestión -*cómo*- es satisfactoriamente explicada por la teoría del Rebote Elástico (Reid, 2010). Según ésta, las fuerzas se van acumulando en una falla geológica, hasta que se supera el límite de resistencia del material y se produce la ruptura (Figura 2 derecha). La energía acumulada durante años se libera bruscamente en cuestión de segundos, y en el proceso se genera una radiación que se propaga en forma de ondas elásticas desde el foco o hipocentro hasta la superficie de la tierra. En los lugares alcanzados con suficiente energía se produce la vibración o sacudida sísmica.

La última cuestión -*cuando*- es más difícil de responder. En la mayor parte de las fallas los movimientos de producen siguiendo un cierto ciclo sísmico, pero éste no responde a un intervalo de tiempo exacto y es difícil de precisar. Hoy por hoy no es posible determinar cuál será el momento de ocurrencia del próximo evento en una cierta zona, ni su tamaño.

Considerando lo anterior, la predicción sísmica, entendida como la estimación del momento de ocurrencia del terremoto y de su magnitud, con un margen suficientemente estrecho como para tomar acciones a corto plazo (esencialmente evacuar a la población), no puede plantearse de un modo satisfactorio en la actualidad. En esta línea se invirtieron muchos esfuerzos en la década de los años 70 y 80, pero la mayor parte de las predicciones fracasaron y ello motivó una mayor inversión en otra línea de prevención de daños. A ésta es a la que actualmente dedica mayor esfuerzo la comunidad internacional, lo que supone prevenir los daños que pueden causar los sismos probables a mediano y largo plazo, diseñando adecuadamente.

¿ES EL TERREMOTO UNA CATÁSTROFE NATURAL?

El terremoto es un fenómeno natural, pero la catástrofe no es natural. Como se ha indicado, la ocurrencia de un terremoto en un lugar responde a la ruptura en una falla geológica y obviamente tal ruptura no puede evitarse. Sin embargo el desastre sí puede paliarse, o al menos reducirse, adoptando medidas de diseño sismorresistente y con una adecuada planificación urbanística y territorial. De hecho, el impacto del terremoto suele ser mayor en los países más subdesarrollados, donde terremotos de moderada magnitud pueden causar enormes daños, debido a que las construcciones son altamente

vulnerables. En cambio, países con una buena política de prevención en zonas sísmicamente activas sufren a veces la ocurrencia de grandes sismos, con escasas pérdidas humanas y materiales. Los terremotos ocurridos en Haití y Chile en 2010, en un plazo de apenas un mes, son buen ejemplo de lo que tratamos de ilustrar: el daño no depende solo de la intensidad del movimiento, sino también, de forma decisiva, de la vulnerabilidad de las edificaciones.

El terremoto ocurrido en Haití, el 12 de enero de 2010, fue un terremoto de magnitud Mw 7.0, con epicentro en la falla de Enriquillo, al sur del país, y causó 300.000 víctimas mortales, 350.000 heridos, dejando a millón y medio de personas sin hogar (Figura 3). El 27 de febrero del mismo año tuvo lugar otro terremoto en Chile, localizado a 150 km al noreste de Concepción con magnitud Mw 8,8. Este sismo generó un tsunami y como consecuencia del mismo perdieron la vida cerca de 500 personas (Figura 4). Si comparamos el tamaño de estos dos terremotos, el de Chile fue casi 900 veces mayor en términos de energía, dado que, por la escala de medida, al aumentar un grado la magnitud la energía se multiplica por 30. Sin embargo fue 600 veces menor en término de víctimas mortales, y además en Chile estas víctimas no fueron causa directa del terremoto sino del tsunami que le sucedió. La explicación de este hecho radica precisamente en la diferencia de la vulnerabilidad entre los dos países: Chile tiene una buena preparación ante el fenómeno sísmico, con un estricto nivel de diseño sismorresistente, mientras Haití no tenía ninguna preparación ni existía ningún código sísmico que regulara el diseño estructural antes de la catástrofe. De hecho, colapsó hasta el palacio presidencial...

Figura 3. Epicentro del terremoto del 12 de enero de 2010 en la falla de Enriquillo (Haiti), con magnitud Mw 7.0 e imágenes de daño causado en Puerto Príncipe.



Figura 4. Epicentro del terremoto del 27 de febrero de 2010 al noreste de Concepción (Chile) con magnitud Mw 8.8 e imágenes de simulación y daño causado por el tsunami que sucedió al terremoto.



2. ¿ES LO MISMO PELIGROSIDAD Y RIESGO SÍSMICO?

Conviene distinguir estos conceptos para saber qué es lo que se puede evitar en este campo y cómo se deben canalizar las medidas de actuación. La peligrosidad representa la probabilidad de que se produzca un determinado movimiento, independientemente de que éste ocurra en un área densamente poblada, en el desierto o en un océano; es decir, independientemente del daño que pueda causar. La

peligrosidad es inherente al fenómeno sísmico en sí, y por tanto no se puede reducir, únicamente se puede cuantificar, con cierta incertidumbre. El riesgo sísmico es el producto de varios factores: la peligrosidad, la vulnerabilidad (o susceptibilidad de la edificación a sufrir daño), la exposición (o densidad de estructuras y personas) y el valor de coste de reparación de pérdidas. Obviamente la vulnerabilidad es mayor para las construcciones más pobres o con peor diseño. Teniendo en cuenta que es el producto de factores el que resulta determinante en el riesgo, podemos encontrar una zona de baja-moderada peligrosidad, pero con alta vulnerabilidad, que resultaría entonces con alto riesgo. Y viceversa, una zona de alta peligrosidad con vulnerabilidad reducida sería de bajo riesgo. Por tanto, el riesgo sísmico sí se puede reducir, disminuyendo la vulnerabilidad de las estructuras y con una adecuada planificación urbanística. *Formula*

3. MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.

Ante la imposibilidad de predecir el fenómeno con un margen pequeño de tiempo, para tomar acciones a corto plazo, el diseño sismorresistente de estructuras es hoy por hoy la medida más eficaz para prevenir los daños. Su fundamento radica en diseñar éstas de forma que resistan los máximos movimientos esperados durante su tiempo de vida útil. Ello requiere, en primer lugar, la evaluación de la peligrosidad sísmica para determinar cuáles son esos máximos movimientos, cómo se caracterizan y cuál es su recurrencia. Esta es la esencia de las normativas sismorresistentes, que establecen una serie de criterios para el diseño de las construcciones, considerando un movimiento probable en función de la ubicación del emplazamiento. El diseño sismorresistente constituye una medida para disminuir la vulnerabilidad y por tanto para reducir el riesgo sísmico.

Otra importante medida es la elaboración de planes de emergencia, que garanticen la actuación rápida y eficaz durante el evento, a fin de lograr la salvaguarda de vidas humanas facilitando el rescate inmediato después del sismo. Estos planes deben establecer también medidas para una rápida recuperación de la comunidad o población afectada, lo que requiere a su vez aumento de su resiliencia.

Los planes de emergencia se sustentan en resultados de estudios de riesgo sísmico, es decir en estimaciones del grado de pérdidas esperadas ante eventos futuros que permitan dimensionar los recursos necesarios para hacer frente a la emergencia.

4. LA SITUACIÓN EN ESPAÑA

España no está exenta de riesgo sísmico. En época histórica varias zonas de nuestra geografía se han visto afectadas por terremotos destructores, especialmente Andalucía, Levante y Pirineos. La tabla 1 indica los terremotos que han tenido lugar con epicentro en España, con Intensidad I (MSK) mayor o igual a VIII-IX, lo que supone ya sismos altamente destructores. Para una correcta interpretación, conviene aclarar las diferencias entre Intensidad y Magnitud. La intensidad es un parámetro que se mide a partir de los efectos causados por el terremoto y la Escala MSK diferencia 12 grados, que oscilan desde I = levemente sentido hasta XII = destrucción total. La magnitud, sin embargo, es un parámetro instrumental que se mide a partir de la amplitud de las ondas registradas en un sismograma (o de la duración) y cuya escala más generalizada de medida actualmente es la magnitud momento, Mw. Esta escala no tiene límite superior, si bien el mayor sismo registrado de la historia fue el de Chile de 1960, con Mw = 9.5.

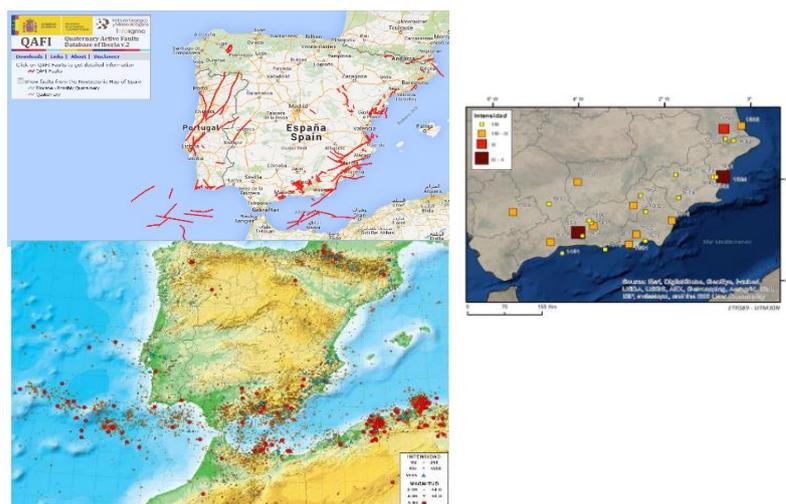
El último de estos terremotos tuvo lugar en diciembre de 1884, con epicentro en Arenas del Rey, (Granada), cuya población que se vio afectada con intensidad X en la escala MSK, de 12 grados. Este terremoto, conocido como terremoto de Andalucía, causó alrededor de 1.000 víctimas mortales.

La Figura 5 muestra la tectónica responsable de la sismicidad de la Península Ibérica, las principales fallas geológicas cartografiadas, la distribución de epicentros de terremotos en los últimos 30 años y los sismos más destructores en época histórica.

Tabla 1. Terremotos destructores ocurridos con epicentro en España, con Intensidad $I \geq VIII-IX$ (www.ign.es)

Fecha	Latitud	Longitud	Intensidad	Localización
15/05/1427	422.000	25.000	VIII-IX	Olot.GI
02/02/1428	423.500	21.667	IX-X	Queralbs.GI
24/04/1431	371.333	-36.333	VIII-IX	S. Granada
09/11/1518	372.333	-18.667	VIII-IX	Vera.AL
22/09/1522	369.667	-26.667	VIII-IX	W.Alhama de Almeria.AL
30/09/1531	375.333	-27.333	VIII-IX	Baza.GR
09/10/1680	368.000	-46.000	VIII-IX	NW. de Majlaga
23/03/1748	390.333	-0.6333	IX	Estubeny.V
25/08/1804	367.667	-28.333	VIII-IX	Dalias.AL
21/03/1829	380.833	-0.6833	IX-X	Torre Vieja.A
25/12/1884	370.000	-39.833	IX-X	Arenas del Rey.GR

Figura 5. (Izquierda) Fallas tectónicas cartografiadas en la Península Ibérica y áreas adyacentes (arriba), según la Base de Datos QAFI (Fallas activas del Cuaternario, García-Mayordomo et al, 2012) y Mapa de sismicidad de la zona (abajo) (www.ign.es). Derecha) Mapa de epicentros de los mayores sismos históricos ocurridos en España, altamente destructores, con $I \geq VIII$



En promedio, se han registrado o reportado uno o dos sismos destructores por siglo, con Intensidad mayor o igual a VIII. Durante el siglo XX no se produjo ningún sismo destructor, pero en lo que llevamos del siglo XXI ya hemos vivido un terremoto que, aunque de moderada magnitud, fue bastante dañino y causó 9 víctimas mortales. Ocurrió el 11 de mayo de 2011 con epicentro a 3 km de la ciudad de Lorca. A pesar de su moderada magnitud, Mw 5.1, registró aceleraciones muy elevadas, del orden de 0.37 g, debido a que su hipocentro fue muy superficial (profundidad 3 km) y la población estaba situada justo encima de la falla de Alhama de Murcia, que fue la fuente del terremoto (Figura 6). Esta situación ilustra un hecho importante: el movimiento depende no solo de la magnitud, sino de la distancia a la fuente sísmica y se amplifica mucho sobre el plano de ruptura. Si tenemos poblaciones próximas a la falla que desencadena el terremoto, puede ocurrir lo que sucedió en Lorca: sismos pequeños o moderados pueden causar importantes daños. Algo muy relevante en el caso del sur y sureste de España, ya que muchas poblaciones se encuentran situadas sobre o muy próximas a fallas activas.

5. PROBLEMÁTICA SOBRE LA INVESTIGACIÓN EN MATERIA DE PELIGROSIDAD Y RIESGO SÍSMICO

La investigación en estas materias se encuentra en la mayor parte de los países (y de forma más acusada en los menos desarrollados) con una problemática en la que cabe diferenciar un ámbito político, otro “de infraestructura” y un tercer ámbito técnico. Exponemos a continuación algunas reflexiones acerca de los problemas más destacables en cada uno de estos entornos.

En un ámbito político

La investigación hacia la mitigación del riesgo sísmico requiere disponer de políticas preventivas y no sólo de actuaciones “*el día D*”. Las acciones post-evento son necesarias, pero se dirigen ya a reparar los daños, no a establecer medidas para evitarlos. Son acciones de reconstrucción y ayuda a las víctimas ante el daño causado por el evento, pero ese daño posiblemente podría haberse reducido con políticas preventivas. Dichas políticas requieren una concienciación social, muchas veces difícil de lograr, sobre todo cuando el fenómeno cuyo riesgo se trata de paliar es infrecuente. Esto es precisamente lo que sucede en España ante el riesgo sísmico. Aunque en el pasado han ocurrido terremotos destructores, no ha habido ninguno que pueda calificarse así en el siglo XX y en lo que llevamos del siglo XXI, a excepción del sismo de Lorca en 2011 que, si bien causó notable daño, no puede considerarse destructor. Esto hace perder la conciencia social del fenómeno, porque la memoria humana es más corta que la memoria geológica, que sin embargo nos advierte de que un sismo de moderada magnitud puede ocurrir en muchos puntos de nuestra geografía y causar graves daños. A este respecto los sismólogos nos encontramos con frecuencia con la reticencia de las instituciones a financiar proyectos de mitigación del riesgo antes de que ocurran terremotos en una zona. Sin embargo, una vez ocurrido un sismo que cause suficiente alarma, la demanda de tales proyectos es espontánea y casi inmediata. Cuando justamente después del terremoto, en principio, disminuye la probabilidad de ocurrencia de un nuevo evento en la misma zona. Es un hecho paradójico, pero difícil de evitar por la propia naturaleza humana.

Figura 6. Localización del epicentro del sismo del 11 de marzo de 2011 en la falla de Alhama de Murcia e imágenes de los daños causados en Lorca.



Por otra parte, no existen suficientes cauces de transferencia de los resultados de nuestras investigaciones hacia los organismos responsables de la mitigación del riesgo. Esto hace que los avances en el estado del arte frecuentemente queden solo recogidos en *papers* con más o menos valor científico, sin llegar a formar parte de planes de construcción y de emergencia. De esta forma, el fin último de muchos de los proyectos que se realizan no llega a materializarse, ya que por muy importantes que sean los resultados, si éstos no se incluyen en las políticas de mitigación, su utilidad de alguna forma se pierde. Es necesario al respecto que exista una mayor interacción entre la Administración y la Universidad u otros centros de investigación, para asegurar una mejor transferencia de resultados hacia medidas de interés social.

En el ámbito de “infraestructura”

Hay otros problemas, especialmente en el marco universitario -que calificamos de *infraestructura*- que se presentan en cualquier campo de la investigación, no solo en el de la peligrosidad y el riesgo sísmico, pero que obviamente también nos afectan. Esencialmente son los siguientes:

1) Falta de garantía de continuidad para los becarios formados en el tema, lo que hace que muchos de ellos abandonen el grupo de trabajo con alto grado de especialización. Esto, además de ser una causa de frustración personal para ellos, supone una pérdida de potencial humano que perjudica enormemente la calidad de la investigación. El inicio de nuevos proyectos requiere frecuentemente contratar nuevo personal que hay que comenzar a formar, y la dinámica de los grupos es un continuo “*volver a empezar*”. Para evitar este problema sería necesaria una política de garantía de continuidad para el personal que alcanza un cierto grado de especialización, y aunque en España existen programas como el Ramón y Cajal o Juan de la Cierva, actualmente son insuficientes para cubrir la demanda de una plaza fija por parte de investigadores cualificados.

2) No existe en la universidad una infraestructura para distribuir el trabajo eficientemente como en el entorno empresarial. El investigador ejerce labores de gestión, secretaría, contabilidad, relaciones públicas, etc., aparte del estudio del problema técnico en sí, la propuesta de soluciones y la divulgación de resultados. Todo ello produce una dispersión que actúa en perjuicio de la calidad de la investigación. Sería importante tomar conciencia de este problema y organizar una estructura que facilitara el reparto de tareas y descargara al investigador de labores que consumen una buena parte de su tiempo y para las que en realidad no está preparado.

3) La burocracia de los proyectos tiende a multiplicarse, con el consiguiente tiempo que ello conlleva en perjuicio de la propia investigación. Además de los trámites de gestión, contabilidad y justificación de gastos, frecuentemente se requieren memorias justificativas, informes de seguimiento e informes finales. Y mientras se informa no se trabaja en obtención de nuevos resultados. Habría que hacer una reflexión sobre la eficacia del aumento de la burocracia en la optimización de los resultados de la investigación, si ese es el fin que se persigue.

En un ámbito científico

En la investigación en peligrosidad y riesgo sísmico también se presentan problemas estrictamente técnicos, que debido a la falta de recursos humanos y materiales suelen ser mayores en las zonas menos desarrolladas, aunque en muchas de ellas el fenómeno sísmico cobra especial importancia. Esbozamos alguno de estos problemas:

1) Falta de conocimiento preciso sobre la geología, tectónica y sismicidad histórica, que nos permita identificar estructuras capaces de generar nuevos sismos y conocer las zonas donde el riesgo es mayor.

2) Ausencia de suficientes registros instrumentales para caracterizar el movimiento de los mayores sismos que pueden esperarse en una zona y que condicionan su riesgo sísmico. El problema es debido, en parte, a que la instrumentación correspondiente se ha desarrollado prácticamente en los últimos 50 años, y en ese periodo puede no haberse registrado el mayor terremoto potencial de la zona. Pero también es debido a que muchas veces la densidad de estaciones es insuficiente para asegurar el registro del movimiento en cualquier parte, y eso hace que a menudo se pierda información muy útil para avanzar en el conocimiento. Sería necesaria una mayor inversión en instrumentación, además de más recursos humanos para su estudio, algo especialmente notorio en países de alto riesgo y sin muchos recursos materiales, como Centroamérica y Sudamérica, o buena parte del continente Asiático. Este tema debería ser objeto de planteamiento en las políticas de cooperación.

3) Falta de información en las bases de datos de la administración (catastro, institutos nacionales de estadística, etc.) para la asignación de vulnerabilidades sobre la edificación, que permita conocer mejor el daño que pueden sufrir las estructuras ante un cierto movimiento y con ello cuantificar el riesgo. Hay una evidente necesidad de recoger datos sobre tipología estructural que faciliten la asignación de vulnerabilidades a partir de los censos de viviendas.

4) Falta de catalogación de toda la información de los sismos ocurridos en una determinada zona, referente tanto a los daños causados, como al movimiento registrado. Esta información, que sería sumamente útil para prevenir daños de sismos futuros, frecuentemente está dispersa, desordenada, o simplemente no existe. Esto hace que no puedan extraerse lecciones de sismos previos, que ayudarían a mejorar el conocimiento del potencial sísmico y de su potencial destructor, con la consiguiente adopción de medidas de mitigación. Para evitar que esto se siga produciendo es conveniente diseñar cuestionarios macrosísmicos homologados y repartirlos rápidamente tras el evento. Esos datos deberán ser después catalogados y organizados en bases de datos que sirvan de información de partida para futuros estudios de riesgo. Conviene tener en cuenta que las *lecciones aprendidas* de eventos pasados son una de las mejores fuentes de información para evitar daños de eventos futuros.

6. EJEMPLO DE POSIBLES INVESTIGACIONES EN MATERIA DE RIESGO SÍSMICO EN EL AMBITO UNIVERSITARIO. PROYECTOS DESARROLLADOS EN LA UPM (ETSITGC).

A pesar de la problemática indicada, hay una línea de investigación abierta en materia de peligrosidad y riesgo sísmico, en la que últimamente se están produciendo notables avances en todo el mundo. Y precisamente la universidad es una institución adecuada para el desarrollo de proyectos de investigación en esta línea, proyectos que pueden abordarse bien desde el campo de Ciencias de la Tierra, o bien desde la Ingeniería de estructuras. A modo de ejemplo, mostramos una línea de investigación en ingeniería sísmica que se ha venido consolidando en la ETSI de Topografía, Geodesia y Cartografía de la UPM durante los últimos 20 años.

En este contexto se han desarrollado numerosos proyectos de investigación financiados por organismos como el Consejo de Seguridad Nuclear, ENRESA, el Instituto Geográfico Nacional, el anterior Ministerio de Ciencia y Tecnología, el Ministerio de Fomento, la Unión Europea, AECID, OTAN y el actual Ministerio de Educación y Ciencia. Cabe destacar las siguientes pautas concretas de actuación:

1) Evaluación de la Peligrosidad sísmica y caracterización del movimiento del suelo para el diseño sismorresistente de las edificaciones.

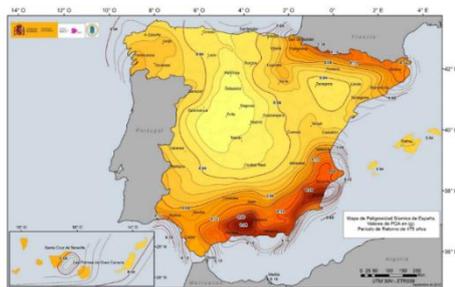
2) Evaluación del riesgo sísmico y estimación de las pérdidas esperadas para la elaboración de planes de emergencia y políticas de toma de decisiones.

En ambas líneas se ha trabajado en dos vertientes, que se comentan a continuación.

Una primera vertiente de investigación propiamente dicha, en la que se han desarrollado metodologías acordes al estado actual del arte, por medio de tesis doctorales y proyectos de investigación del plan nacional de I+D+i, fruto de los cuales se han generado numerosos *papers* científicos. En la página Web del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica de la ETSITGC puede encontrarse más información al respecto (www.topografia.upm.es/grupos/sismo)

Una segunda vertiente de proyectos de ejecución, destinados a obtener resultados reclamados por administraciones públicas para definir políticas de mitigación del riesgo sísmico. Entre estos cabe destacar el proyecto de elaboración del mapa de peligrosidad sísmica de España para la revisión de la norma sismorresistente NCSE-02 (Figura 7) y los estudios de riesgo sísmico de 4 Comunidades

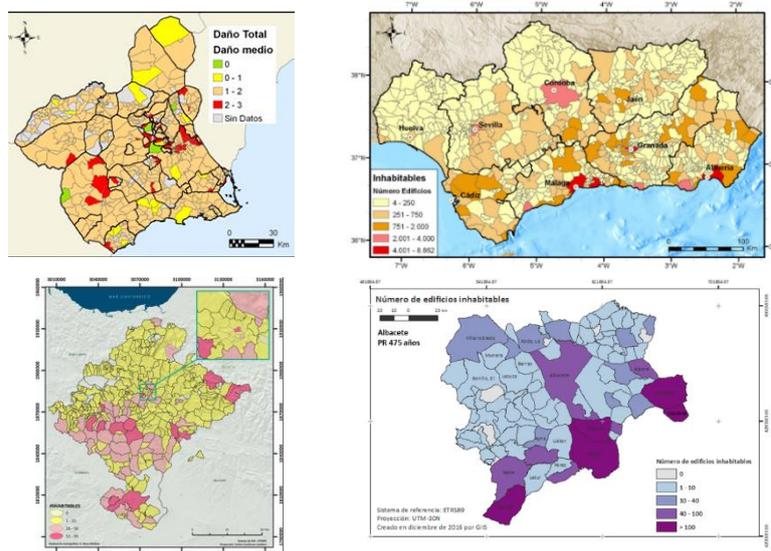
Autónomas para los correspondientes planes de emergencia de Protección Civil: Región de Murcia (Plan SISMIMUR), Andalucía (Plan SISMOSAN), Navarra (Plan SISNA) y Castilla-La Mancha (plan SISMICAM). Algunos resultados de estos estudios se muestran en la Figura 8.



IGN-UPM (2013). Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. Editorial Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid. ISBN: 978-84-416-2685-0. 267 pp

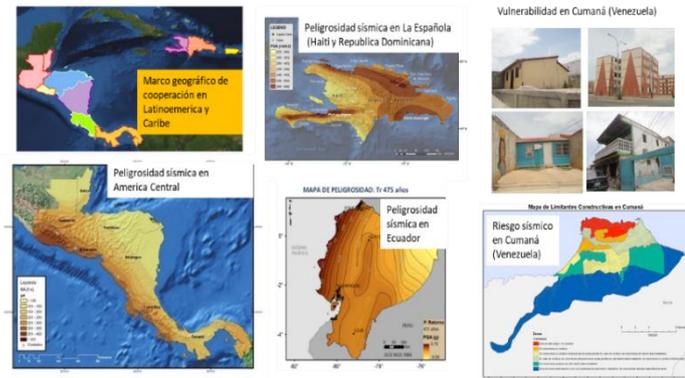
Figura 7. Mapa de peligrosidad sísmica de España elaborado mediante convenio de colaboración UPM-IGN para la revisión de la norma sismorresistente Española NCSE-02.

Figura 8. Mapas de riesgo sísmico de 4 comunidades autónomas: (arriba izquierda), Murcia (Benito et al, 2008); (arriba derecha) Andalucía (Benito et al, 2010); (abajo izquierda) Navarra; (abajo-derecha) Castilla-La Mancha. El riesgo se expresa en términos de número esperado de viviendas inhabitables debido a movimientos futuros con probabilidad de 10% en 50 años.



Cabe destacar que en todas las temáticas se desarrolla una línea transversal de cooperación con Latinoamérica y Caribe, donde la peligrosidad sísmica es elevada, por encontrarse en zonas límite de placas con movimientos muy rápidos (Cocos, Nazca, Caribe y Sudamérica) y donde además existe una alta vulnerabilidad, lo que hace que el riesgo sísmico sea muy elevado y solo pueda reducirse con medidas adecuadas de mitigación. El grupo GIIS viene desarrollando proyectos de investigación y cooperación con todos los países de la zona, trabajando estrechamente con las instituciones gubernamentales encargadas del monitoreo sísmico y de gestión del territorio. También se han realizado numerosos estudios de riesgo para Desarrollo Sostenible de ciudades de Latinoamérica, promovidos por el Banco Interamericano para el Desarrollo. Algunos resultados de peligrosidad y riesgo en este marco geográfico se muestran, a modo de ejemplo, en la Figura 9.

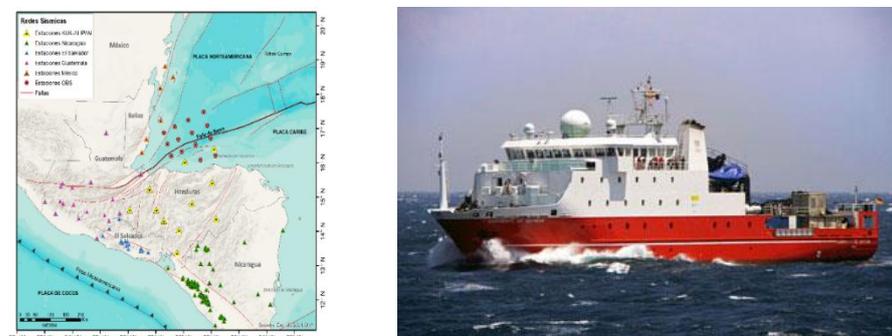
Figura 9. Ejemplo de resultados de proyectos de cooperación desarrollados por el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica (GIIS) de la UPM en Latinoamérica y Caribe. Izquierda y centro: mapas de peligrosidad de Centroamérica (Benito et al 2010), Haití - República Dominicana y Ecuador (Parra et al, 2016). Derecha: Caracterización de la vulnerabilidad y riesgo sísmico en Cumaná (Venezuela).



Por último, en la actualidad se está desarrollando el proyecto KUK_AHPAN: Estudio regional integrado de la Estructura y Evolución de la Litosfera en América Central. Implicaciones en al cálculo de la Amenaza y Riesgo sísmico. Este es un proyecto del plan Estatal de Investigación I+D+i (2018), ref. RTI-09427-B-C21/C22 integrado por dos subproyectos coordinados:

- 1) KUK_AHPAN- Geofísica, liderado por la Universidad Complutense de Madrid (UCM), tiene por objetivo llevar a cabo estudios específicos de sismicidad y geofísica marina y terrestre en el área de contacto entre las placas Caribe, Norteamérica y el bloque de Chortís (Figura 10 izquierda), para revelar la estructura de la litósfera, desde el fondo del mar hasta el manto, cruzando la corteza oceánica y determinar las fuentes de terremotos y tsunamis. Como parte de este proyecto se realizará un perfil sísmico en el Golfo de Honduras, con el buque oceanográfico Español Sarmiento de Gamboa. (Figura 10 derecha).
- 2) KUK_AHPAN- Amenaza y Riesgo Sísmico, liderado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Incluye desarrollos metodológicos y aplicaciones para la mejora del conocimiento de la amenaza y riesgo sísmico en general y, en Centroamérica y Sureste de España, en particular.

Figura 10. (Izquierda) Red de estaciones sísmicas de 3 componentes que se instalarán en tierra durante el tiempo de ejecución del proyecto KUK_AHPAN y red de sensores marinos OBS que se fondearán durante la campaña oceanográfica en el Golfo de Honduras. Derecha) Buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa que desarrollará la campaña marina.



7. REFLEXION FINAL

Las políticas de prevención de daños deben surgir de la acción combinada de la comunidad científica y de las autoridades políticas y administrativas, y es importante la concienciación en esta línea de actuación, si se quiere lograr que los terremotos dejen de producir catástrofes como la ocurrida en

Haití, en 2010, cuando un terremoto de Magnitud 7 causó 300.000 víctimas mortales. El hecho no fue debido únicamente a la magnitud del sismo, sino fundamentalmente a la altísima vulnerabilidad de las construcciones, probablemente con pobre o nulo nivel de diseño en una zona frecuentemente azotada por este tipo de eventos. Esta conjunción de factores aumenta notablemente el riesgo en países en vías de desarrollo, haciendo que los terremotos lleguen a ser catastróficos. Y no hay que olvidar que el terremoto es un fenómeno natural, pero la catástrofe no es natural. Ésta podría evitarse, o al menos reducirse, adoptando medidas de diseño sismorresistente y con una adecuada planificación urbanística y territorial.

Evidentemente el mayor valor de esa actuación es la salvaguardia de vidas humanas, pero además, en términos económicos, la inversión que supone para un país adoptar medidas sismorresistentes es considerablemente menor que el coste de la reconstrucción, una vez ocurrido el sismo. Por ello, las normas sismorresistentes son leyes de obligado cumplimiento, al menos en los países más desarrollados.

Dado que gran parte de las zonas más sísmicas del mundo se encuentran localizadas en Centroamérica, Sudamérica, Caribe y Asia, afectando a países en vías de desarrollo, esta temática debería reclamar la atención de la cooperación internacional.

8. BIBLIOGRAFIA

- B. Benito; C. Lindholm; E. Camacho; E. Molina; W. Rojas; E. Talavera; J.J. Escobar; G. Alvarado; M. Pérez-Escalante; Y. Torres (2010): Amenaza sísmica en América Central. Ref. Libro. Ed. Entinema.
- Benito, B.; Gaspar-Escribano, J.M.; Martínez-Díaz, J.J.; García Rodríguez, M.J.; Jiménez Peña, E.; Canora, C.; Álvarez-Gómez, J.A. (2008): The RISMUR project: Seismic risk assessment of the Murcia province (SE Spain). *Bolletino di Geofisica. Teorica e Applicata*, 49(1), 3-15.
- Benito, B.; Navarro, M.; Vidal, F.; Gaspar-Escribano, J.M.; García, M.J. y Martínez-Solares, J.M. (2010): «A new seismic hazard assessment in the region of Andalusia (Southern Spain)». *Bull. Earthq. Eng.*, 8, pp. 739-766.
- J. García-Mayordomo; J.M. Insua-Arévalo; J.J. Martínez-Díaz; A. Jiménez-Díaz; R. Martín-Banda; S. Martín-Alfageme; J.A. Álvarez-Gómez; M. Rodríguez-Peces; R. Pérez-López; M.A. Rodríguez-Pascua; E. Masana; H. Perea; F. Martín-González; J. Giner-Robles; E.S. Nemser; J. Cabral and the QAFI Compilers Working Group (2012): The Quaternary Faults Database of Iberia (QAFI v.2.0), *Journal of Iberian Geology*, 38(1): 285-302.
- IGN-UPM (2012): Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España (2012). Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) © Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) NIPO: 162-17-015-9 DOI: 10.7419/162.05.2017. Vol. 244, pp. 35898-35967.
- Norma de la Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) (2002): «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación». Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre. Publicada en el BOE, Vol. 244, pp. 35898-35967.
- Parra Cárdenas, H.; Benito, M.B.; Gaspar Escribano, J.M. (2016): Seismic hazard assessment in continental Ecuador. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 14-8, pp. 2129-2159. 04/2016. ISSN.
- Reid, H.F.: *The Mechanics of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission*, Vol. 2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C. 1910 (see especially pages 16-28).

www.ign.es

www.topografia.upm.es/grupos/sismo