

# GEOLOGÍA, TERREMOTOS Y RIESGO SÍSMICO: AVANCES Y PERSPECTIVAS

*Belén Benito Oterino*

*Catedrática de Geología. Universidad Politécnica de Madrid*

## RESUMEN

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. Aunque los terremotos no se pueden evitar, el riesgo asociado si se puede mitigar y este es el reto que afronta actualmente la comunidad científica en materia de sismología e ingeniería sísmica. El fenómeno es natural, pero el desastre no es natural, ya que este se puede paliar, o al menos reducir, adoptando medidas preventivas y diseñando planes eficaces de emergencia.

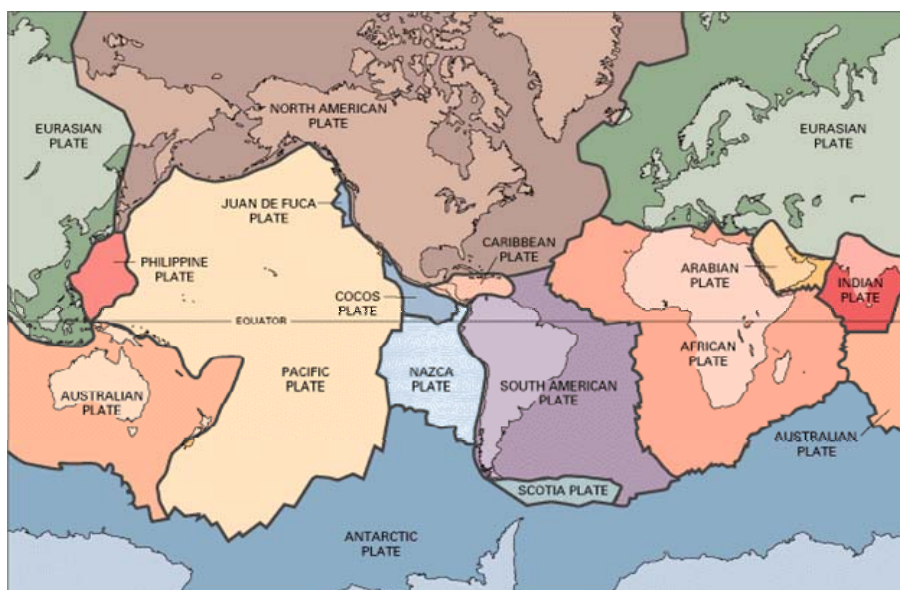
Este artículo trata de aclarar cuestiones referentes tanto al fenómeno sísmico en sí, como a las medidas que pueden adoptarse para minimizar los daños, presentando una perspectiva sobre el estado actual de la predicción y las alternativas que se manejan en una línea de prevención.

## 1. LA OCURRENCIA DE TERREMOTOS: EXPLICACIÓN GEOLÓGICA

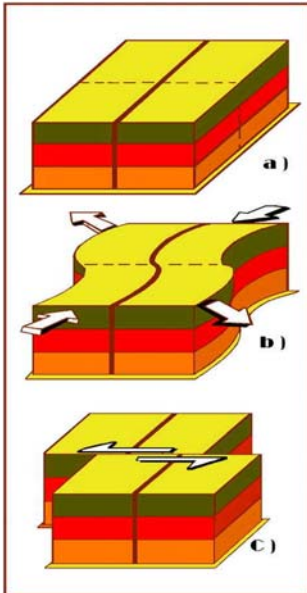
Entorno al fenómeno sísmico hay tres cuestiones que pueden considerarse clave referidas a su ocurrencia: ¿Dónde? ¿Cómo? y ¿Cuándo?

La primera cuestión *-dónde-* encuentra una respuesta en el marco de la Tectónica de Placas, teoría según la cual la corteza terrestre está compuesta por grandes placas tectónicas que están en continuo movimiento entre sí. La mayor parte de los epicentros de terremotos en todo el mundo están distribuidos en los márgenes de dichas placas, donde tienden a concentrarse los esfuerzos debidos al movimiento de las mismas, y donde se localizan las fallas geológicas (Figura 1). Estas son zonas frágiles de la corteza cuya ruptura produce el movimiento sísmico, por lo que constituyen la fuente u origen del terremoto.

*Figura 1. Principales placas tectónicas que configuran la corteza terrestre (arriba)*



La segunda cuestión *-cómo-* es hoy satisfactoriamente explicada por la teoría del Rebote Elástico (Reid, 1910). Según ésta, los esfuerzos se van acumulando en una falla geológica, hasta que se supera el límite de resistencia del material y se produce la ruptura, rebotando un lado frente al otro de la falla hacia posiciones de menor esfuerzo (Figura 2). 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 hasta la superficie de la tierra. En los lugares alcanzados con suficiente energía se produce la vibración o sacudida sísmica.



*Figura 2. Explicación del mecanismo de generación de terremotos, según la teoría del Rebote Elástico (Reid, 1910). Debido a las fuerzas que actúan sobre la corteza, ésta se deforma, acumulando esfuerzo dentro de las rocas (b). Cuando el esfuerzo alcanza la máxima resistencia del material, provoca la ruptura y los dos lados de la fractura rebotan hacia posiciones de menor esfuerzo (c).*

La última cuestión *-cuándo-* 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. Además hay muchas fallas ciegas que no rompen en superficie y no son bien conocidas. Con todo ello, hoy por hoy no es posible determinar cual será el momento de ocurrencia del próximo evento en una cierta zona, ni su tamaño.

Tras las cuestiones previas referentes a la explicación geológica y física del terremoto, nos centramos ahora en otras dirigidas a considerar las principales causas del daño que generan, su posible predicción y cómo mitigar el riesgo asociado.

## **2. PRINCIPALES CAUSAS DEL DAÑO CAUSADO**

Los terremotos pueden causar daños directos en las estructuras e infraestructuras, debido al impacto de las ondas sísmicas en las poblaciones afectadas. Los daños en infraestructuras, como cortes de carreteras, colapso de puentes o descarrilamiento de trenes en líneas de ferrocarril pueden dificultar seriamente la actuación de los servicios de emergencia, contribuyendo a un aumento de las víctimas.

Además de los daños directos que produce el propio movimiento sísmico en estructuras y edificaciones, frecuentemente se producen daños derivados de otros fenómenos inducidos por el sismo, como son la licuefacción, los deslizamientos de laderas y los tsunamis. Estos generan muchas veces un número de pérdidas muy superior a las producidas directamente por el sismo. El deslizamiento ocurrido en Las Colinas de Santa Tecla tras el terremoto del 13 de Enero de 2001 en El Salvador, con 600 víctimas mortales, el tsunami de Diciembre de 2004 en el Sudeste Asiático, con 200.000 víctimas, o el generado tras el terremoto de 2011 en Japón, que afectó a la central nuclear de Fukushima, son algunos ejemplos del potencial destructor de estos fenómenos derivados.

La licuefacción es un fenómeno que se produce en ocasiones en suelos blandos, poco cohesionados. La fuerza de la sacudida anula la fuerza de cohesión entre sus granos y el suelo se

comporta como un líquido, hundiéndose todo lo que esté situado sobre él. Para entendernos, es algo así como lo que sucede con la arena de la playa. Cuando está mojada, hay una fuerza de cohesión que la mantiene compactada y es posible, por ejemplo, hacer un castillo de arena. Pero cuando se seca pierde la cohesión y deja de tener consistencia. Lo mismo sucede con ciertos suelos ante la fuerza de la sacudida sísmica.

Otro fenómeno derivado es el deslizamiento de laderas, que a veces se produce en relieves escarpados, con suelos poco consolidados, ante la fuerza lateral impuesta por la sacudida sísmica. Esta produce una reducción en la resistencia del material disparando el deslizamiento del talud. El potencial del deslizamiento depende de: la litología, el relieve, la humedad relativa y la intensidad del movimiento.

El tercer fenómeno derivado del sismo, capaz de generar grandes pérdidas humanas y materiales es el tsunami, una gran ola que se puede producir cuando el hipocentro del terremoto se localiza en el mar, causando un movimiento vertical del suelo oceánico. Una gran masa de agua es arrastrada y como consecuencia se genera una ola que al llegar a la costa puede alcanzar alturas de hasta 30 metros, inundando las zonas costeras afectadas. El tsunami causado por el terremoto de Sumatra del 26 de Diciembre de 2004 pone de manifiesto el enorme potencial destructor de este fenómeno.

### **3. ¿SE PUEDEN PREDECIR LOS TERREMOTOS? ESTADO ACTUAL DE LA PREDICCIÓN.**

En la década de los 80 la comunidad internacional dedicó enormes esfuerzos en la línea de predicción de terremotos, considerada entonces como la medida más eficaz para evitar, al menos, que se produjeran víctimas humanas. La predicción se concebía como la determinación del lugar y el momento de ocurrencia del terremoto con un margen suficientemente estrecho de tiempo como para tomar acciones a corto plazo, que consistían esencialmente en evacuar a la población. En esta línea, hubo algunos casos de predicción satisfactoria, como la del sismo de Haicheng-Yingkou (China) el 4 de Febrero de 1974, que permitió evacuar tres grandes ciudades dos días antes del terremoto, con la consiguiente salvaguarda de vidas humanas. Sin embargo, poco después de este sismo ocurrió otro también en China que no se logró predecir, donde fallecieron 250.000 personas. Y también hubo casos de predicción fallida, en los que se evacuó la población y el terremoto no llegó. Estos casos hicieron derivar los esfuerzos hacia una línea de prevención de daños, ligada a la predicción a mediano y largo plazo.

Actualmente la predicción se concibe asociada a tres escalas temporales, orientadas cada una con un propósito diferente. El siguiente cuadro resume lo que se entiende por cada escala de predicción:

<u>ESCALA</u>	<u>TIEMPO</u>	<u>APLICACIÓN</u>
• A corto plazo	Horas y días	Evacuación
• A medio plazo	Semanas	Planes de emergencia
• A largo plazo	Años	Diseño sismorresistente y planificación urbanística
		↓
		<b>Prevención de daños</b>

La predicción a corto plazo con fines de evacuación sería sin duda deseable, pero actualmente no es posible de forma satisfactoria. Es cierto que algunos terremotos van precedidos de señales precursoras, como el aumento de Radom, la ocurrencia de microterremotos e incluso el comportamiento anómalo de los animales. Sin embargo no hay una relación causa- efecto directa e inmediata, que permita establecer con certeza que va a ocurrir un terremoto tras detectar alguna de

estas señales. Es más, en la mayor parte de los casos éstas se presentan sin que el terremoto suceda después. Si nos basamos en ellas para dar la alerta sísmica, el porcentaje de errores sería mucho mayor que el porcentaje de aciertos.

#### **4. PELIGROSIDAD Y RIESGO SÍSMICO. MEDIDAS PREVENTIVAS.**

Ante la imposibilidad de predecir el terremoto con un margen de tiempo suficientemente estrecho como para tomar acciones a corto plazo, la línea de predicción a largo plazo es la que actualmente está dando resultados más satisfactorios, y hacia la que se canaliza una buena parte de la investigación en sismología e ingeniería sísmica. Cuando hablamos de este tipo de predicción entramos en lo que se conoce también como evaluación de la peligrosidad sísmica.

La peligrosidad se define como la probabilidad de que ocurran movimientos de una cierta intensidad en una zona, durante un periodo de tiempo  $t$  definido, que puede ser de años, a veces cientos e incluso miles de años. Para entender la utilidad de conocer el movimiento a tan largo plazo es importante entender primero la diferencia entre peligrosidad y riesgo sísmico, Según la definición de la UNDR0 (1979) el riesgo sísmico (R) se establece como el siguiente producto:

$$R = H * V * E * C$$

donde: H, es el término que representa la peligrosidad (del término inglés Hazard)

V, es la vulnerabilidad de las estructuras, es decir su capacidad para experimentar daño ante una cierta acción sísmica. Las estructuras más débiles son las más vulnerables.

E, es la exposición, que representa la densidad de personas y estructuras en la zona.

C, es el coste de reparación de daños.

Esta combinación de factores involucrados en el riesgo, hace que éste no dependa sólo del nivel de movimiento que cabe esperar en una zona (peligrosidad), sino también, y de forma decisiva, del número de edificios en la misma (exposición), de su mayor o menor vulnerabilidad y de cuanto cueste reparar las pérdidas. Una zona de baja-moderada peligrosidad, pero con alta vulnerabilidad, resultaría entonces con alto riesgo. Y viceversa, una zona de alta peligrosidad con vulnerabilidad reducida sería de bajo riesgo.

En definitiva, la peligrosidad es inherente al fenómeno y no se puede controlar ni reducir, tan sólo se puede llegar a conocer de forma más o menos precisa. Pero la vulnerabilidad sí se puede reducir, y por tanto el riesgo sísmico se puede controlar. Algunas cuestiones inmediatas que cabe plantearse en esta línea de prevención son: ¿Cómo se puede reducir la vulnerabilidad? ¿Cómo se pueden diseñar las estructuras más resistentes frente a cargas sísmicas? ¿cómo puede contribuir el conocimiento de la peligrosidad a mitigar el riesgo?

El diseño sismorresistente es la primera respuesta a estas cuestiones. 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 cuales son esos máximos movimientos, cómo se caracterizan y cual es su recurrencia. Tras ello, el movimiento esperado se introduce en los cálculos dinámicos de la estructura a diseñar, dotando a la misma de capacidad de resistencia ante las correspondientes cargas sísmicas. 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, hoy por hoy, una de las medidas más eficaces para disminuir la vulnerabilidad y por tanto para reducir el riesgo sísmico.

Además, dentro del potencial destructor de los terremotos hay que considerar, como hemos visto, los posibles daños asociados a fenómenos indirectos como licuefacción, deslizamientos y

tsunamis. El riesgo asociado a éstos puede reducirse mediante una adecuada planificación urbanística, adoptando sistemas de alerta y empleando medidas correctoras.

A parte de las citadas medidas pre-evento es importante el diseño de planes de emergencia que contribuyan a mejorar la intervención durante y después del evento. La actuación inmediata tras la ocurrencia de un sismo puede salvar muchas vidas y facilitar decisivamente la recuperación de las poblaciones afectadas. En esta línea también se dedican esfuerzos hacia un mayor conocimiento del riesgo sísmico que sirva de base para la elaboración de planes de emergencia.

## 5. LA SITUACIÓN EN ESPAÑA

En España han tenido lugar varios terremotos destructores en época histórica, que han llegado a un grado de intensidad X, en una escala de 12 grados. Además con mayor frecuencia han ocurrido terremotos menores que han producido daños severos y han causado gran alarma social. La sismicidad que afecta a nuestro país puede considerarse moderada, en un contexto mundial, y se explica por la convergencia de placas Euroasiática y Africana, cuyo límite se localiza entre ambas, pasando prácticamente por el estrecho de Gibraltar y generando terremotos al sur de la Península Ibérica y norte de África. La sismicidad de esta región se muestra en el mapa de la Figura 3.

Figura 3. Mapa de sismicidad de la Península Ibérica y zonas próximas  
(Web del Instituto Geográfico Nacional: <http://www.ign.es>)



Por tanto España no está exenta de riesgo sísmico. El último terremoto que puede considerarse destructor ha sido el ocurrido en Lorca, el 11 de mayo de 2011, que causó 9 víctimas morales y pérdidas materiales que ascienden a 108 millones de euros, sin incluir en esta cifra los daños causados en el patrimonio histórico y en los edificios públicos. Ese terremoto fue tan solo de magnitud M 5.2, que puede calificarse de baja a moderada (el terremoto de Japón de 2011 tuvo magnitud M 9.0), pero su foco fue muy superficial y su epicentro se localizó tan solo a 3 km. de la localidad de Lorca, lo que unido a su elevada vulnerabilidad explica el notable daño causado.

Si tenemos en cuenta que en el sur y sureste Peninsular existen fallas tectónicas capaces de generar terremotos de hasta una magnitud 7, y dado que de un grado a otro de magnitud la energía se multiplica por 30 (la escala no es lineal), podemos esperar terremotos con una energía asociada casi 900 veces mayor que la liberada en el caso de Lorca. Por tanto la adopción de medidas preventivas y la elaboración de planes de emergencia son absolutamente necesarias en nuestro país.

Por el momento, disponemos de una normativa sismorresistente para la edificación convencional (NCSE-02) y de otra para puentes (PDS-1), que son leyes de obligado cumplimiento. Además se han elaborado y homologado planes de emergencia ante el riesgo sísmico con carácter regional para todas las Comunidades Autónomas expuestas a un riesgo significativo, que son todas las españolas a excepción de Castilla-La Mancha, Cantabria y la Comunidad de Madrid.

Sin embargo, los planes de emergencia a nivel municipal, necesarios para actuaciones ante escenarios sísmicos concretos aún no se han puesto en marcha, debido fundamentalmente a la situación de crisis que afecta al país. Es deseable que estos planes comiencen a desarrollarse en un futuro próximo y sean eficaces para minimizar las pérdidas ante eventuales sismos futuros.

## **6. CONCLUSIÓN Y REFLEXIÓN FINAL**

Los terremotos son fenómenos naturales que se producen por la acumulación de fuerzas en zonas frágiles de la corteza terrestre, denominadas fallas geológicas, que tienden a romperse cuando se supera su límite de resistencia. En la ruptura se genera una energía que se propaga en forma de ondas elásticas y cuando éstas alcanzan la superficie terrestre producen el terremoto o sacudida sísmica.

Los terremotos no se pueden evitar ni predecir a corto plazo, pero sí se pueden estimar los movimientos esperados en una cierta zona a largo plazo, lo que se conoce como peligrosidad sísmica. Esto permite el diseño sismorresistente de las edificaciones y estructuras expuestas, de modo que puedan resistir esos movimientos, lo que supone reducir su vulnerabilidad. De esta forma el riesgo sísmico, concebido como el producto de la peligrosidad por la vulnerabilidad y exposición, puede ser reducido o mitigado. En esto se basa la línea de prevención de daños a la que actualmente se dedican los mayores esfuerzos para evitar que terremotos futuros sean catastróficos.

El diseño sismorresistente es hoy por hoy la medida más eficaz para mitigar el riesgo sísmico y es la esencia de las normativas de edificación existentes en la mayor parte de los países desarrollados. Las actuaciones en este marco constituyen acciones pre-evento, que tienden a complementarse con la elaboración de planes de emergencia que se activan en caso de terremoto y establecen acciones a seguir durante y después del evento.

Las políticas de prevención requieren de la acción combinada de científicos y gobiernos para ser eficaces, y es importante la concienciación social en esta línea de actuación si se quiere evitar el desastre que puede suponer la ocurrencia de sismos futuros. Los resultados de las investigaciones sismológicas no deben quedar en un ámbito estrictamente científico; deben llegar a las instancias sociales y a las administraciones públicas para que se traduzcan en medidas eficaces de reducción de la vulnerabilidad y por consiguiente del riesgo sísmico.

Las medidas de prevención, dirigidas fundamentalmente a la salvaguardia de vidas humanas, son posibles, recomendables y aún más, son rentables, ya que minimizarían el elevado coste que supone la reparación de daños tras un terremoto.

El terremoto es un fenómeno natural, pero la catástrofe no es natural...

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 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. 35.898-35.967.
- PDS-1 (1974): Norma Sismorresistente. Decreto 3209/1974 de 30 de Agosto de 1974. BOE del 21 de Noviembre de 1974
- UNDRO (1979): Natural Disasters and Vulnerability Análisis: Report of Expert Group Meeting, Office of United Nations Disaster Relief Co-ordinator (UNDRO), Palais des Nations, CHS-1211, Geneva 10, Switzerland.