

Terremotos

Cuando la Tierra tiembla



COLECCIÓN **DIVULGACIÓN**

Terremotos

Cuando la Tierra tiembla

José Badal
Alex H. Barbat
Josep Batlló
Elisa Buforn
Antoni M. Correig
Sara Figueras
Mariano García Fernández
María José Jiménez
Carlos López-Casado
Albert Macau
José Manuel Martínez Solares
Ramón Ortiz
Luis G. Pujades
Carlos Sanz de Galdeano
Emma Suriñach
Agustín Udías
Arantza Ugalde (coord.)
Francisco Vidal
Josep Vila



Madrid, 2009



Con la COLECCIÓN DIVULGACIÓN, el CSIC cumple uno de sus principales objetivos: proveer de materiales rigurosos y divulgativos a un amplio sector de la sociedad. Los temas que forman la colección responden a la demanda de información de los ciudadanos sobre los temas que más les afectan: salud, medio ambiente, transformaciones tecnológicas y sociales... La colección está elaborada en un lenguaje asequible, y cada volumen está coordinado por destacados especialistas de las materias abordadas.

COMITÉ EDITORIAL

Pilar Tigeras Sánchez, Directora
Beatriz Hernández Arcediano, Secretaria
Miguel Ángel Puig-Samper Mulero
Alfonso Navas Sánchez
Gonzalo Nieto Feliner
Cuca Viamonte Tortajada
Jaime Pérez del Val
Rafael Martínez Cáceres
Carmen Guerrero Martínez

CONSEJO ASESOR

Javier Martínez de Salazar
José Manuel Prieto Bernabé
Carlos Duarte Quesada
Fernando Hidalgo Cano
Mariano Sánchez García
Uxío Labarta Fernández
Mariano Laguna Castrillo
Luis Calvo Calvo
Pía Paraja García

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CSIC



Primera edición: 2009

- © CSIC, 2009
© José Badal, Alex H. Barbat, Josep Batlló, Elisa Buforn, Antoni, M. Correig, Sara Figueras, Mariano García Fernández, María José Jiménez, Carlos López-Casado, Albert Macau, José Manuel Martínez Solares, Ramón Ortiz, Luis G. Pujades, Carlos Sanz de Galdeano, Emma Suriñach, Agustín Udías, Arantza Ugalde (coord.) Francisco Vidal y Josep Vila, 2009
© Los Libros de la Catarata, 2009

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito de la editorial.

Las noticias, asertos y opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, sólo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

ISBN (CSIC):

ISBN (Catarata):

NIPO:

Depósito legal:

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.

13. Escenarios de impacto sísmico

Vulnerabilidad y riesgo sísmicos

Las catástrofes sísmicas forman parte de los desastres naturales cuyo impacto sobre la humanidad crece. El aumento de los daños causados por terremotos se debe, fundamentalmente, al crecimiento de la población y a su organización en grandes conurbaciones lo que implica la construcción de edificios e infraestructuras vulnerables en zonas con amenazas sísmicas significativas. El riesgo sísmico cuantifica la probabilidad de pérdida por causa sísmica y a él contribuyen la probabilidad de ocurrencia del sismo, los bienes expuestos, su vulnerabilidad y su valor socioeconómico. Los escenarios de daño sísmico reproducen la situación catastrófica y de emergencia que es esperable en una región o ciudad concreta y son herramientas básicas para la prevención, mitigación y gestión del impacto de los terremotos en la

sociedad. En este capítulo se introducen los conceptos de vulnerabilidad y riesgo sísmico, se describen métodos y técnicas avanzadas para el diseño de escenarios de impacto sísmico y se describe la aplicación de estas técnicas al análisis de dos escenarios sísmicos en la ciudad de Barcelona, incluyendo la estimación del número de víctimas, de personas sin hogar y del coste económico.

La vida

Aunque no sin controversia, se acepta que el origen de la vida en la Tierra ocurrió hace 2.700 millones de años, aunque hallazgos recientes podrían situarlo hace 3.500 millones de años. Los primeros homínidos aparecen hace 6 ó 7 millones de años; pero los primeros fósiles del *Homo sapiens* se

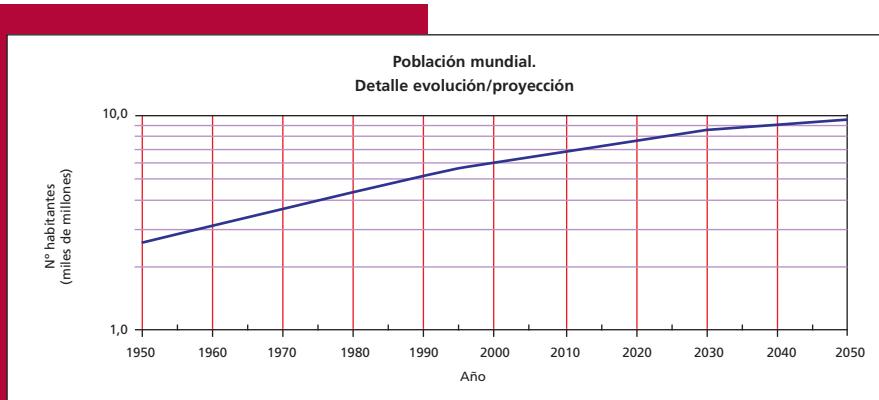


Figura 13.1. Evolución de la población mundial en nuestra era y proyección hacia el 2050.

Fuente: PRB, 2008.

originan hace sólo 200.000 años. Desde entonces el hombre ha ido tomando posesión de la Tierra, reproduciéndose y mejorando las condiciones de vida. Según el *Population Reference Bureau* (PRB, 2006), en los años cincuenta del siglo XX la esperanza de vida en países como China, Vietnam, Honduras y Kenia era de 40 años. Al inicio del siglo XXI la esperanza de vida en China, Vietnam y Honduras ya es de más de 70 años, mientras que en Kenia, el impacto del virus del Síndrome de Inmuno-Deficiencia Adquirida (SIDA) durante los últimos 25-30 años hace retroceder el crecimiento de la esperanza de vida experimentado entre los años 50 y 70, hasta cifras comparables a las de los años cincuenta. En la actualidad se estima que sólo el 58% de la población mundial tiene acceso a unas condiciones adecuadas de salubridad e higiene. Existen grandes desigualdades. En Suecia la esperanza

de vida en los años cincuenta ya era de 70 años y actualmente está por encima de los 80. En los países en vías de desarrollo, sólo entre la cuarta parte y la mitad de la población tiene acceso a mejoras en sus condiciones de salubridad mientras que en las sociedades desarrolladas el 92% de la población rural y el 100% de la población urbana disfruta de condiciones adecuadas. Durante el siglo XX, la población de nuestro planeta ha sufrido un aumento colosal, pasando de los 1.600 millones de habitantes en el año 1900 a los 6.700 millones en el año 2008. Las proyecciones de la evolución de la población en el mundo predicen una población de entre 9.000 y 9.500 millones para el año 2050. La figura 13.1 muestra los ritmos de crecimiento de la población mundial y su proyección a medio plazo. Por otra parte, el 70% de los 510 millones de km² de la superficie terrestre se halla ocupado por los mares, de forma que el área de los continentes es del orden de 153 millones de km². Un sencillo cálculo nos indica que, suponiendo una distribución homogénea de la población sobre la superficie no inundada del planeta, la densidad de población actual sería de más de 43 habitantes por km². Pero el hombre es un ser social que tiende a agruparse en lugares con condiciones medioambientales favorables, estableciendo sus asentamientos, poblaciones y ciudades

en valles y costas con climas templados y abundante agua. El desarrollo tecnológico, industrial y cultural de la humanidad ha conllevado también el fenómeno de la emigración de los habitantes de países pobres hacia países desarrollados y de la población rural hacia grandes urbes y megaurbes donde existen más medios y mejor calidad de vida. El término *mega-urbe* define un área metropolitana, formada por una o más conurbaciones, con una población de más de 10 millones de personas y, según algunos autores, también con una densidad mínima de población de 2.000 hab/ km².

En el año 1950 sólo Nueva York cumplía ambos requisitos, pero en 1985 había ya 9 megaciudades. A principios del año 2004 había ya 19 y 25 a finales del año 2005. El área metropolitana de Tokio es la mayor conurbación del mundo; esta formidable aglomeración urbana incluye las áreas de influencia de las ciudades de Yokohama y Kawasaki y se estima que tiene una población de entre 30 y 34 millones de habitantes, dependiendo de la definición de megaurbre que se tome y de las áreas urbanas que se considere que la componen. La tabla 13.1 muestra las 10 principales megaciudades del mundo.

También se consideran megaurbes las ciudades de Beijing, Buenos Aires, El Cairo, Dhaka en Bangladesh, Estambul, Jakarta, Karachi, Calcuta, Lagos, Londres, Manila, Moscú, Río

CIUDAD	PAÍS	POBLACIÓN (millones de habitantes)
Tokio	Japón	30-34
Ciudad de México	México	22,8
Seúl	Corea del Sur	22,3
New York	Estados Unidos	21,9
Sao Pablo	Brasil	20,2
Bombay	India	19,9
Delhi	India	19,7
Shangai	China	18,2
Los Ángeles	Estados Unidos	18
Osaka	Japón	16,8

Tabla 13.1. Las diez megaciudades más importantes del mundo.

Fuente: Th. Brinkhoff: *The Principal Agglomerations of the World*, 2006.

de Janeiro, Censen en el sur de China, y Teherán. Las proyecciones de las Naciones Unidas prevén una disminución en el ritmo de emergencia de nuevas megaciudades, pero la expansión y fusión de grandes áreas urbanas continuará siendo una tendencia importante. Es en este contexto de macro-crecimiento y urbanización donde hay que enmarcar cualquier estudio de riesgo. Nuestro planeta es, sin duda, bello, acogedor y generoso, pero no es ilimitado y tampoco está exento de importantes amenazas de diversa índole. El historiador norteamericano Will Durant, en su famosa obra *Historia de las Civilizaciones*, describió de forma cruda las consecuencias de las incertidumbres del potencial destructivo de la Tierra: “La civilización existe con el permiso geológico, y éste se halla sujeto a cambio sin previo aviso”.

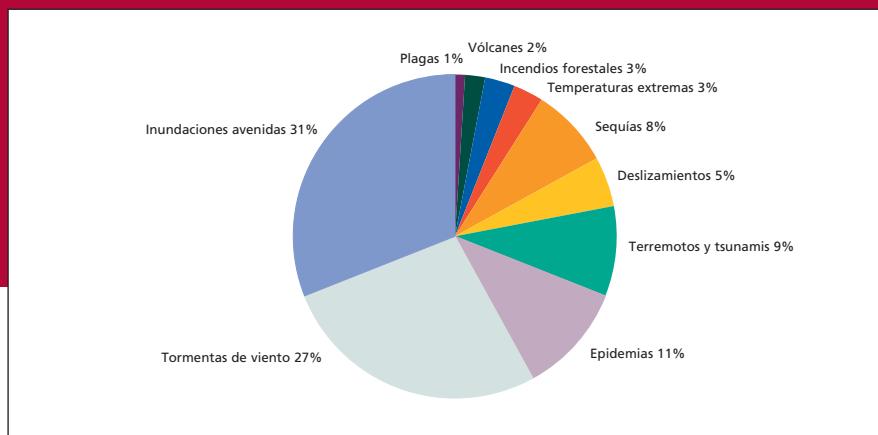


Figura 13.2. Distribución de las catástrofes naturales en el mundo durante el periodo comprendido entre los años 1970 y 2005 .

Fuente: EM-DAT, 2009.

Catástrofes naturales y terremotos

El número de catástrofes naturales crece año tras año y, con ellas, aumentan sus consecuencias en costes de vidas humanas y en valor económico. Cada año existen más datos y de mejor calidad sobre el registro y seguimiento de las catástrofes naturales tanto en lo que se refiere a su naturaleza, como a sus costes. La Universidad Católica de Lovaina en Bélgica alimenta y mantiene una excelente base de datos (EM-DAT, 2008) sobre todo tipo de desastres incluyendo los producidos por la naturaleza y los de origen antrópico. Entre las principales catástrofes naturales se hallan las inundaciones, las tormentas de viento, incluyendo huracanes y tornados, las epidemias, los terremotos y tsunamis, los deslizamientos, las sequías, las olas de calor y de frío, los incendios forestales, los

volcanes y las plagas. La figura 13.2 muestra la frecuencia de ocurrencia relativa de estas catástrofes entre los años 1970 y 2005.

La figura 13.3 muestra la evolución temporal del número de catástrofes naturales durante el siglo XX. Se observa un crecimiento exponencial (lineal en la escala semilogarítmica del gráfico) del número de catástrofes naturales. Una parte de este incremento se halla en la capacidad de detectar, documentar y registrar los hechos catastróficos, que aumenta con la mejora de los sistemas de información y documentación. Actualmente ninguna catástrofe pasa inadvertida. Esto no era así a principios o, incluso, a mediados del siglo XX. Pero parece existir también un aumento objetivo de las catástrofes. Hoy ocurren más catástrofes que hace 100 años. Este aumento hay que atribuirlo, por una parte, a una mayor ocurrencia de

fenómenos, principalmente de tipo atmosférico, posiblemente relacionados con el cambio climático y, por otra parte, a la invasión masiva del territorio. Cada vez más los fenómenos con capacidad destructiva ocurren en zonas extensa y densamente pobladas. Aquí centramos nuestro análisis en el impacto de los terremotos. En la figura 13.2 se observa cómo los terremotos constituyen el 9% de las catástrofes naturales. Con todo, los grandes terremotos tienen unas características específicas que los hacen particularmente temibles: son imprevisibles, súbitos, casi instantáneos y, a su paso, normalmente en unas pocas decenas de segundos, dejan destrucción y muerte.

Las causas de este incremento de las catástrofes naturales, en general, suelen asociarse a los efectos de la actividad humana en el medio ambiente y, en particular, en lo referente a fenómenos atmosféricos, al cambio climático producido por el calentamiento global del planeta por causa del volcánico intenso a la atmósfera de gases de dióxido de carbono, producidos por la

Figura 13.3. Catástrofes naturales en el mundo.
Periodo 1900-2008.

Fuente: EM-DAT, 2009.

combustión masiva de hidrocarburos que se han hecho imprescindibles para abastecer las necesidades energéticas del crecimiento económico y de los estándares de bienestar de la vida moderna en grandes ciudades. Las catástrofes sísmicas también han ido en aumento en el siglo XX pero el número de terremotos con capacidad destructiva se mantiene constante. La figura 13.3 a) muestra el crecimiento de los sismos destructores en el periodo entre 1900 y 2008.

Se observa un importante crecimiento a partir de los años sesenta. Parece que el incremento de catástrofes sísmicas registradas se debe, por una parte, a mejoras en la observación y registro de este tipo de desastres naturales, pero, por otra, también al hecho de que en las zonas sísmicas del mundo, particularmente cuando éstas se hallan en áreas de gran dinamismo económico, la población se ha incrementado. La figura 13.4 b)

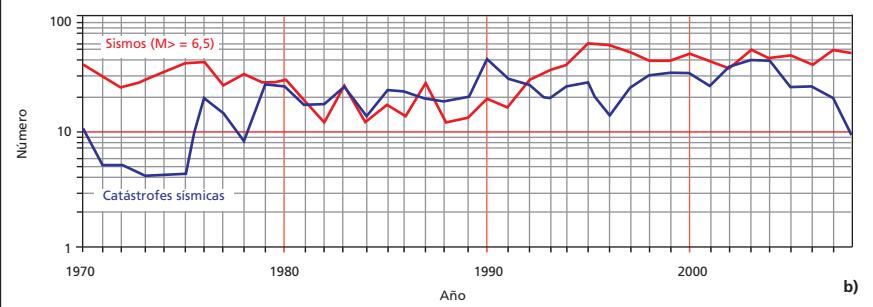
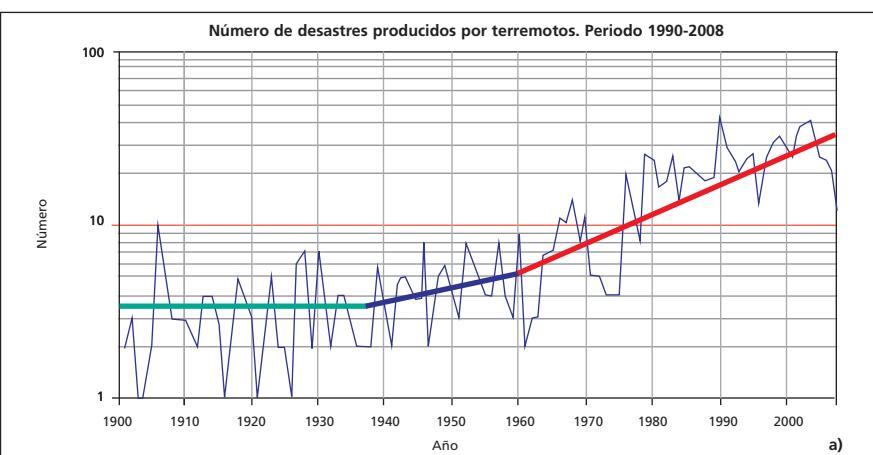
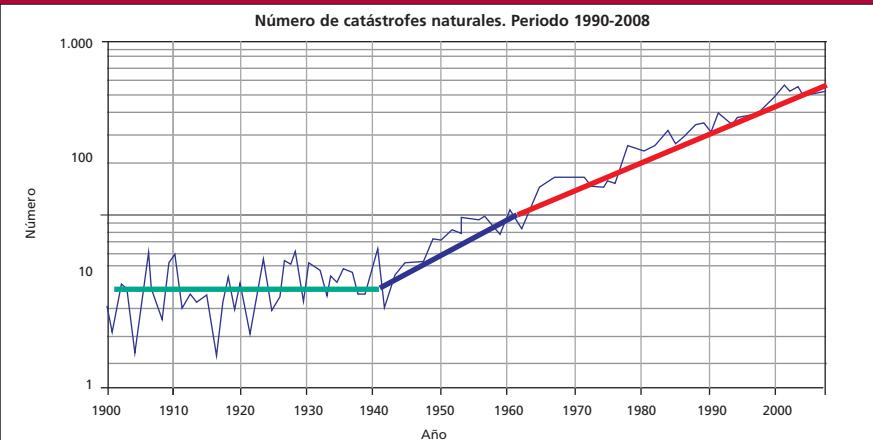


Figura 13.4. Catástrofes sísmicas y grandes terremotos. Periodo 1970-2008.

Fuente: EM-DAT 2009 para catástrofes; ANSS 2009 para los terremotos.

LOS DIEZ TERREMOTOS MÁS MORTÍFEROS			LOS DIEZ TERREMOTOS CON MÁS PERSONAS AFECTADAS			LOS DIEZ TERREMOTOS ECONÓMICAMENTE MÁS COSTOSOS		
País (lugar)	Fecha	Fallecidos	País (lugar)	Fecha	Afectados	País (lugar)	Fecha	Coste(1)
1 China (Tangshan)	27/07/1976	242.000	China (Wenchuan)	12/05/2008	45.976.596	Japón (Kobe)	17/01/1995	100.000
2 China (Nan Chang)	22/05/1927	200.000	India (Dharbhanga)	21/08/1988	20.003.766	USA (Los Ángeles)	17/01/1994	30.000
3 China (Gansu provincia)	16/12/1920	18.0000	India (Kachch-Bhuj)	26/01/2001	6.321.812	Japón (Niigata)	23/10/2004	28.000
4 Indonesia (Sumatra)	26/12/2004	165.708	Pakistán (Bagh)	08/10/2005	5.128.000	China (Wenchuan)	12/05/2008	20.000
5 Japón (Kanto)	01/09/1923	143.000	China (Lishui)	03/02/1996	5.077.795	Turquía (Izmit)	17/08/1999	20.000
6 Turkmenistán	05/10/1948	110.000	Guatemala	04/02/1976	4.993.000	Italia (Avellino)	23/11/1980	20.000
7 China (Wenchuan)	12/05/2008	87.476	Perú (Chimbote)	31/05/1970	3.216.240	Taiwán (Nantou)	21/09/1999	14.100
8 Italia (Messina, Sicilia)	28/12/1908	75.000	Indonesia (Yogyakarta)	27/05/2006	3.177.923	Armenia	07/12/1988	14.000
9 Pakistán (Bagh)	08/10/2005	73.338	China (Provincia de Shanxi)	01/11/1999	3.020.004	Japón (Niigata)	16/07/2007	12.500
10 China (Provincia de Gansu)	26/12/1932	70.000	Japón (Costa sur de Honshu)	08/08/1983	2.550.028	Irán (Rasht)	21/06/1990	8.000

(1) Coste en millones de US\$. Período 1900-2008.

Tabla 13.2. Mayores catástrofes sísmicas desde 1900. Se relacionan los diez terremotos que han causado más muertes, los diez con más afectados y los diez económicamente más costosos.

Fuente: EM-DAT, 2009. Tabla creada el 30/12/2008. Data versión v12.07.

superpone las frecuencias de ocurrencia de catástrofes sísmicas y la de los terremotos con magnitudes mayores o iguales a 6,5 a partir del año 1970. Dada una población o un lugar, la capacidad destructiva de un terremoto depende de su magnitud y de su distancia hipocentral, por lo que terremotos pequeños no deberían causar daños relevantes y terremotos grandes suficientemente distantes tampoco. Observamos cómo, a partir de 1980, la tendencia de ocurrencia de terremotos grandes y de catástrofes sísmicas casi coinciden. Estos números y gráficos representan un promedio mundial, pero las cosas son distintas para países concretos; por ejemplo en países como Japón y Estados Unidos las medidas de protección sísmica han permitido reducir el impacto de los terremotos en sus

pueblos y ciudades; en otros países en vías de desarrollo los números son peores. Destaca el pico de 1990, año en el que ocurren 20 terremotos de gran magnitud, pero 40 catástrofes sísmicas indicando que terremotos de magnitudes menores también son capaces de causar destrucción. Así pues, del análisis de la figura 13.4 b) concluimos que, en promedio, la práctica totalidad de terremotos grandes afecta a entornos densamente poblados. Este hecho se debe al crecimiento de la población mundial y a su organización en grandes megaurbes que conlleva una ocupación del territorio, masiva, incontrolada y, en muchos casos, inadecuada. En general, los grandes terremotos, cada vez más, afectan zonas urbanas donde existe una gran densidad de población, industrias, bienes, infraestructuras y servicios que

presentan una notable vulnerabilidad y amontonan un alto valor económico y, por lo tanto, un altísimo riesgo. La tabla 13.2 muestra los terremotos más destructivos desde el año 1900. Se recogen los diez terremotos que han causado más muertes, los diez que han afectado a más personas y los diez que han producido más pérdidas económicas. El terremoto de Tangshan ocurrido en China el 27 de julio de 1976 fue el más mortífero, matando a 242.000 personas. El sismo de Wenchuan, ocurrido también en China el 12 de mayo de 2008, se halla en las tres listas de los mayores desastres sísmicos: es el que ha afectado a un mayor número de habitantes, casi 46 millones, mató a más de 84.000 personas y su coste económico se estimó en 20.000 millones de dólares. El terremoto más costoso se estima fue el sismo de Kobe ocurrido en Japón el 17 de enero de 1995. El desarrollo de las grandes ciudades, además de una gran acumulación de población, implica también grandes y costosas infraestructuras que aumentan en gran medida los bienes y el valor económico expuesto.

Wenchuan (China)

El día 12 de mayo de 2008, 14:28:04, hora de Pekín, ocurre en China un gran terremoto ($M_s=8$; $M_w=7,9$; $I_{\text{máx}}=\text{XI}$) conocido como el terremoto de

Wenchuan (provincia de Sichuan). La latitud y longitud del epicentro fueron 31.021°N y 103.367°E y su profundidad fue de 14 km. Después del terremoto, la falla causante podía seguirse en superficie a lo largo de 240 km. Las aceleraciones máximas del suelo fueron del orden de la aceleración de la gravedad. Las tres principales características de esta gigantesca catástrofe son: 1) su gran magnitud, 2) el enorme número de víctimas y 3) su impacto en los bienes de la población y las tremendas pérdidas económicas. Ello lo sitúa entre los primeros del ranking de terremotos más destructivos de la historia y los efectos directos e inducidos de este terremoto constituyen un catálogo de los fenómenos destructores que pueden aparecer cuando ocurre un terremoto, ya que afectó a todo tipo de edificios, instalaciones y servicios, incluyendo el milenario patrimonio chino. El terremoto causó daños graves en edificios residenciales, en edificios históricos, en industrias, en carreteras y vías férreas, incluyendo puentes y túneles, en los sistemas de producción y transmisión de energía eléctrica, así como en torres de líneas de alta tensión, en los sistemas de conducción de gas y de agua potable, en los sistemas de comunicaciones, incluyendo torres de telecomunicación; se produjeron grandes caídas de rocas y grandes deslizamientos de tierra. Algunos de estos deslizamientos sepultaron poblaciones enteras,

taponaron bocas de túneles e, incluso, interrumpieron el curso de ríos para generar nuevos lagos. La figura 13.5 muestra algunas imágenes de estos fenómenos.

El diseño sismorresistente

En los estudios de riesgo de una zona, los edificios existentes influyen de una manera esencial en los resultados. Éste es el caso de los edificios de mampostería no reforzada en sus diversas variantes que incluyen desde los antiguos edificios de mampostería de piedra hasta los relativamente más modernos de obra de fábrica de ladrillo. De acuerdo con el periodo de construcción, los pisos o forjados de estos edificios suelen estar hechos con vigas de madera, acero o de hormigón prefabricado; estas vigas están unidas entre sí mediante pequeñas bóvedas de cerámica, con una rigidez pobre. Muchos de estos edificios son altos y con un número importante de paredes y muros de mampostería de gran tamaño que incorporan pesados balcones y grandes ventanas; todo ello incrementa su ya notable vulnerabilidad. Además este tipo de edificios suele tener aspectos arquitectónicos, como por ejemplo una mayor altura de sus primeros pisos y grandes cornisas, que los hacen aún más vulnerables.



Figura 13.5. Ejemplos de daños causados por el terremoto de Wenchuan: a) edificio de 9 pisos colapsado; b) calzada destruida por colapso del talud; c) vía férrea interrumpida por la caída de una enorme roca; d) boca de túnel taponada por un deslizamiento; e) colapso de puente de carretera; f) chimenea de ladrillo rota e inclinada; pagoda típica antes (g) y después (h) del terremoto.

Fuente: Zifa, 2008.

En el siglo XX, el uso del hormigón y el acero en la edificación permitió construir nuevos tipos de edificios, muchos de ellos altos, esbeltos y con formas arquitectónicas atrevidas. Pero diferentes catástrofes sísmicas pusieron de manifiesto la necesidad de tener en cuenta las acciones sísmicas en el proyecto y construcción de estas estructuras. Cuando un edificio sufre un terremoto, las fuerzas horizontales de inercia son importantes. Las conexiones entre elementos estructurales suelen ser los puntos que

más sufren; las uniones viga-pilar y losa-pilar son pues importantes para asegurar un adecuado comportamiento sísmico. Debe evitarse la rotura de estos nudos que se hallan sometidos a fuerzas de compresión y tracción transmitidas por los elementos estructurales que concurren en ellos. El confinamiento del hormigón, con cercos y anclajes, ayuda a fortalecer estas uniones. No es trivial evitar daños en estos puntos críticos pero, para evitar víctimas, es fundamental conseguir que los

edificios no colapsen. La ductilidad de las estructuras permite evitar roturas frágiles y colapsos prematuros, pero puede conducir a desplazamientos excesivos que también son causa de daño estructural. Así pues, aunque interesa que los edificios tengan suficiente ductilidad para evitar un posible fallo frágil, conviene limitar dicha ductilidad para reducir el daño por sismo. A partir de los años 20 del siglo pasado, las normas de diseño sismo-resistente han evolucionado paulatinamente, incorporando los avances en el conocimiento de los terremotos, de la respuesta sísmica de los edificios, de la resistencia de los materiales y del cálculo estructural estático y dinámico. Es preciso dotar a los edificios de hormigón armado de una adecuada capacidad de deformación inelástica. Pero lo ideal para controlar el daño es asegurar un equilibrio entre la rigidez, la resistencia y la ductilidad global de la estructura. A partir del año 1995 se establecen las bases del llamado “diseño por prestaciones” (*performance based design*) que establece los requisitos de diseño dependiendo de la función del edificio. De esta forma se persigue no sólo evitar la pérdida de vidas, sino también reducir el impacto económico garantizando un funcionamiento normal de las infraestructuras y edificios cuando ocurre un terremoto. Así pues, los



Figura 13.6. Algunos de los aspectos constructivos desaconsejados que hay que evitar: a) Irregularidad en planta; crecimiento de la superficie de las plantas con la altura; b) pilares cortos en todos los pisos de un edificio; c) juntas pilar-forjado con comportamiento de corte directo; d) discontinuidad de pilar en las plantas inferiores del edificio; e) falta de arriostramiento del pilar a nivel del forjado.

Fuente: Barbat et al. 2008.

relacionada con la palabra *risko* que identifica uno de los peligros de los navegantes. Así, la palabra *arriesgar*, relacionada con la exposición a un peligro, significaría, originariamente, “dirigirse hacia una roca o peñasco”. El *Diccionario de la lengua española*, de la Real Academia define “riesgo” como: “contingencia o proximidad de un daño” y, a su vez, “contingencia” se define como la “posibilidad de que algo suceda o no suceda”. McGuire (2004) define el “riesgo sísmico” como la “probabilidad de que una comunidad experimente una pérdida o de que su entorno edificado sea dañado por causa de terremotos”. Esta pérdida debe ser cuantificable y puede concretarse en un coste económico, en el número de víctimas o en el coste de reparación de una instalación o servicio. El riesgo sísmico puede calcularse mediante la pérdida asociada a un conjunto de terremotos y su correspondiente probabilidad de ocurrencia. Por consiguiente, los estudios de riesgo sísmico son herramientas para la prevención, protección y gestión y requieren considerar los siguientes aspectos: 1) evaluar la peligrosidad: el terremoto y sus probabilidades de ocurrencia; 2) evaluar la vulnerabilidad: el edificio o bien expuesto y su capacidad para resistir las acciones sísmicas; 3) evaluar el daño: las funciones de daño o funciones de pérdida que cuantifican el daño

esperado cuando el edificio sufre la acción sísmica; 4) calcular el valor económico: el análisis de coste y 5) tomar decisiones y gestionar el riesgo. En este capítulo nos referimos principalmente a los tres primeros aspectos. Los dos restantes no son sencillos ya que incluyen aspectos socioeconómicos y políticos relacionados con el modelo de desarrollo que genera grandes desequilibrios entre grupos sociales y entre países. En general, todos los aspectos relacionados con el riesgo sísmico requieren estudios multidisciplinares en los que es fundamental la participación también de las autoridades con responsabilidad en la protección civil y en la planificación y gestión de emergencias.

Escenarios de riesgo sísmico

Los escenarios de riesgo sísmico son una reproducción virtual de las situaciones esperadas en el caso de ocurrir un terremoto. Esta visualización del impacto de un terremoto sobre una comunidad es sumamente útil para conocer, prevenir, gestionar y reducir el riesgo, pero también para planificar acciones y emergencias.

Existen diferentes técnicas para el diseño y análisis de escenarios sísmicos; el “Método del Índice de

Vulnerabilidad” (MIV) y el “Método Basado en el Espectro de Capacidad” (MBEC) son las dos técnicas más avanzadas. El MIV define el terremoto mediante su intensidad EMS’98, el edificio mediante un índice de vulnerabilidad y usa funciones semi-empíricas para evaluar el daño. El MBEC adopta procedimientos y técnicas relacionadas con el diseño sismorresistente. El MBEC se desarrolló en el marco del programa Hazus 99 (2002) donde se desarrolla una metodología para la estimación de pérdidas por terremoto. Nuevas versiones del MIV y del MBEC se han desarrollado para su aplicación a ciudades europeas. En el MBEC es preciso disponer de información estructural del edificio y hallar su espectro de capacidad, que define la deformación del edificio en función de la aceleración que sufre. Además, este método requiere obtener el llamado “punto de capacidad por demanda” que define el nivel de desplazamiento que el terremoto va a producir en la estructura y que se usa para estimar las probabilidades de los estados de daño, mediante las curvas de fragilidad. La tabla 13.3 muestra los estados de daño tal como se consideran en el MIV y en el MBEC. También se cuantifica la razón del coste de reparación respecto al coste de reposición. La aplicación del MIV y del MBEC a un caso práctico se describe a continuación.

EJEMPLOS DE DAÑO EN EDIFICIOS(1)		DAÑO (%) ⁽²⁾	DESCRIPCIÓN DE LOS ESTADOS O GRADOS DE DAÑO ⁽¹⁾		GRADOS DE DAÑO	
Mampostería	Hormigón				MIV ⁽³⁾	MBEC ⁽⁴⁾
		0 %	Nulo Sin daño estructural Sin daño no estructural		0	0
		0-10 %	Leve (leve o inobservable) Sin daño estructural Daño no estructural leve		1	1
		10-30%	Moderado Daño estructural leve Daño no estructural moderado		2	2
		30-60 %	Severo (entre considerable y fuerte) Daño estructural moderado Daño no estructural fuerte		3	3
		60-100%	Extensivo (muy fuerte) Daño estructural fuerte Daño no estructural muy fuerte		4	4
		100%	Completo (destrucción) Daño estructural muy fuerte Colapso casi total o total		5	

Aplicación

Barcelona, con 1,6 millones de habitantes, es la segunda ciudad de España y en su área metropolitana vive más de la mitad de la población de Cataluña, constituyendo un paradigma de ciudades situadas en regiones donde el peligro sísmico es entre bajo y moderado pero que, al acumular un gran valor socio-económico, tienen un riesgo elevado. Así pues, de acuerdo con la normativa sísmica española NCSE-02, y a diferencia de Madrid, la

amenaza sísmica en Barcelona se halla dentro de los niveles para los que la “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico” (Ministerio de Interior, 1995) obliga a efectuar estudios de riesgo sísmico y planes de emergencia. Es en este marco que se han realizado numerosos estudios tanto de peligrosidad, incluyendo análisis de los efectos de suelo, como de riesgo sísmico. El esfuerzo conjunto del Instituto Geológico de Cataluña, del Ayuntamiento de Barcelona y de la

Tabla 13.3. Estados de daño. El % representa el porcentaje del valor económico de reparación del bien respecto al valor reposición.

Fuente: (1) Grünthal, 1998; (2) ATC-13, 1985; (3) Risk-UE, Milutinovic y Tredafiloski, 2003; (4) Hazus 99, 2002.

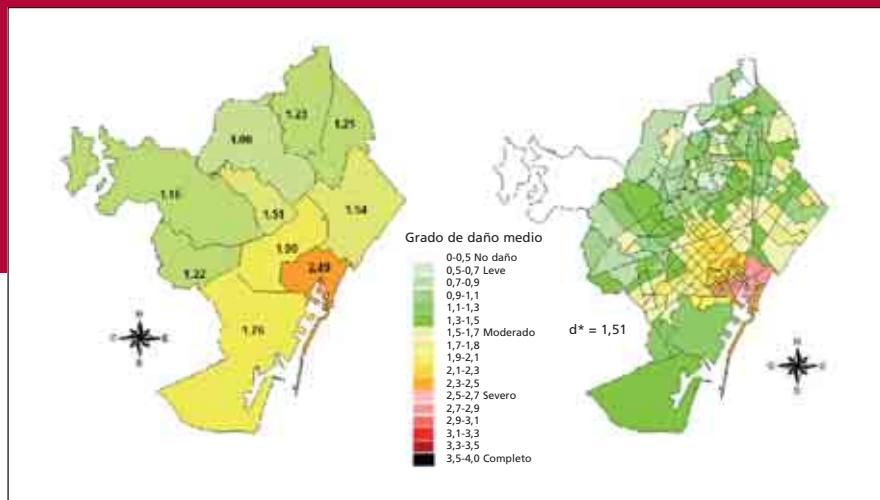


Figura 13.7. Distribución del daño esperado para el escenario *probabilista* usando el MBEC. A la izquierda se muestran los resultados por distritos; a la derecha se muestra un mapa de mayor resolución a nivel de zonas estadísticas propias del Ayuntamiento de Barcelona.

Universidad Politécnica de Cataluña ha permitido diseñar escenarios sísmicos específicos y disponer de una sofisticada base de datos sobre los edificios, lo que hizo posible que la ciudad se constituyera en una de las ciudades europeas piloto para la aplicación de las técnicas MIV y MBEC en el marco del proyecto europeo Risk-UE. Para ello se han definido dos escenarios sísmicos, uno desde una óptica *determinista* y otro desde una óptica *probabilista*. En el caso *determinista* se establece un terremoto característico; habitualmente, se utiliza el terremoto más fuerte ocurrido en la región. En este caso se ha tomado un terremoto ocurrido en 1448 en Cardedeu, a una distancia de 25 km del centro de Barcelona y a una profundidad de 7 km. En el caso *probabilista* se define el movimiento del

suelo con una determinada probabilidad de excedencia. Las normas sísmicas usan el sismo con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, que corresponde a un periodo de retorno de 475 años. Tanto el escenario *determinista* como el *probabilista* tienen en cuenta los factores de amplificación por causa de los efectos de suelo. Los suelos de la ciudad de Barcelona se han clasificado en 4 tipos: suelos duros y consistentes (tipo R) en los afloramientos rocosos de Collserola y de Montjuïc, suelos muy blandos (Tipo I) en el frente de costa y en los deltas de los ríos Besós y Llobregat y dos tipos de calidad intermedia: unos cercanos a la parte alta de la ciudad (Tipo III) y otros cercanos a los suelos blandos (Tipo II).

Barcelona tiene más de 75.900 edificios de uso residencial que albergan unas 600.000 viviendas. La densidad media de población es de 15.635 hab/km² aunque nueve barrios sobrepasan los 50.000 hab/km² y una zona tiene un pico de densidad de

135.000 hab/km². Además de los datos sobre la población, la base de datos disponible contiene información detallada sobre la topografía y la geología de sus suelos y, lo que es fundamental para estudios de riesgo, sobre sus edificios, de los cuales se conoce, de forma individual, la geometría en planta y en altura, la antigüedad, el tipo de construcción y su ubicación absoluta y relativa dentro de la correspondiente manzana. Todo ello ha permitido la construcción de un sistema de información geográfica sobre plataforma ArcGis que ha hecho posible la estimación y representación de los mapas de daño esperado para los escenarios sísmicos considerados. La figura 13.6 muestra la distribución del daño esperado para el escenario *probabilista* analizado mediante el MBEC. La figura 13.7 muestra el caso del escenario *determinista* analizado mediante el MIV. Esta misma figura muestra otros tipos de mapas muy útiles para los servicios de protección civil ya que permiten representar las probabilidades de que ocurra un determinado estado o grado de daño. Finalmente, la figura 13.8 muestra la distribución de personas heridas y el coste económico de un terremoto de las características del analizado. Una vez diseñada y preparada la herramienta informática para el análisis de escenarios, es posible analizar y evaluar, de forma

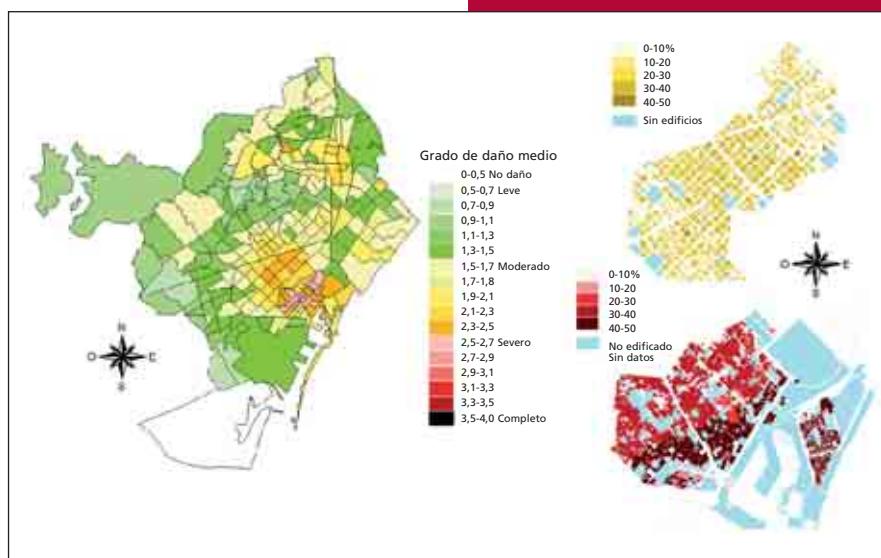


Figura 13.8. Distribución del daño esperado para el escenario *determinista* usando el MIV. A la derecha se muestran otros tipos de mapas de riesgo que representan las probabilidades de que ocurra un determinado grado de daño: para el grado de daño moderado en el distrito del Eixample (arriba) y para el estado de daño severo en el distrito de Ciutat Vella (abajo).

relativamente sencilla, el impacto de los posibles terremotos en la ciudad, lo cual constituye un excelente instrumento para la prevención y protección sísmica.

Reflexión final

Hace poco más de un siglo, apenas conocíamos las causas de los terremotos. Hacia mediados del siglo XX fuimos capaces de entender que los terremotos son un fenómeno natural causado por el dinamismo del interior de la Tierra que, en su superficie, se manifiesta en la tectónica de placas. Ya avanzado el siglo XX aprendimos técnicas que permiten controlar el

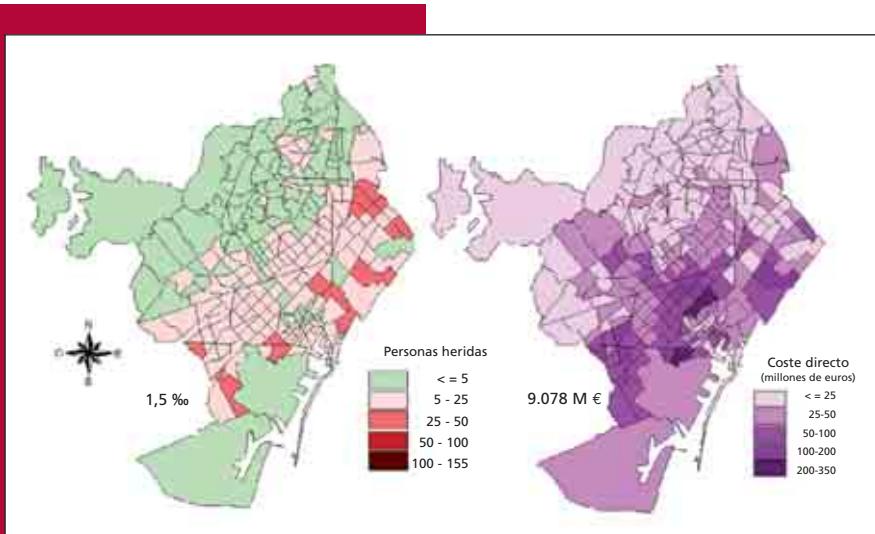


Figura 13.9. Distribución de las personas heridas para el escenario probabilista usando el MBEC. Distribución del coste en millones de euros para el mismo escenario.

potencial destructor de los terremotos sobre los edificios mediante el diseño y construcción sismorresistente. Sin embargo el modelo urbanista de desarrollo fomenta la edificación compulsiva. Además, olvidar experiencias negativas es un buen mecanismo de defensa del hombre que

le ayuda a mirar al futuro sin temor, pero la ausencia de memoria colectiva es poco inteligente si contribuye a ignorar las más elementales medidas de protección sísmica. Es por estas dos últimas razones que terremotos relativamente pequeños siguen causando grandes pérdidas. En el caso de Barcelona, el análisis mediante terremotos históricos permite prever centenares de muertos y heridos y miles de personas sin hogar. El coste probable se acerca a los 10.000 millones de euros, que es el presupuesto total de la ciudad para cinco años. Las catástrofes sísmicas siguen siendo una de las asignaturas pendientes de nuestro progreso. En consecuencia, seguiremos teniendo malas noticias. La paradoja es que disponemos de conocimiento y tecnología para controlar el impacto de los terremotos. ¡Ojalá que este siglo XXI vea una drástica reducción de estos desastres!