



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO, CARTOGRÁFICA Y GEOFÍSICA

**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO MEDIANTE
MÉTODOS AVANZADOS Y TÉCNICAS GIS.
APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA.**

TESIS DOCTORAL
(Volumen I)

Autora:

M^a Nieves Lantada Zarzosa

Directores:

Dr. Luis G. Pujades Beneit

Dr. José A. Gili Ripoll

Barcelona, 2007

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los efectos devastadores que tienen los fenómenos naturales sobre los edificios, las infraestructuras y la población en zonas urbanas, son una de las manifestaciones más impactantes a las que el hombre debe hacer frente desde hace siglos. Hablamos de riesgo como potencial de pérdida, de forma que el riesgo natural se define mediante la probabilidad de pérdida por causa de fenómenos naturales. La evaluación del riesgo es un primer paso para su prevención, minoración y gestión. El principal objetivo de este trabajo se orienta hacia la evaluación del riesgo sísmico en grandes zonas urbanas con una aplicación a una ciudad donde el peligro sísmico, entendido como la probabilidad de que ocurran sismos con capacidad destructora, es entre moderada y baja. Métodos y técnicas avanzadas de evaluación del riesgo sísmico se aplicarán a la ciudad de Barcelona.

Realmente, la evaluación de riesgo, es una tarea multidisciplinar en la que es preciso considerar una gran cantidad de factores que afectan diversas ramas de la ciencia, la

tecnología, la sociología, la economía y la gestión. Particularmente delicada es la evaluación del riesgo en zonas urbanas, donde reside la mayor parte de la población mundial y en las que existe una gran cantidad de actividades y servicios, públicos y privados, cuya interrupción induce daños añadidos a los directamente causados por el fenómeno natural.

En los últimos diez años diversos terremotos han puesto de manifiesto la gran influencia que sigue ejerciendo el comportamiento de los edificios de una ciudad en los resultados finales de pérdidas humanas y económicas. Ejemplos de éstos, son el terremoto ocurrido en octubre de 2005 en el del Norte de Pakistán, con más de 80 000 víctimas y más de 780 000 edificios afectados, o el de Kocaeli en Turquía en agosto de 1999, con más de 18 000 muertos, 26 000 viviendas destruidas y 320 000 dañadas, cuyo coste fue valorado en más de 20 billones de dólares. A todo ello se une que la mitad de las principales ciudades del mundo, muchas de ellas con una población entre 5 y 28 millones de habitantes, se hallan en áreas de elevada peligrosidad sísmica. Se hace por tanto patente la necesidad de reducir el riesgo sísmico, mejorando el diseño sismorresistente de las nuevas construcciones, a la vez que se ponen en marcha acciones preventivas para que las ya existentes no colapsen.

Para diseñar de forma efectiva planes de emergencia y definir medidas correctoras que ayuden a controlar y reducir el riesgo existente, es esencial disponer de escenarios de riesgo de la ciudad, sobre los cuales realizar una correcta identificación de los edificios más vulnerables y de aquellas áreas críticas que requerirán mayor atención. Dichos escenarios pueden ayudar a avanzar, de forma más efectiva, en la mitigación del riesgo y en la creación de planes de emergencia y, de ese modo, reducir las pérdidas que puede ocasionar un fenómeno sísmico, tanto desde el punto de vista físico, como social y económico.

El desarrollo y, sobre todo, la aplicación de diferentes metodologías de modelado del riesgo sísmico deben adaptarse, en cada caso, al nivel de información disponible; dicha información varía en gran manera según las regiones, y suele estar directamen-

te relacionada con el nivel de amenaza sísmica y el desarrollo socioeconómico de la zona de estudio. Los Sistemas de Información Geográfica¹ constituyen una avanzada herramienta de ayuda en la toma de decisiones, que debe emplearse en los estudios de riesgo, especialmente en la creación de escenarios de riesgo en zonas urbanas, en las cuales se hace imprescindible la gestión de una gran cantidad de información espacial y temática.

El proyecto Risk-UE, cuyos datos concretos se describen más abajo, fue llevado a cabo con el objetivo de desarrollar y homogeneizar metodologías avanzadas de evaluación del riesgo sísmico a nivel europeo. Los métodos y técnicas puestas a punto durante la realización del proyecto se describen y se aplican a la ciudad de Barcelona con el objetivo de evaluar el daño físico directo esperado en sus edificios de viviendas y de analizar otros aspectos relevantes del riesgo sísmico, principalmente los efectos esperados en la población y el coste económico.

1.2 Iniciativas relevantes de análisis de riesgo y antecedentes en Barcelona

Desde un punto de vista sísmico, la década de los 70 del siglo XX fue particularmente catastrófica. El mundo tomó una especial conciencia de la importancia y del potencial destructor de los terremotos. El aumento de la población y la construcción de edificios de comportamiento sísmico inadecuado, aumentó aún más el impacto negativo de los terremotos. A partir de los años 80 aparecen iniciativas y herramientas con el objetivo de contribuir a prevenir el daño sísmico esperado en las grandes ciudades. En este apartado se describen brevemente algunas iniciativas y proyectos relevantes de ámbito internacional. Por otra parte, en 1995 se publica en España la directriz básica de protección civil frente a terremotos, lo que obliga a las comunidades y ciudades de España a realizar estimaciones del riesgo y, en su caso, a for-

¹ Sistemas de Información Geográfica (SIG) o *Geographic Information Systems* (GIS)

malizar planes de emergencia sísmica. En este sentido se describen también aquí de forma somera, algunas iniciativas nacionales y algunos estudios previos sobre el riesgo sísmico en Barcelona.

1.2.1 Iniciativas internacionales

Además de la metodología de análisis de riesgo propuesta en 1985 (ATC-13, 1985) por el *Applied Technology Council* (ATC) bajo los auspicios de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), a nivel internacional destacan cuatro grandes proyectos que integran aspectos del riesgo sísmico y que emplean Sistemas de Información Geográfica: el proyecto RADIUS, cuyo objetivo era el estudio del riesgo sísmico en nueve ciudades del mundo, el programa HAZUS, que proporciona una herramienta de análisis y cuantificación de diferentes riesgos naturales en Estados Unidos, incluyendo el riesgo sísmico, y los proyectos SERGISAI y Risk-UE a nivel europeo. Estas cuatro iniciativas se comentan brevemente a continuación.

RADIUS

El proyecto RADIUS² (Okazaki y RADIUS, 2000; RADIUS, 2000) fue promovido por la secretaria de la *International Decade for Natural Disaster Reduction* (IDNDR) que tuvo lugar en la última década del siglo XX y fue llevado a cabo bajo los auspicios de las Naciones Unidas entre los años 1997 y 1999. Su objetivo global fue promover actividades que mitigasen el riesgo sísmico en áreas urbanas, especialmente en países en vías de desarrollo. El estudio se centró en nueve ciudades vulnerables a terremotos, tsunamis o deslizamientos de tierras, distribuidas por todo el mundo. Esta iniciativa persiguió tres objetivos concretos principales:

² *Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic Disasters*

- Desarrollar escenarios de daño sísmico y planes de gestión de riesgo sísmico en las nueve ciudades seleccionadas.
- Desarrollar un manual práctico para la evaluación de riesgo sísmico en áreas urbanas.
- Aumentar el conocimiento sobre riesgo sísmico en las comunidades donde fue implantado el proyecto.
- Promover el intercambio de información para la mitigación del riesgo sísmico de la ciudad.

HAZUS

HAZUS³(FEMA/NIBS, 1999), es un programa desarrollado por la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), junto con el *National Institute of Buildings Sciences*, NIBS (NIBS, 2000). Esta metodología es aplicable a los Estados Unidos para la estimación de pérdidas por riesgos naturales como son: terremotos, inundaciones, huracanes, tornados, tormentas de oleaje en la costa, tormentas invernales violentas, tormentas con truenos y granizo. Se pretende que las pérdidas estimadas con HAZUS sean utilizadas por organismos oficiales locales, regionales y estatales, para que puedan planificar y estimular los esfuerzos de mitigación para reducir pérdidas antes de que ocurra un terremoto y prepararse para una respuesta de emergencia y recuperación de cara a terremotos posteriores.

HAZUS incorpora los siguientes elementos: riesgos potenciales de la Tierra, inventario de elementos expuestos al riesgo, daños físicos directos, daños físicos inducidos, pérdidas económicas y sociales directas, y pérdidas económicas indirectas. El grado de sofisticación de la estimación irá, por tanto, íntimamente relacionado con la precisión y detalle de los datos disponibles. La metodología se encuentra reflejada en un manual técnico, y permite ser implementada en un PC con un Sistema de Información Geográfica (*MapInfo 5.5/5.0*, *ArcView 3.2* o *ArcGis 9*).

³ HAZUS. Multihazard Loss Estimation Methodology

La metodología propuesta por HAZUS ha sido comprobada con una serie de terremotos pasados y contrastada por expertos pero, al igual que todas las metodologías para obtener estimaciones, tiene inherentes una serie de incertidumbres, algunas debidas a lo limitado de los conocimientos científicos de los terremotos, y otras debidas a la necesidad de simplificación y aproximaciones inherentes en el análisis.

SERGISAI

A nivel europeo, el proyecto SERGISAI⁴ (Cella *et al.*, 1998; SERGISAI, 1998) desarrolló una metodología de evaluación de riesgo sísmico con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica y técnicas de Inteligencia Artificial. La metodología se aplicó para reproducir escenarios de riesgo a diferentes escalas: regional, subregional y local, considerando aspectos físicos, sociales y humanos. Los estudios a nivel regional y subregional se realizaron en términos de aceleración máxima del suelo para las regiones italianas de la Toscana y la Garfagnana. El estudio a nivel local se centró en la ciudad de Barcelona, para lo cual se empleó el método italiano del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984), aplicado a los edificios residenciales de mampostería no reforzada y hormigón armado del distrito del *Eixample*. De este modo, una vez calificados los edificios mediante un índice de vulnerabilidad, utilizando relaciones empíricas vulnerabilidad-daño, se obtuvieron escenarios de daño para diferentes niveles de intensidad MSK y de aceleración sísmica. Los resultados de la aplicación a Barcelona constituyeron la tesis doctoral de Mena (2002).

Risk-UE

El principal objetivo del proyecto Risk-UE⁵ (Risk-UE, 2003; Mouroux *et al.*, 2004) era proponer métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico que permitieran incorporar las características de los edificios, del patrimonio cultural y de las sociedades urbanas típicas de Europa. Risk-UE desarrolla y aplica metodologías homogéneas y avanzadas para el estudio de la amenaza, de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en áreas urbanas europeas. Esta iniciativa se centra en los edificios actuales e históricos, las líneas vitales y la organización social y funcional, es decir, el sistema urbano propio de la ciudad. El proyecto tuvo la virtud de involucrar a las autoridades municipales con responsabilidad en la protección civil y en la gestión del riesgo y se aplicó a 7 ciudades europeas, entre las que figuraba la ciudad de Barcelona.

La organización modular del proyecto comprendió los siguientes módulos de trabajo o *workpackages (WP)*:

- WP1: Características distintivas europeas. Sistema de Información Geográfica (GIS), inventario, base de datos y tipologías de los edificios.
- WP2: Estudio de peligrosidad sísmica.
- WP3: Análisis de la Exposición del Sistema Urbano (USE).
- WP4: Estudio de vulnerabilidad de los edificios actuales.
- WP5: Estudio de vulnerabilidad del casco antiguo de las ciudades, de los monumentos y edificios históricos.
- WP6: Estudio de vulnerabilidad de las líneas vitales y las estructuras esenciales.
- WP7: Escenarios de riesgo sísmico

⁴ *SEismic Risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques.*

⁵ [*The Risk-UE project: An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns.*](#)

Los módulos comprendidos entre el WP8 y WP14, ambos inclusive, se dedicaban a la aplicación de las metodologías propuestas a siete ciudades europeas. Concreta y respectivamente a: Barcelona en España, Bitola en Macedonia, Bucarest en Rumania, Catania en Italia, Niza en Francia, Sofía en Bulgaria y Tesalónica en Grecia. El actual *Institut Geològic de Catalunya*, que hasta hace poco era un servicio específico de *l'Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC), lideró la participación española en el proyecto coordinando la participación del Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), y del *Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya* (ITEC) que, junto con el Ayuntamiento de la ciudad, participaban en el mismo. La contribución de Barcelona fue relevante no sólo en la aplicación sino también en el desarrollo de las metodologías. Esta tesis es uno de los frutos de estas colaboraciones en el marco de este proyecto.

1.2.2 Iniciativas en España

El marco legal vigente en España para la gestión de emergencias y prevención de catástrofes para fenómenos sísmicos incluye la ley 2/1985, del 21 de enero, de Protección Civil (BOE, 21/01/85), y la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico, dictada por Resolución de 5 de mayo de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior (BOE, 1995). Esta Directriz Básica ha impulsado el desarrollo de estudios de riesgo sísmico en España. Con todo, los estudios y análisis de riesgo sísmico realizados con técnicas GIS, no son muy numerosos, debido a que se trata de un país donde el peligro sísmico es moderado. Sin embargo, en la Península Ibérica ha habido grandes terremotos históricos producidos por los movimientos diferenciales de las Placas Tectónicas Africana y Euroasiática. Uno de los primeros estudios sobre riesgos naturales utilizando GIS fue el realizado en el Pirineo Aragonés por el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGME) y la Diputación General de Aragón, en colaboración con la empresa EPTISA. Todos los datos recogidos se integraron en un GIS para crear el *Mapa de Aptitud a la Construcción* (Alafont y Ortiz, 1999). Posteriormente, en el año 1997, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) realizó un proyecto de

microzonificación sísmica en la ciudad de Granada y su entorno, que integraba mediante GIS diversa información, referente a la licuefacción, pendientes del terreno y diseño sísmico de edificios (Pascual y Carreño, 1999). Si bien la Dirección General de Protección Civil de España tiene a su cargo proporcionar herramientas de evaluación de riesgos, en el sentido más amplio de la palabra, y promover la protección de la población sometida a ellos, a nivel nacional, el Instituto Geográfico Nacional se ha ocupado y se ocupa de la vigilancia sísmica y del análisis del peligro sísmico en España; cuando hablamos del riesgo sísmico específico, incluyendo los términos de peligrosidad, vulnerabilidad y coste, probablemente el actual *Institut Geològic de Catalunya*, ha sido, y es, una institución pionera.

En este apartado se revisan someramente tres iniciativas que han supuesto un importante impulso a los estudios de riesgo sísmico en España. Estas iniciativas se resumen en tres subapartados: el plan de emergencia SÍSMICA de CATALUÑA, (SISMICAT), el programa Simulación de Escenarios Sísmicos (SES 2002) y los estudios específicos en la ciudad de Barcelona.

Plan de Emergencia Sísmica de Cataluña (SISMICAT)

Los estudios de riesgo sísmico realizados en Cataluña en general, y en la ciudad de Barcelona en particular, muestran que, a pesar de encontrarse en una zona considerada como de sismicidad moderada a baja, la vulnerabilidad de sus edificios es alta, de forma que el daño esperado por causa sísmica es relativamente alto incluso para terremotos relativamente moderados. Los estudios que aquí se describen se han realizado en el marco del desarrollo del plan especial de emergencia SÍSMICA de CATALUÑA, SISMICAT⁶ (DOGC, 2003; SISMICAT, 2003), cuyo principal objetivo es dar una respuesta, rápida y eficaz, dirigida a minimizar los posibles daños a las personas, bienes y medioambiente, y a restablecer los servicios básicos para la población en el menor tiempo posible.

⁶ [SISMICAT](#): *Pla especial d'emergencies sísmiques a Catalunya*

Chávez (1998), (véase también Roca *et al.*, (2006), desarrolla matrices de probabilidad de daño específicas a partir de una extensa base de datos sobre daños observados en el Sur de Italia durante el terremoto de Irpinia ($M_w=6.9$), ocurrido el 23 de noviembre de 1980 en el Sur de Italia. Este terremoto fue percibido en más de 600 municipios. Los autores emplearon técnicas GIS para desarrollar escenarios de riesgo sísmico en Cataluña tanto a nivel regional como a nivel local. Para cuantificar la vulnerabilidad de los edificios de viviendas y los edificios especiales de Cataluña, se basaron en los datos de edad y altura y en el juicio de expertos, realizando una clasificación simplificada compatible con la Escala Macrosísmica Europea, EMS-98, (Grunthal, 1998). Para la acción sísmica consideraron los mapas de intensidades macrosísmicas con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años, que habían sido desarrollados por Secanell (1999) en el marco de un estudio exhaustivo y completo del peligro sísmico de Cataluña.

También en el marco del desarrollo del SISMICAT la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado diversos estudios sobre la respuesta sísmica de las líneas vitales de Cataluña cuyos resultados han originado informes confidenciales para la *Subdirecció General de Prevenció i Planificació de la Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil del Departament d'Interior* de la *Generalitat de Catalunya* (Pujades, 2006). Estos informes han quedado como documentos anejos a la memoria del SISMICAT. El *Institut Geològic de Catalunya* sigue siendo el responsable de la vigilancia y alertas sísmicas en Cataluña y ha desarrollado una herramienta rápida y eficaz para detectar la intensidad del sismo y reproducir de forma automática y casi instantánea el escenario de daños esperados. Una vez establecido el nivel de alerta, el plan involucra todos los servicios y entidades que deben intervenir en la gestión de la emergencia. SISMICAT concreta la estructura organizativa y los procedimientos de actuación, los procedimientos de coordinación con el plan estatal, los sistemas de articulación con las organizaciones de las administraciones locales, las modalidades de actuación, de acuerdo a los criterios de clasificación, los procedimientos de información a la población y la catalogación de los medios y recursos específicos para hacer frente a las emergencias producidas por movimientos sísmicos. Además, en base a la zonificación sísmica del territorio y al

estudio de la vulnerabilidad de los edificios de las poblaciones de Cataluña, y de las infraestructuras y servicios esenciales, establece las zonas de Cataluña donde el riesgo es más elevado y determina qué municipios han de realizar el correspondiente Plan de Actuación Municipal.

Simulación de Escenarios Sísmicos (SES 2002)

Con el objetivo de proporcionar a los municipios una herramienta que les permitiera efectuar el análisis del riesgo sísmico, establecido en la Directriz Básica, la Dirección General de Protección Civil, en colaboración con el Instituto Geográfico Nacional, promovió un programa informático para el desarrollo de escenarios sísmicos en España. Esta aplicación informática llamada Simulación de Escenarios Sísmicos (SES2002, 2002) contiene una extensa base de datos sobre los edificios y la población de todos los municipios de España. Este producto realiza una estimación rápida de los daños provocados por terremotos simulados o reales. Para cada municipio y terremoto se obtienen estimaciones de la distribución de la intensidad sísmica, daños a la población (número de muertos, heridos y personas sin hogar), y daños a las viviendas, con diferentes grados de daño.

Estudios previos en Barcelona

La tarde del 15 de mayo de 1995, a las 17:35 horas, un relativamente pequeño terremoto sacudió Cataluña, desde el Delta del Ebro hasta la costa Brava. De hecho, este terremoto de magnitud no mayor de 4.3 y de una intensidad MSK estimada en no más de IV grados en Barcelona, causó una alarma inusitada en la población, estimulando el interés y preocupación de las autoridades municipales sobre el peligro y riesgo sísmicos de la ciudad. La Universidad Politécnica de Cataluña en este momento ya tenía, en fase avanzada, estudios preliminares que fueron germen de ulteriores estudios, proyectos y desarrollos.

Con respecto a los inmuebles, Caicedo (1993) analizó la vulnerabilidad de 181 edificios de mampostería del distrito del *Eixample*. Barbat *et al.* (1996), Yépez (1996), Yépez *et al.* (1995) y Yépez (1994) emplearon técnicas de simulación para

evaluar la vulnerabilidad de los edificios de mampostería y de hormigón armado. Por encargo expreso del Ayuntamiento de Barcelona, Mañà (1997) se apoya en la escala MSK y en el conocimiento experto de los sistemas constructivos en uso en la ciudad, para realizar un estudio de riesgo sísmico para cuatro zonas de la ciudad de Barcelona: 1) *Ciutat Vella* y núcleos antiguos, 2) el *Eixample*, 3) Nueva construcción y 4) Barrios. El *Servei Geològic de Catalunya*, en este momento unidad estructural dependiente del *Institut Cartogràfic de Catalunya*, efectúa un estudio detallado de la vulnerabilidad sísmica de Cataluña (Chávez, 1998) incluyendo un estudio de detalle de la ciudad de Barcelona. Pero el primer estudio completo sobre vulnerabilidad sísmica de los edificios de la ciudad de Barcelona, realizado con técnicas GIS, fue el efectuado por Mena (2002), que llevó a cabo una evaluación detallada de la vulnerabilidad sísmica mediante el método italiano propuesto por Benedetti y Petrini (1984) y las funciones de vulnerabilidad-daño desarrolladas por Barbat *et al.* (1996) y Yépez (1996), para las dos tipologías constructivas más representativas de la ciudad de Barcelona: mampostería no reforzada y hormigón armado. Los edificios de mampostería (obra de fábrica de ladrillo), de Barcelona, no presentan ninguna consideración de diseño sismorresistente y son, posiblemente, también representativos de los edificios de este tipo en toda España. Los edificios de hormigón armado son de una tipología especial que consta de pilares y de forjados reticulares. Yépez (1996) ya detectó la alta vulnerabilidad de este tipo de edificios de hormigón cuando se comparan con la de los edificios de hormigón armado de pórticos. El hormigón armado con forjados reticulares es también de uso frecuente en países del Sur de Europa y de Latinoamérica. El Capítulo 7 de la tesis doctoral de Mena (2002) establece un análisis comparativo de los estudios realizados hasta aquel momento en Barcelona. Estos estudios fueron decisivos en la elaboración del plan de emergencia sísmica de Barcelona.

Más recientemente, los edificios de mampostería y de hormigón armado, típicos de la ciudad, han sido evaluados mediante el método del espectro de capacidad. Bonett (2003) halla curvas y espectros de capacidad para los edificios de mampostería y Moreno (2006) para edificios de hormigón.

Los edificios históricos también han sido objeto de estudio. Irizarry (2004) aplica el método del índice de vulnerabilidad y el método del espectro de capacidad, tal como fueron formulados en el Proyecto Risk-UE, para evaluar 68 monumentos importantes y edificios históricos de la ciudad, catalogados como Patrimonio Arquitectónico.

Con respecto a la acción sísmica esperada, el trabajo de Secanell (1999) establece los fundamentos para los escenarios probabilistas básicos de Barcelona, y Cid (1998) pone las bases de la microzonificación sísmica de los suelos. Irizarry (2004) evalúa dos escenarios sísmicos específicos, uno determinista y uno probabilista, que se cuantifican en términos macrosísmicos y en términos espectrales. El escenario determinista corresponde a un sismo histórico ocurrido a 25 km al Norte de la ciudad, mientras que el probabilista corresponde al terremoto con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años o, de forma equivalente, el que tiene un periodo de recurrencia de 475 años.

En referencia a otros aspectos relacionados con el riesgo sísmico, Irizarry (2004) efectúa el primer esfuerzo para incorporar lo que se ha dado en llamar la exposición del sistema urbano. El sistema urbano se analiza incluyendo aspectos como los servicios, la actividad económica y los recursos para afrontar la emergencia. Entre los servicios sobresalen los de salud, básicamente hospitales y centros de asistencia, y los de educación. La actividad económica incluye la evaluación de la capacidad comercial, industrial y turística. El análisis, realizado a nivel de barrios, pone de manifiesto un mayor riesgo en el casco antiguo de la ciudad.

Parte de los resultados de los trabajos de Bonett (2003) y de Moreno (2006) se usarán aquí para obtener matrices de probabilidad de daño para los edificios de mampostería y de hormigón armado respectivamente. Las acciones sísmicas previstas en los escenarios propuestos por Irizarry (2004), se usarán para obtener y analizar escenarios de daño y de riesgo cuya probabilidad de ocurrencia en la ciudad de Barcelona es razonable.

1.3 Objetivos de la tesis

Como se ha indicado en el apartado anterior, el *objetivo general* de esta tesis es *contribuir a cuantificar el riesgo sísmico en grandes ciudades con una aplicación concreta a la ciudad de Barcelona*. Para ello se usaran métodos avanzados de análisis del riesgo sísmico, una extensa y completa base de datos y herramientas de representación de la información y de los resultados de forma georreferenciada, es decir, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS). Este *objetivo global* se concreta en unos *objetivos metodológicos* generales y en unos *objetivos de aplicación* a la ciudad de Barcelona.

En cuanto a los *objetivos metodológicos*, esta tesis se propone:

1. Describir y analizar los conceptos y métodos relacionados con el modelado del riesgo sísmico en grandes ciudades. Para ello el estudio se apoyará en los desarrollos realizados en el entorno del proyecto Risk-UE.
2. Proporcionar las bases para crear una herramienta que, basada en técnicas GIS, sea sencilla de usar y de fácil exportación a otras regiones y ciudades. Esta herramienta debe ser una ayuda eficaz para, entre otras cosas, la prevención y minoración del riesgo sísmico, la elaboración de planes de emergencia y para la toma de decisiones referentes a la ordenación del territorio. Con este fin se establecerán relaciones entre los Sistemas de Información Geográfica y los modelos de evaluación de riesgo, mediante módulos que permitan efectuar una evaluación integrada del riesgo.

En cuanto a los *objetivos de aplicación* a la ciudad de Barcelona, esta tesis se propone:

3. Adoptar escenarios sísmicos razonables para la ciudad. Concretamente se adoptarán un escenario determinista y uno probabilista. Ambos escenarios han sido desarrollados por otros en términos de intensidad macrosísmica y en términos espectrales.
4. Compilar, depurar y estructurar la información referente a los edificios de viviendas de la ciudad. Para ello se creará una sofisticada, pero completa y

altamente fiable, base de datos compatible con la herramienta GIS. Se hará especial énfasis en la caracterización de los aspectos geométricos, estructurales y resistentes imprescindibles para la evaluación de su vulnerabilidad, capacidad y fragilidad sísmicas.

5. Definir una matriz tipológica específica que sea representativa de los edificios de viviendas de la ciudad y cuantificar la vulnerabilidad y fragilidad de los edificios que representan. Para cuantificar la capacidad y fragilidad de los edificios de mampostería y de hormigón armado este estudio se apoyará en trabajos específicos realizados por ingenieros estructurales.
6. Generar mapas del daño físico directo previsible en los edificios dedicados a viviendas, para los escenarios sísmicos adoptados, utilizando modelos y métodos de última generación.
7. Modelar y analizar otros aspectos relevantes del riesgo sísmico. Más concretamente se propone modelar y analizar los daños esperados en la población, el número de personas que quedan sin hogar y el impacto económico. También se modelarán y estimarán otros aspectos relevantes como el volumen de escombros producido por la crisis sísmica.

La realización de estos objetivos será de un valor inestimable para prevenir el riesgo, planificar la emergencia e identificar zonas críticas de la ciudad, permitiendo una toma de decisiones coherente y motivada, orientada a la minoración de los efectos de terremotos potenciales y a la pronta recuperación del normal funcionamiento de la sociedad.

1.4 Contenido de la memoria

Esta memoria consta de 10 capítulos y 5 anejos. El presente capítulo es introductorio y en él se establece la motivación del trabajo, se definen los objetivos y, a pesar de que el Capítulo 3 se dedica a revisar las metodologías utilizadas para modelar el riesgo sísmico, aquí también se han descrito algunas iniciativas relevantes, nacionales e internacionales, que se han convertido en estándares en los estudios de

riesgo sísmico. También se revisan someramente los antecedentes de los estudios del daño y riesgo sísmicos esperados en Cataluña y en Barcelona.

Los capítulos de la tesis se han organizado en dos partes. Los dos capítulos siguientes a éste constituyen la *primera parte* de la memoria que se dedica a los *conceptos y métodos*. Así pues, en el Capítulo 2 se describen los términos y conceptos relacionados con los riesgos naturales y su estudio mediante técnicas GIS, especialmente con el análisis del daño físico producido por terremotos en edificios de viviendas y en la evaluación de otros aspectos relacionados con su impacto. El Capítulo 3 es metodológico y en él se describen los enfoques, métodos y técnicas empleados en la literatura para modelar la predicción del daño esperado como herramienta para la obtención de escenarios sísmicos y de análisis del riesgo.

La *segunda parte* se dedica a la *aplicación de las metodologías* a la ciudad de Barcelona y comprende 7 capítulos. En el Capítulo 4 se describe la ciudad, haciendo un énfasis especial en su marco geotectónico, en su evolución histórica y social, en la organización administrativa de su territorio y en la distribución de su población. Estas características permitirán una mejor interpretación y comprensión de los resultados que se obtengan. En el Capítulo 5 se describe y caracteriza, de forma detallada y completa, toda la información que ha sido recogida, normalizada, tratada e integrada en una base de datos global para su tratamiento mediante herramientas GIS. De esta manera se está preparado para aplicar, de forma directa a los datos así compilados y organizados, los métodos y técnicas de evaluación del riesgo sísmico. Por causa de las características de este estudio, se ha dedicado una atención preferente a la documentación e información correspondiente a los edificios de viviendas. En el Capítulo 6 se analizan los datos disponibles de acuerdo a las dos metodologías propuestas en Risk-UE que, en los manuales del proyecto (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), se denominan como *Método de Nivel I* y *Método de Nivel II*; Para una mayor claridad, estos métodos aquí se denominarán respectivamente como *Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV)* y *Método del Espectro de Capacidad (MEC)*; El primero define la falta de resistencia de los edificios en términos de *vulnerabilidad*, el segundo en términos de *capacidad y fragilidad*. Por tanto, en este Capítulo 6 se evalúa la vulnerabilidad, capacidad y fragilidad de los edificios de

viviendas de la ciudad, que se clasifican en unas pocas tipologías representativas. La capacidad y fragilidad se aplica sólo a dos clases de edificios: mampostería no reforzada y hormigón armado. Estos dos tipos de edificios engloban a la mayor parte del parque edificado de Barcelona.

Como se verá con mayor profundidad en los dos capítulos siguientes, el riesgo, además del valor de los bienes expuestos y de su vulnerabilidad y fragilidad, depende en primer lugar de la peligrosidad, entendida como la probabilidad de que se produzca la acción capaz de ocasionar daño. Es así obvio que el riesgo sísmico en un sitio sin peligro sísmico, es decir, donde no existe ninguna probabilidad de que se dé un terremoto con potencial dañino, es nulo. De esta forma el análisis del riesgo parte del análisis del peligro que, en este tipo de estudios, suele cuantificarse mediante el terremoto con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años o mediante un terremoto histórico cuya ocurrencia es razonable. Nos referimos al primer escenario como *escenario probabilista* mientras que al segundo se le suele definir como *escenario determinista*. El tratamiento del problema de la peligrosidad sísmica de Barcelona se aborda en el Capítulo 7 donde se definen detalladamente los escenarios determinista y probabilista tanto en términos de intensidad macrosísmica como en términos de espectros de respuesta. Ambos escenarios, a los que se han incorporado también los efectos de suelo, se representan mediante la herramienta GIS puesta a punto para este trabajo usando el software ArcView[®] GIS.

Así pues el Capítulo 6 deja claramente definidos los edificios, mientras que el Capítulo 7 define las acciones sísmicas probables o razonables. Una vez definidos el edificio, en términos de índices de vulnerabilidad y de curvas de fragilidad, y el terremoto, en términos de intensidad macrosísmica y en términos espectrales, el Capítulo 8 se dedica al desarrollo de matrices de probabilidad de daño y a definir los escenarios de daño físico directo esperados. Las matrices de probabilidad de daño definen para cada edificio y para cada nivel de la acción sísmica el grado o nivel de daño esperado. En el método del índice de vulnerabilidad, la obtención de las matrices de probabilidad de daño se efectúa de forma elegante mediante una formulación compacta y sencilla que relaciona el grado de daño esperado con el índice de vulnerabilidad y con la intensidad macrosísmica. Las probabilidades de los

diferentes estados de daño se definen mediante una hipótesis sobre la función de distribución de probabilidad, concretamente se acepta la propuesta de la escala de intensidad EMS-98 según la cual el daño se distribuye de forma binomial. En el método del espectro de capacidad la obtención de las matrices de probabilidad de daño requiere un poco más de trabajo, ya que conlleva el cruce de los espectros de capacidad y de demanda para obtener la solicitud de desplazamiento (*performance point*), que el terremoto requerirá del edificio. Este trabajo previo, junto con toda la labor desarrollada en los capítulos anteriores permitirá finalizar el Capítulo 8 con los escenarios de daño físico directo que es razonable esperar en la ciudad de Barcelona.

Es bien conocido que las catástrofes sísmicas, aunque tienen su origen y causa principal en el daño físico directo y en la degradación de los edificios, estructuras e infraestructuras, van más allá, golpeando entre otros aspectos, a la población, al sistema de salud y a los sistemas productivos y socioeconómicos. En el Capítulo 9, se abordan otros aspectos que se modelan a partir del daño físico directo; concretamente los daños a la población, el coste económico y el volumen de escombros esperado. Entre los daños esperados a la población se cuantifica el número de víctimas y el número de personas que quedan sin hogar. Entre las víctimas se consideran, por separado, los fallecidos, las personas que requieren ser hospitalizadas y otros heridos. En el décimo y último capítulo, se sintetizan las principales conclusiones del presente trabajo.

La enorme cantidad de datos manejada en esta tesis, así como el alcance y sensibilidad de los resultados obtenidos han aconsejado incluir información complementaria y de detalle en cinco anejos, que se numeran utilizando las cinco primeras letras del alfabeto castellano. El Anejo A contiene información más detallada sobre las funciones estadísticas empleadas en las dos metodologías de la evaluación de la vulnerabilidad y el daño sísmico de edificios. En el Anejo B, se exponen los conceptos teóricos y utilidades más importantes de los Sistemas de Información Geográfica, con un especial énfasis en el programa ArcView[®] GIS; este *software* se ha empleado para crear una completa y sofisticada base de datos para lo que ha sido preciso, además de diseñar y crear su estructura, recopilar, introducir y depurar una extensa documentación referente a los suelos y edificios de la ciudad. El GIS y esta base de

datos han sido esenciales para la representación georreferenciada de los análisis realizados y de los resultados obtenidos. Es importante destacar que la herramienta GIS creada permite ir más allá de los mapas y niveles de representación de la información que se irán viendo en los sucesivos capítulos, ya que permiten obtener escenarios “*a la carta*”. Un buen ejemplo de la versatilidad, robustez y potencialidad de esta herramienta puede verse en el Anejo E donde se resumen los principales resultados obtenidos en formato de tablas detalladas para las diferentes divisiones administrativas de la ciudad (distritos, barrios y zonas de estudio). Este último Anejo se ha construido con la intención de transferir a las autoridades municipales los resultados de la investigación, en un formato que se ha considerado particularmente indicado para el conocimiento del riesgo, y para, en consecuencia, establecer las estrategias de mitigación que procedan y, en cualquier caso, para la prevención y para el diseño de planes de emergencia.

Es bien conocido que el riesgo sísmico va más allá de los aspectos y edificios aquí considerados y requieren efectuar también análisis sobre otros edificios, estructuras e infraestructuras diferentes de los edificios de viviendas. Con el objetivo de no perder de vista este enfoque global del riesgo, se incluye el Anejo C, en el cual se detallan los elementos físicos sensibles como, por ejemplo, los edificios especiales y esenciales y los edificios con valor patrimonial. También por completitud, en el mismo Anejo C, se hace referencia a las infraestructuras que requieren análisis específicos y que, muy probablemente, su estudio pierde interés y fiabilidad sin la contribución y el apoyo de las compañías privadas que prestan los denominados servicios vitales (“*lifelines*”). El análisis y estudio de estos otros sistemas fundamentales en el funcionamiento normal de la trama urbana se apuntan en el Capítulo 10 como líneas de trabajo e investigación futura. En cualquier caso es preciso decir también que, en referencia a las *líneas vitales*, se han efectuado estudios preliminares cuyos resultados indican que, para los niveles de peligrosidad típicos de la ciudad, no son esperables daños significativos.

Finalmente, el Anejo D, por una parte, describe de forma detallada los tipos de edificios de la matriz de tipologías adoptada en el proyecto Risk-UE y, por otra, unifica la nomenclatura usada en la codificación de los tipos de edificios de la ciudad,

que, en muchos casos, toman sus acrónimos de siglas de nombres en catalán, de forma que este anejo hace posible identificar los edificios de la ciudad con los tipos propuestos en la matriz tipológica adoptada, en Risk-UE, para los edificios de Europa.

Esta descripción del contenido de la memoria cierra este primer capítulo.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Iniciativas relevantes de análisis de riesgo y antecedentes en Barcelona	3
1.2.1 Iniciativas internacionales	4
1.2.2 Iniciativas en España	8
1.3 Objetivos de la tesis	14
1.4 Contenido de la memoria	15

REFERENCIAS

- Alafont, L. S. y Ortiz, J. (1999). Análisis de la peligrosidad sísmica en el Alto Aragón utilizando un Sistema de Información Geográfica. *I Jornadas de Sistemas de Información Geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*, Madrid, 97-109.
- Barbat, A. H., Yépez, F. y Canas, J. A. (1996). "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". *Earthquake spectra* **12** (3): 371-394.
- Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione." *L'industria delle Costruzioni* **149**: 66-78 (en italiano).
- BOE, Boletín Oficial del Estado (1995). *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico*. 15294-15304 pp.
- Bonett, R. L. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 474 pp.
- Caicedo, C. (1993). Vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas. Aplicación a un sector del Eixample de Barcelona. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 165 pp.
- Cella, F., Luzi, L., Meroni, F., Ober, G., Pergalani, F., Petrini, V., Tomasoni, R. y Zonno, G. (1998). *SERGISAI project final report. By the partner CNR-IRRS. Final Report*. Scientist in Charge: Gaetano Zonno. Contract Number: ENV4-CT96-0279. 71-220 pp.
- Chávez, J. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 323 pp.
- Cid, J. (1998). Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 215 pp.
- DOGC, Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya (2003), Resolución JUI/1915/2003, de 20 de mayo, por el que se da publicidad al acuerdo del Gobierno de 13 de mayo por el que se aprueba el plan especial de emergencias sísmicas de Cataluña (SISMICAT), DOGC N. 3912 de 26/672003, p. 12896, <http://www.gencat.net/interior/leg/2003r1915.pdf> (último acceso 23 de marzo de 2007) (en catalán)
- FEMA/NIBS: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences (1999). *HAZUS' 99 Technical Manual. Earthquake Loss Estimation Methodology*, vol. 1-3. Washington, D.C., USA. pp.
- Grunthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg. pp.
- Irizarry, J. (2004). An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System Barcelona. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 290 pp.

- Mañà, F. (1997). *Vulnerabilitat sísmica dels edificis de la ciutat de Barcelona*. ITEC, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona. pp. (en catalán)
- Mena, U. (2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 240 pp.
- Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings*. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.
- Moreno, R. (2006). Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en edificios: aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 332 pp.
- Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P. y Risk-UEteam (2004). The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. *Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering*, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No. 3329.
- NIBS, National Institute of Buildings Sciences (2000), <http://www.nibs.org/hazusweb/index.htm> (último acceso 23 de marzo de 2007)
- Okazaki, K. y RADIUS, T. (2000). RADIUS initiative for IDNDR- How to reduce urban seismic risk. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, CD-ROM.
- Pascual, G. y Carreño, E. (1999). Susceptibilidad al movimiento del terreno: Aproximación mediante un SIG. *1er Seminario Iberoamericano sobre nuevas tecnologías y gestiones de catástrofes. Resúmenes de la sesión técnica*, Madrid.
- Pujades, L. G. (2006). Comunicación personal, Barcelona
- RADIUS, Risk Assessment tools for DIagnosis of Urban areas against Seismic Disasters (2000), <http://www.geohaz.org/contents/projects/radius.html> (último acceso 16 de marzo de 2007)
- Risk-UE(2003), An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. Duration: 44 Months (15/01/2001-30/09/2004), <http://www.risk-ue.net/> (último acceso 23 de marzo de 2007)
- Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. y Reinoso, E. (2006). "A Simplified Method for Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings and Estimation of Damage Scenarios in Catalonia, Spain". *Bulletin of Earthquake Engineering* 4 (2): 141-158.
- Secanell, R. (1999). Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics. *Tesis doctoral*. Universidad de Barcelona. Barcelona. 335 pp. (en catalán)
- SERGISAI, SEismic Risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques. (1998), Commission of the European Communities Directorate General XII for Science, Research and Development.

Contract: ENV4-CT96-0279, <http://sergisai.mi.ingv.it/> (último acceso 23 de marzo de 2007)

SES2002 (2002). *Simulación de escenarios sísmicos, SES 2002. Manual técnico*. Ministerio del Interior. Dirección General de Protección Civil e Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 47 pp.

SISMICAT(2003), Pla especial d'emergències sísmiques a Catalunya, 33 pp., http://www.gencat.net/interior/esc/docs/esc_sismicat.pdf (último acceso 23 de marzo de 2007) (en catalán)

Yépez, F. (1994). Vulnerabilidad Sísmica de Edificios de Mampostería para Estudios de Riesgo Sísmico. *Tesis doctoral*. Tesis de Master, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. pp.

Yépez, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona (Spain). 215 pp.

Yepez, F., Barbat, A. H. y Canas, J. A. (1995). *Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona, monografía IS-14. 103 pp.