



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

A mi tía, Dorita.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos directores: el Dr. Lluís G. Pujades, que confió en mí y me dio la posibilidad de iniciar esta tesis y el Dr. Josep A. Gili. Muchas gracias a ambos por haberme asesorado, proporcionado información y corregido con detalle esta tesis, y en general por su paciencia conmigo, su gran dedicación y continuo apoyo durante el desarrollo de la misma.

Un agradecimiento especial también para el Dr. Alex Barbat, por el seguimiento de mi trabajo y su experto asesoramiento en la caracterización de las tipologías de la ciudad de Barcelona.

De igual forma quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones, que colaboraron conmigo durante el desarrollo del Proyecto Risk-UE y que contribuyeron a la culminación de esta tesis, especialmente a:

- El Dr. Sergio Lagomarsino y Dra. Sonia Giovinazzi y a los compañeros de trabajo de la UPC: Selma, Liliana, Javier Cid, y sobre todo a Ricardo Bonett y Rosangel Moreno por su ayuda y amistad.
- Los doctores Antoni Roca, Xavier Goula, Teresa Susgna, Janira Irizarry y Jordi Marturià de l' *Institut Geològic de Catalunya* (IGC).
- Fransesc, de la sociedad privada municipal *Informació Cartogràfica i de Base, S.A.*, por el valioso documento sobre la recogida de datos de la ciudad.
- El *Servei de Protecció Civil*, el *Departament d'Estadística* y l'*Institut Municipal d'Informàtica* del Ayuntamiento de Barcelona, por los documentos y datos que me han proporcionado.
- El Dr. Fructuós Mañà de l'*Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya* (ITEC).
- El *Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics* de Barcelona.
- Alfonso Pérez de la Universidad de Almería, por su ayuda en la aplicación del GIS en Motril (Granada).
- Los profesores Josep A. Gili y Càrol Puig de la E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, por su constante ayuda para descargarme de trabajo durante estos últimos cursos.
- Los profesores de la E.T. de Ingeniería Técnica Topográfica (EPSEB), especialmente Felipe Bull, y Amparo Núñez por su ayuda y apoyo en el trabajo y fuera de él.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos y compañeros de “carmañola”: Càrol, Marta, Hans, Rafael, Carles, Andrés, Rafa, Antonio, Marcel, Josep, Rodrigo y Úrsula entre otros, por hacer de la hora de la comida un rato de desconexión, ameno y divertido, incluso en la “cueva”. Y a los compañeros de la tercera planta, Chen, Desi, Antonio, Virma, Iván, Armando, Carlos... y sobre todo a Enric, por sus servicios como informático y secretario 24 horas, pero sobre todo por sus charlas y su compañía en los interminables viajes de metro.

Finalmente, sobran las palabras de agradecimiento a Carlos y a mi familia, que siempre han estado a mi lado. Gracias por el apoyo que me habeis dado, sobre todo aquellos días de vacaciones y fines de semana de trabajo delante del ordenador.

Este trabajo estuvo parcialmente financiado por el proyecto europeo de investigación “*An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns (RISK-UE)*”, EESD-ENV-99-2 (JO1999/C330/10), Comisión Europea.

RESUMEN

El aumento exponencial de la población mundial, con el consiguiente crecimiento de las grandes ciudades, caracterizado por una ocupación inadecuada del suelo, contribuye al aumento del daño producido por las catástrofes sísmicas. La alta concentración de población, edificios, infraestructuras y valor las convierte en zonas con un alto riesgo. La mayor parte de víctimas causadas por terremotos es debida al colapso de los edificios: alrededor del 90% de las muertes directas. Este trabajo es una contribución al desarrollo y aplicación de métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico en grandes ciudades y se ha estructurado en dos partes: la primera establece el marco teórico de los estudios de riesgo sísmico, detallando los modelos y desarrollos avanzados para la evaluación del daño físico sobre edificios residenciales y de su impacto sobre la población, así como otros aspectos con él relacionados; la segunda describe la aplicación a Barcelona. Para ello se ha construido una extensa y depurada base de datos con las características de situación, geométricas, estructurales y constructivas de los edificios con viviendas.

Se usan dos métodos que se aplican a dos escenarios. El primer método, al que nos referimos como Método del Índice de vulnerabilidad (MIV), considera cinco estados de daño no nulo, define la acción en términos de intensidad macrosísmica y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad; el grado de daño esperado se efectúa mediante funciones semiempíricas que dependen de la intensidad y del índice de vulnerabilidad. Las probabilidades de los estados de daño se obtienen suponiendo una distribución de probabilidad binomial o beta equivalente. El segundo método, al que nos referimos como Método del Espectro de Capacidad (MEC) considera cuatro estados de daño no nulo, define la acción sísmica en términos de espectros de respuesta, y el edificio por medio de su espectro de capacidad. El grado de daño esperado se obtiene mediante el desarrollo de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. Para la aplicación de ambos métodos a Barcelona se usan un escenario determinista y uno probabilista. El determinista corresponde a un terremoto histórico y el probabilista tiene una probabilidad del 10% en 50 años. En ambos casos se consideran los efectos de suelo.

Otra de las aportaciones relevantes de esta investigación es la creación de una herramienta, potente y versátil, diseñada sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG) o *Geographic Information Systems* (GIS). Esta aplicación permite la integración, explotación y gestión de los datos, así como generar cualquier otra información necesaria para evaluar el daño físico y otros aspectos relacionados con el riesgo sísmico de una gran ciudad. Por otra parte, este tipo de programas es imprescindible para cartografiar escenarios georreferenciados, útiles para destacar y discriminar los puntos fuertes y débiles de su tejido urbano residencial y social. De hecho, esta herramienta va más allá de la aplicación concreta, pues su actualización es rápida y es de fácil adaptación para estudios de otros riesgos en la misma ciudad o en otras ciudades. Finalmente, en el caso de Barcelona, la calidad de los datos ha permitido una gran resolución de los resultados, siendo posible obtener escenarios de daño “*a la carta*”.

Los resultados obtenidos son consistentes con la evolución histórica de la ciudad y con su condición actual, así como con las características de los suelos, poniendo de manifiesto la robustez de los métodos empleados. En general se observa una estructura radial del daño esperado con un mayor daño en *Ciutat Vella* y menor daño en los distritos periféricos. Destaca también el daño esperado en los pequeños núcleos de los pueblos antiguos de los actuales distritos. El MIV representa mejor las peculiaridades de los edificios individuales. El MEC suaviza estas características clasificando los edificios en 6 clases. El escenario más

favorable es el determinista cuando se analiza mediante el MEC con daños esperados entre nulo, leve y moderado; el grado de daño medio de la ciudad es leve. Los más desfavorables son el determinista y probabilista cuando se analizan con el MIV; en ambos casos el estado de daño medio global es moderado. El distrito de *l'Eixample* destaca por ser el de mayor riesgo debido a la vulnerabilidad de sus edificios, a la alta densidad de edificios y de población y al valor expuesto. Se confirma que, en ciudades como Barcelona, situadas en regiones de peligro sísmico entre bajo y moderado, la escasa o nula conciencia del peligro sísmico y la ausencia de precauciones de protección sísmica conduce a una elevada vulnerabilidad de sus edificios y, consecuentemente, a un elevado riesgo. En efecto, para escenarios relativamente moderados, con intensidades entre VI y VII, se esperan daños considerables. Los daños a la población son relevantes y su evaluación es muy sensible a los modelos de víctimas. En este sentido es preciso considerar los valores numéricos concretos como pronósticos del orden de magnitud de las cantidades evaluadas, y, en cualquier caso, se deben interpretar, desde una óptica probabilista, como valores medios para escenarios sísmicos creíbles.

Los escenarios analizados, los resultados obtenidos y las conclusiones y recomendaciones de este estudio contienen un enorme potencial para orientar la acción y la toma de decisiones dirigidas a la prevención y disminución del riesgo sísmico de Barcelona, pero también a la planificación, optimización y gestión de la respuesta a una eventual emergencia sísmica.

ABSTRACT

The exponential increase in the world's population, together with the growth of big cities, which is characterized by the inadequate occupancy of the soil, contributes to augment the damage due to seismic catastrophes. The high concentration of population, buildings, infrastructures and valuables exposed, turn these zones into high risk areas. Most of earthquake casualties are due to buildings collapsing, that is some 90% of direct deaths. The current study contributes to the development and application of advanced methods of analysis of the seismic risk in big cities. It has been structured into two parts. The first part establishes a theoretical framework of the seismic risk studies, detailing the models and advanced developments to evaluate the physical damage on residential buildings and their impact on the population and population-related aspects. The second part describes its application to Barcelona. In order to do so, an extensive and depurated data base was built with the geometrical, structural, constructive and situation characteristics of the housing buildings.

Two methods are used, which are applied to two scenarios. The first method, called Vulnerability Index Method (VIM), considers five non null damage states, defines the action in terms of macroseismic intensity and the building by means of a vulnerability index. The estimated damage degree is measured by semiempirical functions than depend on the intensity and the vulnerability index. The probabilities of damage states are obtained estimating a binomial or beta-equivalent probability distribution. The second method, called Capacity Spectrum Method (CSM), considers four non null damage states, defines the seismic action in terms of response spectra and the building by means of its capacity spectrum. The damage degree expected is obtained by developing fragility curves and damage probability matrices. In order to apply both methods to Barcelona a deterministic scenario and a probabilistic scenario are used. The deterministic one corresponds to a historic earthquake, while the probabilistic has a probability of 10% in 50 years. In both cases the effects of soil are taken into account.

Another of the significant contributions of this research is the creation of a powerful and versatile tool, whose design is based on Geographic Information Systems (GIS). This application allows integrating exploitation and management of data and generations any other kind of information necessary to evaluate the physical damage and other aspects related to seismic risks in great cities. On the other hand, this type of software is essential to map georeferenced scenarios, which are useful to highlight and discriminate the strong and weak points of its social and residential urban network. In fact, this tool exceeds specific application, as it is updated fast and easily adapted to the study of other risks in the same or other cities. Finally, in the case of Barcelona, the quality of data allowed a great resolution of results, and thus obtaining damage scenarios "à la carte".

The results obtained are coherent with the historical evolution of the city and with its current state, as well as with the characteristics of the soils, which demonstrates the solidity of the methods used. Generally, a radial structure of the expected damage, showing a greater damage in *Ciutat Vella* and lesser damage in the outskirts, is observed. Note also a greater damage in the small cores of the former villages that gave place to the current districts. VIM represents best the peculiarities of individual buildings, while CSM softens these characteristics by classifying buildings into 6 types. The most favourable scenario is the deterministic one, when analyzed by means of the CSM and expected damage among void, slight or moderated. The average damage degree of the city is slight. The most unfavourable

ones are the deterministic and probabilistic scenarios, when analyzed with VIM. In both cases the global average damage state is moderated.

L'Eixample district stands out for showing the highest risk due to the vulnerability of its buildings, to its high density in buildings and population and to the valuables exposed. It is well demonstrated that, in cities like Barcelona, which are located in low-to-moderate seismic risk regions, the scarce to inexistent awareness of seismic hazard and the absence of seismic protection measures lead to the high vulnerability of buildings and thus to high risk. In fact, considerable damage is expected for relatively moderated scenarios, with intensities ranging from VI to VII. The damage to the population is significant and its evaluation strongly depends on casualty models. In this sense it is necessary to consider the specific numerical values as a prediction of the order of magnitude of the quantities evaluated and, in any case, they should be interpreted, from a probabilistic point of view, as medium values for credible seismic scenarios.

The scenarios analyzed, the results obtained and the conclusions and suggestions gathered in this study offer a great opportunity to guide the action and decision making in the field of seismic risk prevention and mitigation in Barcelona, and the planning, optimization and management of the response to an eventual seismic emergency.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
<u>PARTE I: CONCEPTOS Y MÉTODOS</u>		
2	EL RIESGO EN ENTORNOS URBANOS.....	21
3	MODELADO DEL RIESGO SÍSMICO.....	51
<u>PARTE II: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA</u>		
4	LA CIUDAD DE BARCELONA.....	107
5	LOS DATOS.....	137
6	VULNERABILIDAD, CAPACIDAD Y FRAGILIDAD.....	175
7	ESCENARIOS SÍSMICOS.....	215
8	MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO.....	237
9	OTROS ASPECTOS DEL RIESGO SÍSMICO.....	263
10	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	303
	REFERENCIAS.....	339
ANEJO A. RESUMEN DE LAS FUNCIONES ESTADÍSTICAS UTILIZADAS		
ANEJO B. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA		
ANEJO C. ELEMENTOS FÍSICOS SENSIBLES AL RIESGO		
ANEJO D. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS		
ANEJO E. TABLAS DE RESULTADOS PARA DISTRITOS, BARRIOS Y ZONAS DE ESTUDIO (ZRP)		

ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS.....	VII
LISTADO DE TABLAS.....	XIII
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
<u>PARTE I: CONCEPTOS Y MÉTODOS</u>	
2. EL RIESGO EN ENTORNOS URBANOS.....	21
2.1 Introducción	21
2.2 El riesgo: palabras y conceptos	23
2.3 Riesgos naturales y Sistemas de Información Geográfica	26
2.4 El riesgo sísmico	34
2.5 Ciudades: urbes y megaurbes	36
2.5.1 El daño físico	37
2.5.2 La población	41
2.5.3 Aspectos económicos	42
2.5.4 Escenarios	44
2.6 Sistemas complejos y riesgo global	44
2.7 Resumen y conclusión	50
3. MODELADO DEL RIESGO SÍSMICO.....	53
3.1 Introducción	53
3.2 Peligrosidad	56
3.2.1 Modelos uniparamétricos	57
3.2.2 Modelos multiparamétricos.	61
3.3 Vulnerabilidad	62
3.3.1 Modelos uniparamétricos	62
3.3.2 Modelos multiparamétricos	73

3.4	Coste	75
3.5	El riesgo sísmico: la convolución	82
3.5.1	Modelos uniparamétricos	83
3.5.2	Modelos multiparamétricos	95
3.6	Otros aspectos relacionados con el daño	101
3.6.1	Daños a la población: fallecidos y heridos	102
3.6.2	El daño económico	104
3.7	Incertidumbres	106
3.8	Resumen y conclusión	107

PARTE II: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.	LA CIUDAD DE BARCELONA	107
4.1	Introducción	107
4.2	Apuntes de historia	108
4.3	La organización del territorio	112
4.3.1	Las “Zones de Recerca Petites” (ZRP)	112
4.3.2	Los Barrios	112
4.3.3	Los Distritos	113
4.4	Ambiente geotectónico	126
4.5	Las normativas sísmicas	127
4.6	La población	128
4.6.1	Crecimiento y evolución en el siglo XX	128
4.6.2	Densidad de población	129
4.6.3	Las víctimas	131
4.6.4	La población sin hogar (“homeless”).	133
4.7	Resumen y conclusión	134
5.	LOS DATOS	137
5.1	Introducción	137
5.2	La información catastral	138
5.2.1	Manzanas	140
5.2.2	Parcelas y subparcelas	142
5.3	La edad de los edificios	146
5.4	La tipología constructiva	151
5.4.1	La estructura y los forjados	155
5.5	Segregación de edificios especiales	160

5.6	Estado de conservación	163
5.7	Integración de la información en el GIS	165
5.7.1	La Información catastral	165
5.7.2	La altura de los edificios	166
5.7.3	Suelo edificado y suelo no edificado	168
5.8	Síntesis de los datos	170
5.9	Resumen y discusión	173
6.	VULNERABILIDAD, CAPACIDAD Y FRAGILIDAD	175
6.1	Introducción	175
6.2	La matriz de tipologías de edificios (BTM)	177
6.3	Vulnerabilidad	182
6.3.1	Índices básicos	182
6.3.2	Modificadores	184
6.3.3	Índices de vulnerabilidad plausibles	199
6.4	Capacidad y fragilidad	203
6.4.1	Espectros de capacidad	204
6.4.2	Curvas de fragilidad	207
6.5	Resumen y conclusión	213
7.	ESCENARIOS SÍSMICOS.....	215
7.1	Introducción	215
7.2	La demanda básica	217
7.2.1	Escenarios deterministas	217
7.2.2	Escenarios probabilistas	222
7.2.3	Espectros suavizados: Eurocódigo-8	223
7.3	La zonificación sísmica	225
7.3.1	Escenario determinista	227
7.3.2	Escenario probabilista	231
7.3.3	Espectros suavizados: Eurocódigo-8	233
7.4	Resumen y conclusión	234
8.	MATRICES DE PROBABILIDAD E DAÑO	237
8.1	Introducción	237
8.2	Estado o grado de daño medio	239
8.3	Método del Índice de Vulnerabilidad	240
8.3.1	Funciones de vulnerabilidad	240
8.3.2	Matrices de probabilidad de daño	242

8.4	Método del Espectro de Capacidad	245
8.4.1	Punto de desempeño	245
8.4.2	Matrices de probabilidad de daño	247
8.5	Gestión del Sistema de Información Geográfica	249
8.5.1	Método del Índice de Vulnerabilidad	249
8.5.2	Método del Espectro de Capacidad	250
8.6	Resultados y escenarios	252
8.7	Resumen y conclusión	259
9.	OTROS ASPECTOS DEL RIESGO SÍSMICO.....	263
9.1	Introducción	263
9.2	Víctimas	265
9.2.1	El modelo	265
9.2.2	Escenarios	268
9.2.3	Discusión	271
9.3	Personas sin hogar	276
9.3.1	El modelo	276
9.3.2	Escenarios	277
9.3.3	Discusión	281
9.4	Coste Económico	282
9.4.1	El modelo	283
9.4.2	Escenarios	284
9.4.3	Discusión	288
9.5	Escombros	289
9.5.1	El modelo	289
9.5.2	Escenarios	291
9.5.3	Discusión	294
9.6	Resumen y conclusión	296
9.6.1	Víctimas	297
9.6.2	Personas sin hogar	298
9.6.3	Coste económico	299
9.6.4	Escombros	300
9.6.5	Conclusión final	300
10.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	303
10.1	Introducción	303
10.2	Discusión	304

10.2.1	Los métodos	304
10.2.2	Los datos	309
10.2.3	El Sistema de Información Geográfica	312
10.2.4	Los resultados	313
10.3	Comparación con estudios previos	321
10.4	Conclusiones	326
10.4.1	Los métodos	326
10.4.2	Los datos	328
10.4.3	El Sistema de Información Geográfica	329
10.4.4	Los resultados	330
10.5	Líneas de progreso	331
10.5.1	Los métodos	332
10.5.2	Los datos	333
10.5.3	El Sistema de Información Geográfica	336
10.5.4	Los resultados	336
10.6	Epílogo	338
REFERENCIAS.....		339

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1. Mapa del mundo de riesgos naturales (Munich, 1998).	28
Figura 2.2. Área urbana afectada por el paso de un tornado. Fotografía tomada por el Aerial Oklahoma, Inc. (Yuan, 2005).	30
Figura 2.3. Diagrama de flujo para la predicción de pérdidas humanas en caso de tsunami empleando técnicas GIS (Sugimoto <i>et al.</i> , 2003).	33
Figura 3.1. Funciones de pertenencia de un edificio a las clases de vulnerabilidad (véase los índices de vulnerabilidad en la Tabla 3.6).	69
Figura 3.2. Espectro de capacidad de un edificio tipo M3.3–M de la matriz de tipologías de edificios prevista en el proyecto Risk-UE.	75
Figura 3.3. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98.	83
Figura 3.4. Relación entre intensidad y daño esperado para túneles ferroviarios en roca, propuesta por el ATC-25. Los puntos corresponden a la mejor estima propuesta por el ATC-13. La curva es un ajuste de acuerdo a una ley potencial.	89
Figura 3.5. Funciones de vulnerabilidad para edificios de mampostería no reforzada (izquierda) y para los edificios de hormigón armado con forjados reticulares. Las curvas con trazo discontinuo de la figura de la izquierda, fueron propuestas por Angeletti <i>et al.</i> (1988). Las escalas MCS (Mercalli, Cancani Sieberg), MSK y EMS son equivalentes.	90
Figura 3.6. Umbrales de daño y de colapso de acuerdo a la ecuación [3.20] con los parámetros de la Tabla 3.20.	92
Figura 3.7. Relación entre la aceleración y el índice de daño esperado en función de los índices de vulnerabilidad. Se ha utilizado la formulación de las ecuaciones [3.19] y [3.20]. Modificado de (Grimaz <i>et al.</i> , 1998).	93
Figura 3.8. Funciones semi-empíricas de vulnerabilidad basadas en las clases de vulnerabilidad definidas en la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 y que fueron usadas por Giovinazzi (2005) para ajustar la ecuación [3.26] (véase también Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	95
Figura 3.9. Ejemplo de curvas de fragilidad. Se consideran 4 estados de daño diferentes del grado de daño nulo o sin daño. Se muestra también el uso de las curvas de fragilidad para obtener las matrices de probabilidad de daño $P(k)$ para cualquier desplazamiento espectral S_d	97
Figura 3.10. Umbrales de los estados de daño.	99
Figura 3.11. Curvas de fragilidad ajustadas a los puntos de la Tabla 3.21.	99
Figura 3.12. Ejemplo de estimación del punto de desempeño.	101
Figura 4.1. Evolución urbanística de la ciudad de Barcelona.	111
Figura 4.2. Distritos, barrios y zonas de estudio (ZRP) de Barcelona. Se indica también la densidad de población del 1 de enero de 2004, (Ajuntament	

de Barcelona, 2005). La Tabla 4.1 y las nueve siguientes contienen los nombres de los 10 distritos, los 38 barrios y las 248 zonas de estudio.	115
Figura 4.3. Mapa geológico de la región de Barcelona (Cid <i>et al.</i> , 2001).....	126
Figura 4.4. Evolución de la población desde 1900 (Ajuntament de Barcelona, 2005).....	129
Figura 4.5. Densidad de población por distritos (izquierda) y barrios (derecha).	130
Figura 5.1. Distribución de hojas de la información proporcionada por el SITEB, con la situación de los barrios de la ciudad.....	140
Figura 5.2. Método de obtención de la referencia catastral de parcela en núcleo urbano (CGCCT, 1989) (los 5 primeros dígitos de la izquierda corresponden a la referencia de manzana, los 2 siguientes al nº de parcela dentro de la manzana. Los 7 caracteres restantes son la referncia del plano en el que se encuentra la manzana).	141
Figura 5.3. Manzana formada con 4 Grupos de Parcelas Agrupadas (GPA) diferentes...	143
Figura 5.4. Ejemplo de diversas parcelas, identificadas con su código de manzana y parcela, con sus correspondientes subparcelas, identificadas con sus respectivos códigos. La subparcela al lado del edificio, en la figura de la derecha, constituye una parcela completa codificada como “Pa” (12530001).	144
Figura 5.5. Ejemplo de los datos del fichero “ <i>edad.txt</i> ”.	146
Figura 5.6. Evolución del número de edificios construidos.	147
Figura 5.7. Distribución de edificios por periodos de construcción.	148
Figura 5.8. Evolución del número de edificios construidos entre 1940 y 1980 para los diferentes distritos.	148
Figura 5.9. Año de construcción medio de los edificios en los distritos de la ciudad.	150
Figura 5.10. Año medio de construcción de los edificios por ZRP.	150
Figura 5.11. Ejemplo de los datos del fichero “ <i>tipología.txt</i> ”.	151
Figura 5.12. Ejemplo de 3 Unidades de Construcción (UC) dentro de un mismo GEC. .	153
Figura 5.13. Tabla de atributos y mapa de un ejemplo singular de parcela con 18 unidades constructivas diferentes.....	154
Figura 5.14. Porcentaje de edificios según su estructura, (véase Tabla 5.4).	155
Figura 5.15 Porcentaje de edificios según su forjado (véase códigos en Tabla 5.5).	156
Figura 5.16. Edificio de mampostería no reforzada en el distrito del Eixample (a) y detalle de muros de mampostería (b).	157
Figura 5.17. Edificio de hormigón armado (a) y detalle de forjado reticular (b).	157
Figura 5.18. Porcentaje de edificios según su estructura y forjado para los distritos 01 a 05.	158
Figura 5.19. Porcentaje de edificios según su estructura y forjado para los distritos 06 a 1	159
Figura 5.20. Porcentaje de edificios según su estructura clasificados por periodos constructivos.	160

Figura 5.21. Distribución de edificios especiales.	161
Figura 5.22. Datos catastrales proporcionados por el SITEB, integrados en el GIS.	166
Figura 5.23. Distribución de los edificios de la ciudad según el número de plantas.	167
Figura 5.24. Barrios de la ciudad según el número medio de plantas de sus edificios.	168
Figura 5.25. Superficie total no edificada: subparcelas (izquierda) y parcelas no edificadas (derecha).	169
Figura 5.26. Intersección de la información de las bases de datos.	171
Figura 6.1. Diferencia de alturas en las subparcelas de un edificio a) vista en planta b) vista en 3D	191
Figura 6.2. Edificio de 15 plantas con patio de luces interior de cero plantas y un patio lateral de una planta.	191
Figura 6.3. Edificio con irregularidades en planta, y centro de gravedad (<i>cg</i>).	194
Figura 6.4. Distribución de edificios del distrito de l' Eixample según su longitud de fachada.	196
Figura 6.5. Modificadores M_{hf} , en función del número de plantas de los edificios adyacentes.	198
Figura 6.6. Modificadores en función de la posición dentro de la manzana (izquierda) y esquema de los modificadores asignados a las parcelas de una manzana (derecha).....	199
Figura 6.7. Índice de vulnerabilidad medio de edificios de hormigón armado por ZRP..	202
Figura 6.8. Índice de vulnerabilidad medio de edificios de mampostería por ZRP.....	202
Figura 6.9. Espectro de capacidad bilineal para edificios de mampostería no reforzada de altura media (M3.3 M) y alta (M3.3 H).....	206
Figura 6.10. Espectro de capacidad bilineal para edificios de hormigón armado de altura baja (RC3.2 L), media (RC3.2 M) y alta (RC3.2 H).....	206
Figura 6.11. Definición de los umbrales de los estados de daño a partir del espectro de capacidad.....	209
Figura 6.12. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería no reforzada de altura media (4 plantas) (Bonett, 2003).....	212
Figura 6.13. Curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado de altura media (5 plantas)(Moreno, 2006).	212
Figura 7.1. Zonas sismotectónicas de Cataluña y situación de los terremotos de 1428 y 1448 para obtener el escenario determinista de intensidad (Secanell <i>et al.</i> , 2004).	218
Figura 7.2. Mapa determinista en intensidades para el basamento rocoso.	219
Figura 7.3. Relación empleada para transformar la intensidad I en magnitud local M_L según la profundidad del sismo (h , en km) (Irizarry, 2004).	220
Figura 7.4. Espectro de respuesta para el basamento rocoso, para el escenario determinista (Irizarry, 2004).	221
Figura 7.5. Espectro de respuesta para el basamento rocoso, según el escenario probabilista (Irizarry, 2004).	223

Figura 7.6. Espectro suavizado para el caso determinista (izquierda) y probabilista (derecha).....	225
Figura 7.7. Zonificación sísmica de la ciudad de Barcelona (Cid, 1998).....	227
Figura 7.8. Mapa determinista en intensidades con efectos de suelo.	228
Figura 7.9. Funciones de transferencia de los diferentes tipos de suelo de Barcelona (Irizarry, 2004). Estas funciones, que definen la amplificación sísmica en función del período, se usarán para hallar espectros zonificados para la ciudad.	229
Figura 7.10. Espectros de respuesta zonificados para la ciudad de Barcelona. Escenario determinista. (Irizarry, 2004).....	230
Figura 7.11. Mapa de aceleraciones máximas del suelo, teniendo en cuenta los efectos del suelo, para el escenario determinista.....	230
Figura 7.12. Escenario sísmico probabilista, en términos de intensidad EMS-98. El mapa se ha obtenido a partir del escenario básico de intensidad 6.5, considerando los efectos de suelo.	231
Figura 7.13. Espectros de respuesta zonificados para la ciudad de Barcelona. Escenario probabilista (Irizarry, 2004).....	232
Figura 7.14. Aceleraciones máximas del suelo. Escenario probabilista con efectos de suelo.	232
Figura 7.15. Espectro suavizado para el caso determinista (izquierda) y probabilista (derecha), para las distintas zonas sísmicas de la ciudad de Barcelona.	234
Figura 8.1. Funciones semi-empíricas de vulnerabilidad para las tipologías más representativas de Barcelona.....	241
Figura 8.2. Punto de desempeño sísmico de un edificio de mampostería no reforzada de 5 plantas, para el caso determinista (Bonett, 2003).....	246
Figura 8.3. Punto de desempeño sísmico de un edificio de mampostería no reforzada de 5 plantas, para el caso probabilista (Bonett, 2003).....	246
Figura 8.4. Esquema del proceso de generación de mapas de vulnerabilidad y daño en el GIS, según el Método del Índice de Vulnerabilidad.	250
Figura 8.5. Esquema del proceso de generación de mapas daño en el GIS, según el Método del Espectro de Capacidad.....	251
Figura 8.6. Grado de daño medio esperado (DS_m) por distritos. Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y Método del Espectro de Capacidad (abajo), para el escenario determinista (izquierda) y probabilista (derecha).	255
Figura 8.7. Grado de daño medio esperado (DS_m) por barrios. Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y Método del Espectro de Capacidad (abajo), para el escenario determinista (izquierda) y probabilista (derecha).	256
Figura 8.8. Grado de daño medio esperado (DS_m) por ZRP. Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y Método del Espectro de Capacidad (abajo), para el escenario determinista (izquierda) y probabilista (derecha).....	257
Figura 8.9. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño moderado para el escenario probabilista según el MIV (izquierda) y el MEC (derecha) para el distrito de Ciutat Vella (arriba), y de l'Eixample (abajo).....	258

- Figura 9.1.** Ilustración del modelo de víctimas. Izquierda: distribución de los inquilinos de un edificio. Derecha: distribución de los inquilinos atrapados según las categorías de “heridos leves”, “heridos requieren hospitalización”, “heridos graves” y “fallecidos directos” (véase también Tabla 9.1, Tabla 9.2 y explicación en el texto). Los valores adoptados son sólo ilustrativos y arbitrarios y no responden a la realidad. 268
- Figura 9.2.** Distribución de personas fallecidas estimadas mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo), para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha). 274
- Figura 9.3.** Distribución de personas heridas (incluyendo heridos leves, heridos graves y heridos que requieren hospitalización) estimadas mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha). 275
- Figura 9.4.** Distribución de personas sin hogar (“homeless”) estimadas mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha). 280
- Figura 9.5.** Distribución de coste económico en millones de Euros, estimada mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha). 286
- Figura 9.6.** Simulación de pérdidas económicas (coste relativo en m^2 de superficie equivalente destruida) para el escenario determinista (izquierda) y para el escenario probabilista (derecha) obtenidos mediante el Método del Espectro de Capacidad. De hecho ambas figuras son proporcionales a las correspondientes de la Figura 9.5. 287
- Figura 9.7.** Distribución de Escombros generados, en toneladas, estimada mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha). 295
- Figura 10.1.** Comparación de los diferentes factores de daño o grados de daño medio (véase explicación en el texto). 308
- Figura 10.2.** Síntesis de resultados del daño esperado para los dos métodos adoptados y escenarios sísmicos considerados. Método del índice de vulnerabilidad (arriba) y método del espectro de capacidad. Escenario determinista (Izquierda) y probabilista. Se dan los valores medios del factor de daño para la ciudad y por distritos. 317

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de los sistemas de respuesta a una catástrofe sísmica y principales características (Comfort, 1999).	48
Tabla 3.1. Comparación de escalas de intensidad sísmica (ATC-13, 1985).....	59
Tabla 3.2. Clasificación de edificios según la escala MSK-64.....	63
Tabla 3.3. Tipos de edificios y clases de vulnerabilidad según la escala EMS-98.....	64
Tabla 3.4. Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de mampostería no reforzada (Benedetti y Petrini, 1984). El peso de los parámetros 5,7 y 9 varía entre 0.5 y 1 dependiendo de algunos elementos, como por ejemplo el porcentaje de diafragmas rígidos bien conectados, la presencia de galerías o pasillos y el peso del tejado.....	66
Tabla 3.5. Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de hormigón armado (Benedetti y Petrini, 1984).	67
Tabla 3.6. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).....	70
Tabla 3.7. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad V_I , para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).....	71
Tabla 3.8. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad V_I , para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).....	73
Tabla 3.9. Grados o estados de daño definidos en la escala MSK (ATC-13, 1985).....	76
Tabla 3.10. Estados de daño según la escala EMS-98 (Grünthal, 1998).....	78
Tabla 3.11. Estados de daño según informe ATC-13. El valor central del Factor de Faño (DF) viene definido por la Ecuación [3.9].	80
Tabla 3.12. Relación de Estados o Grados de Daño para varias metodologías.	81
Tabla 3.13. Matrices de probabilidad de daño completadas para los edificios de tipo A de la escala MSK-64 y para la clase de vulnerabilidad A de la escala EMS-98. Los campos resaltados se han ajustado de forma que su suma coincida con la de los valores que se obtienen a partir de la información de la escalas macrosísmicas.....	85
Tabla 3.14. Parámetros de las distribuciones de probabilidad de la escala EMS-98 basada en los daños observados en el terremoto de Irpinia y supuesta una distribución de probabilidad binomial (Chávez, 1998).....	86
Tabla 3.15. Ejemplo de matriz de probabilidad de daño (DPM) para edificios de altura media con estructura de mampostería no reforzada con muros de carga, según ATC-13.	87
Tabla 3.16. Parámetros de las funciones vulnerabilidad-daño según la ecuación [3.17] para los edificios de mampostería no reforzada (Yépez, 1996; Mena, 2002)....	90
Tabla 3.17. Parámetros de las funciones vulnerabilidad-daño según la ecuación [3.18] para los edificios de hormigón armado con forjados reticulares (Yépez, 1996; Mena, 2002).	90

Tabla 3.18. Parámetros propuestos en el proyecto SERGISAI (Cella <i>et al.</i> , 1998) correspondientes a la ecuación [3.20].	92
Tabla 3.19. Parámetros propuestos en el proyecto SERGISAI (Cella <i>et al.</i> , 1998) correspondientes a la ecuación [3.20].	93
Tabla 3.20. Umbrales de los Estados de daño.	99
Tabla 3.21. Distribución de probabilidades de excedencia fijando la probabilidad del umbral en un 50%.	99
Tabla 3.22. Fracción de heridos leves y graves y de fallecidos para cada uno de los cinco grados o estados de daño (ATC-13, 1985).	103
Tabla 4.1. Distrito 01: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	117
Tabla 4.2. Distrito 02: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	118
Tabla 4.3. Distrito 03: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	119
Tabla 4.4. Distrito 04: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	120
Tabla 4.5. Distrito 05: barrios y ZRP (IMI, 2002) (véase Figura 4.2).	120
Tabla 4.6. Distrito 06: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	121
Tabla 4.7. Distrito 07: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	122
Tabla 4.8. Distrito 08: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	123
Tabla 4.9. Distrito 09: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	124
Tabla 4.10. Distrito 10: barrios y ZRP (IMI, 2002), (véase Figura 4.2).	125
Tabla 5.1. Principales capas de Información del SITEB.	139
Tabla 5.2. Codificación utilizada para identificar las propiedades de las subparcelas.	145
Tabla 5.3. Información del fichero “tipología.txt”.	151
Tabla 5.4. Descripción de los códigos de estructura del fichero “tipología.txt”.	152
Tabla 5.5. Descripción de los códigos de forjado del fichero “tipología.txt”.	152
Tabla 5.6. Descripción de los códigos de clasificación (clase) de parcelas y edificios especiales.	162
Tabla 5.7. Descripción de la información referente al estado de conservación de los edificios.	164
Tabla 5.8. Descripción de los códigos para el tipo de reforma y estado de conservación.	164
Tabla 5.9. Superficie y parcelas edificadas por distritos.	170
Tabla 5.10. Parcelas edificadas con uso residencial de las que se tiene información catastral, de edad, tipología y estado de conservación por distritos.	172
Tabla 6.1. Matriz de tipologías de edificios (BTM) de Risk-UE, con su correspondiente código de la base de datos de Barcelona y diseño sísmico en la ciudad.	179
Tabla 6.2. Clases de vulnerabilidad propuestas para las tipologías de la BTM de Risk-UE.	183
Tabla 6.3. Índices de vulnerabilidad propuestos para las tipologías de la BTM de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	184

Tabla 6.4. Modificadores regionales del índice de vulnerabilidad por tipologías, según periodos constructivos basados en el diseño sísmico.....	186
Tabla 6.5. Modificador en función de la altura del edificio para cada tipología.	189
Tabla 6.6. Modificador en función de la regularidad en planta del edificio.....	195
Tabla 6.7. Modificador en función del estado de conservación del edificio.	197
Tabla 6.8. Estimación del índice de vulnerabilidad plausible.....	200
Tabla 6.9. Características de los espectros de capacidad para los seis edificios analizados.....	205
Tabla 6.10. Probabilidades para los estados de daño esperados, fijando la probabilidad de cada estado de daño al 50%. Se supone una distribución binomial o beta equivalente.....	210
Tabla 6.11. Parámetros característicos (desviaciones típicas β_i y valores medios $\overline{Sd_i}$) de las curvas de fragilidad para las tipologías analizadas y para los 4 estados de daño.	211
Tabla 7.1. Parámetros que definen la forma espectral para los escenarios determinista y probabilista y errores del ajuste (Irizarry, 2004).	233
Tabla 7.2. Síntesis del escenario determinista en términos de intensidad EMS-98.....	235
Tabla 7.3. Síntesis del escenario probabilista en términos de intensidad EMS-98.....	235
Tabla 7.4. Síntesis del escenario determinista en términos espectrales (Irizarry, 2004).	235
Tabla 7.5. Síntesis del escenario probabilista en términos espectrales (Irizarry, 2004).	235
Tabla 8.1. Relación entre los estados de daño de las metodologías empleadas.....	238
Tabla 8.2. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería de cada zona sísmica (escenario determinista con efectos de suelo).....	244
Tabla 8.3. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad para los edificios de hormigón de cada zona sísmica (escenario determinista con efectos de suelo).....	244
Tabla 8.4. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad, para edificios de mampostería de cada zona sísmica (escenario probabilista con efectos de suelo).....	244
Tabla 8.5. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad, para edificios de hormigón de cada zona sísmica (escenario probabilista con efectos de suelo).....	245
Tabla 8.6. Matriz de probabilidad de daño para edificios de mampostería no reforzada. ...	247
Tabla 8.7. Matriz de probabilidad de daño para edificios de hormigón armado.	248
Tabla 8.8. Valores extremos de daño esperado con el MIV. Escenarios determinista y probabilista. Se dan los valores del grado de daño medio (DS_m), el índice de vulnerabilidad del edificio (I_v) y el suelo donde se halla.....	252

Tabla 8.9. Valores extremos de daño esperado con el MEC. Escenarios determinista y probabilista. Se dan los valores del grado de daño medio (DS_m), el tipo de edificio y el suelo donde se halla.	253
Tabla 9.1. Ejemplo de aplicación de la ecuación [4.1], para el cálculo del número de personas atrapadas en un edificio de 100 inquilinos (M1).....	267
Tabla 9.2. Ejemplo de aplicación de la ecuación [4.1], para el cálculo del número de víctimas de cada tipo*.....	267
Tabla 9.3. Número de edificios de viviendas, superficie construida y altura media (en número de plantas) en Barcelona.	269
Tabla 9.4. Valores de los coeficientes de la ecuación [4.1] adoptados en este estudio.	270
Tabla 9.5. Resumen del número de víctimas de la ciudad de Barcelona para los escenarios y métodos considerados en este estudio. MIV indica el Método del Índice de Vulnerabilidad. MEC indica el Método del Espectro de Capacidad.....	271
Tabla 9.6. Número total de viviendas de la ciudad de Barcelona según tipología.	279
Tabla 9.7. Número de viviendas inhabitables y de personas sin hogar por tipologías, y para el escenario determinista y probabilista según el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y el del Espectro de Capacidad (MEC).....	279
Tabla 9.8. Resumen de pérdidas económicas directas, en superficie destruida equivalente y en millones de euros, para los escenarios determinista y probabilista analizados mediante los Métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y del Espectro de Capacidad (MEC).....	285
Tabla 9.9. Peso unitario, en ton/m^2 para elementos estructurales de edificios de hormigón armado y mampostería. Adaptado de Vacareanu <i>et al.</i> (2004) y de HAZUS'99 (FEMA, 2000).....	292
Tabla 9.10. Escombros de ladrillo, madera y otros, generados por los elementos estructurales dañados en función de los grados de daño. Se dan las fracciones de los pesos unitarios de la Tabla 9.9 (FEMA, 2000; Vacareanu <i>et al.</i> , 2004).	292
Tabla 9.11. Escombros de hormigón y acero de refuerzo generados por los elementos estructurales dañados en función de los grados de daño. Se dan las fracciones de los pesos unitarios de la Tabla 9.9 (FEMA, 2000; Vacareanu <i>et al.</i> , 2004).	293
Tabla 9.12. Resumen de los escombros generados en millones de toneladas. Se muestran los valores correspondientes a edificios de mampostería, de hormigón armado y valores totales. Se separan los resultados correspondientes a los escenarios determinista y probabilista, analizados mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y el del Espectro de Capacidad (MEC).....	293
Tabla 9.13. Zonas de estudio (ZRP) con mayor número de fallecidos, heridos, personas sin hogar, coste económico directo y escombros generados. Para cada aspecto se indica el nombre de la zona de estudio y el valor.	297
Tabla 10.1. Comparación entre las probabilidades de que se igualen o excedan los diferentes estados de daño usando distribuciones binomiales (o beta equivalentes) de 4 y 5 estados de daño no nulos.....	306

Tabla 10.2. Síntesis de los escenarios de daño, por distritos. En la primera columna, se incluye información sobre los suelos.	315
Tabla 10.3. Resumen de las principales características de los distritos de Barcelona.	316
Tabla 10.4. Resumen del impacto de los escenarios sísmicos. Se dan el número de fallecidos, el número de heridos, el número de personas sin hogar, el coste económico y el volumen de escombros para los escenarios menos y más dañino.	320
Tabla 10.5. Distribución (%) de los edificios de Barcelona, por distritos, de acuerdo a las clases de vulnerabilidad de la escala macrosísmica europea EMS-98 (Chávez 1998; véase también Mena, 2002).	323
Tabla 10.6. Índices plausibles, probables y posibles para las clases de vulnerabilidad de la Escala EMS-98 (Giovinazzi, 2004).....	324
Tabla 10.7. Distribución del daño sísmico en las edificaciones de Barcelona para un terremoto de intensidad VII en la escala EMS-98 (Chávez, 1998). La última fila contiene el grado de daño medio o grado de daño más probable considerando 5 grados de daño diferentes del nulo.....	325

