



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament D'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

Programa de doctorado: Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

Evaluación probabilista del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas

Tesis doctoral presentada para optar al grado de doctor
por la Universitat Politècnica de Catalunya

Autor:

Armando Aguilar Meléndez

Directores:

Dr. Alex H. Barbat, Dr. Luis G. Pujades Beneit y Dr. Mario G. Ordaz Schroeder

Barcelona, mayo de 2011

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament D'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

Programa de doctorado: Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

Evaluación probabilista del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas

Tesis doctoral presentada para optar al grado de doctor
por la Universitat Politècnica de Catalunya

Autor:

Armando Aguilar Meléndez

Directores:

Dr. Alex H. Barbat, Dr. Luis G. Pujades Beneit y Dr. Mario G. Ordaz Schroeder

Barcelona, mayo de 2011

DEDICATORIAS

A Amelia, Armando y Diego.

Armando Aguilar Larios y Araceli Meléndez Aviña.

Araceli y Grissel.

Raúl Arias Lovillo.

Leticia Rodríguez Audirac y Mauricio Aguirre.

Isabel Aguilar Larios, Gabriela, Alejandro y Ricardo Sosa Aguilar.

Anna González Rueda, Enric y Jordi.

Joan Campàs.

Alfonso, Nuria, Iván y Edgar.

Octavio, Dali y Tzanda.

Angels, Santi y Albert.

Guillermo, Victoria, Joel y Jan.

Berna, Julia, Miriam y Sara.

Xavi, Silvia, Alba y Ainoa.

Montse, Nerea y Adhara.

José Luis Jiménez, María Dolores Mendivil, José Luis, Soraya y Magali.

Nidal, Razan, Dunia, Omar y Caram.

Jesús Meléndez, Doris Ortega, Pedro, Osmani, Odette y Orestes.

Leticia, Gustavo, Gisela, Estuardo, Demetrio, Victor y Felipe Meléndez Aviña.

Alfredo García-Cano y familia.

Iván Badillo.

Alejandro Córdova y familia.

José Luis Vázquez Cuellar y familia.

René Alvarado Larios, Maritza, Diana, Maritza y René.

Rosa Amador, Rosa Elena y Adriana Larios A.

Amelia Ríos Camacho y José Buenaventura Campos.

Salud, Juan, Mary Cruz, Gore, Tollín, Francisco, Bibiana, Irma, Beto, Benjamin, Eduardo, David y Gerónimo.

César I. Beristain Guevara.

Miguel, Elizabeth, Berenice y Michelle.

Jaime Rangel, Jum-Ko, Aimeé y Jaime A.

Esther, Albert, Ainara, Laia y Tere.

Cristina, Gregorio y Tibet.

Josep, Feli y Oriol.

Mariluz, Carlos y Jordán.

Susana, José, Noelia y Alex.

Lidia, Joan y Marc.

Gloria, Enrique, Laura y Lucía.

Jesús y Sagra.

Mery y Vicente.

Atzín, Sanicté, Yunuem, Hueman, Noé, Isaac, Tonantzin, Luz Daniela, Alarii y Trilce Jimena.

Paty Meléndez y Gustavo.

Rolando Salgado, Nora, Kevin y Diogo.

Arturo Pérez, Rodrigo Gómez y Luis Ibarra.

Gustavo Aoyama y familia.

Oralia.

José Luis Sánchez A. y Alejandro García Elías.

Victor, Gisela, Jalil, Lety, Erick, Estuardo, Efraín, Mario, Tere, María, Ivonne, Tania, Pedro y Nora.

Joel Ruiz, Carlos Herrera, Luis Demetrio Villanueva, Blanca Miriam, Nidia, Julieta e Ía Medellín.

José Flores García y familia.

AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a los profesores Lluís Pujades, Alex Barbat, y Mario Ordaz por brindarme su excelente dirección académica y orientación durante todas las etapas de mis estudios de doctorado. Al profesor Lluís Pujades le agradezco también haber sido un excelente tutor durante mi estancia en la UPC.

- Doy gracias a todas las personas e instituciones que con sus recomendaciones y/o con información contribuyeron al desarrollo de la presente tesis, en especial a:

- La Dra. Nieves Lantada de la UPC.
- El Dr. Xavier Goula de l'Institut Geològic de Catalunya (IGC).
- El Servei de Protecció Civil, el Departament d'Estadística y l'Institut Municipal d'Informàtica del Ayuntamiento de Barcelona, por los documentos y datos compartidos.

- Agradezco el valioso apoyo que me brindaron muchas personas de la Universidad Veracruzana, en especial el que me otorgaron las personas siguientes:

Dr. Raúl Arias Lovillo.

Dr. César I. Beristain Guevara.

Mtra. Leticia Rodríguez Audirac.

Ing. José Luis López Hernández.

Mtro. Roberto Mateos Crespo.

Lic. Patricia Luna González.

LAE. Ma. del Socorro Calderón Flores.

Lic. Julieta Reyes.

Dr. Porfirio Carrillo Castilla.

Mtra. Caritina Téllez Silva.

Mtro. Mauricio Aguirre Serena.

Mtro. Alejandro Córdova Ceballos.

Ing. José Luis Sánchez Amador.

Lic. Olga Sobrino Ortiz.

Lic. Rosy Salas.

CP. Verónica Cruz H.

- Agradezco el apoyo de los compañeros de la UPC, en especial a Víctor Schmidt, Ester Tarela, Cristian Sandoval, Carlos Bermúdez, Galo Valdebenito, Yeudy Vargas, Jairo Valcarcel, Mabel Marulanda, Martha Liliana Carreño, Cristian Sandoval, Miguel Ángel Montaña, Nayive Jaramillo, María Andrea Martínez, Rodrigo Franklin, Guillermo Martínez, Francisco Hurtado, Daniela Ciancio, Virma, Gonzálo Valdés, Guillem.

- Expreso mi agradecimiento a la Universidad Veracruzana por apoyarme en tan enriquecedora experiencia, y a la UPC por enseñarme nuevos caminos.

Finalmente, agradezco a las importantes instituciones mexicanas que contribuyeron al financiamiento de mis estudios de doctorado.

Este trabajo estuvo parcialmente financiado por: 1) el proyecto “Contribuciones sismológicas, geofísicas y de ingeniería a la predicción y prevención del riesgo sísmico” (CGL2008-00869/BTE); 2) el proyecto “SisPyr: INTERREG: POCTEFA 2007-2013/73/08”, con fondos FEDER y de la Comisión Europea.

RESUMEN

En el presente trabajo se propone una metodología probabilista para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. El riesgo sísmico obtenido mediante dicha metodología se expresa en términos de probabilidades anuales de excedencia de estados de daño y pérdidas. La metodología propuesta se denomina LM1_P debido a que tiene como punto de partida la metodología LM1 de Risk-UE. Para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P, se considera la peligrosidad sísmica del sitio donde se localizan dichos edificios, y la vulnerabilidad sísmica de cada uno de los edificios estudiados, incorporando un enfoque probabilista. La peligrosidad sísmica se toma en cuenta mediante tasas de excedencia de intensidades macrosísmicas, y la vulnerabilidad sísmica de cada edificio se considera mediante funciones de probabilidad tipo beta, que indican las probabilidades de que se presenten diferentes valores de un índice de vulnerabilidad. En esta metodología, el daño físico directo esperado se estima mediante funciones semi-empíricas deterministas que relacionan la peligrosidad y la vulnerabilidad. Con la finalidad de facilitar la aplicación de la metodología LM1_P se ha desarrollado un código para ordenador. Dicho código denominado USERISK 2011 permite estimar el riesgo sísmico de los edificios de cualquier zona urbana. Para mostrar la aplicación de la metodología LM1_P se estimó el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona. El procedimiento seguido para obtener dicho riesgo incluyó la estimación probabilista de la peligrosidad sísmica de Barcelona, y de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la ciudad. De acuerdo con los resultados en Barcelona la intensidad macrosísmica igual a VI, tiene en promedio un periodo de retorno de 278 años. Mientras que la intensidad macrosísmica que en la ciudad tiene un periodo de retorno de 475 años es un valor de 6.3 (VI-VII). Respecto a los resultados de vulnerabilidad sísmica es posible destacar que de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad promedio, la probabilidad de que en Barcelona el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5 varía entre el 79.05% y el 93.21%, con un valor medio del 87.91%. En cuanto al riesgo sísmico es posible identificar que de acuerdo con las curvas de riesgo sísmico promedio, el grado de daño moderado en Barcelona tiene una frecuencia anual de excedencia promedio que varía entre 5.09×10^{-3} y 9.92×10^{-3} , con un valor medio de 7.26×10^{-3} .

ABSTRACT

In the present work a probabilistic methodology to estimate the seismic risk of buildings in urban areas is proposed. The seismic risk obtained through this methodology is expressed in terms of annual probabilities of exceedance versus damage grades and losses. The proposed methodology is called LM1_P because it has as starting point the LM1 methodology of Risk-UE. This methodology is based on a probabilistic approach. In order to assess the seismic risk of buildings, the methodology takes into account the seismic hazard from the place where each building is located and the seismic vulnerability of each studied building. The seismic hazard is expressed in terms of exceedance rates of macroseismic intensities, and the seismic vulnerability from each building is expressed in terms of probability density functions that describe the probabilities related to different values of the vulnerability index. In this methodology, the expected seismic damage is assessed through a semi-empirical and deterministic function, which relates the seismic hazard and the seismic vulnerability. In order to facilitate the application of the LM1_P methodology, a computer code has been developed. This code called USERISK 2011 allows assessing the seismic risk of the buildings of any urban area. The seismic risk of the buildings of Barcelona was assessed using the LM1_P methodology. This assessment included the following two steps: the probabilistic seismic hazard assessment of Barcelona and the seismic vulnerability assessment of the buildings of Barcelona. According to the results, the macroseismic intensity equal to VI has, on average, a return period of 278 years. At the same time, the macroseismic intensity that in Barcelona has, on average, a return period of 475 years is a value equal to 6.3 (VI-VII). On the other hand, according to the results of seismic vulnerability, the probability that the vulnerability index of Barcelona will be greater than 0.5 ranges between 79.05% and 93.21%, with a mean value of 87.91%. Finally, according to the curves of the average seismic risk of Barcelona, the moderate damage grade has an average annual frequency of exceedance that ranges between 5.09×10^{-3} and 9.92×10^{-3} , with a mean value of 7.26×10^{-3} .

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2: DAÑO Y RIESGO SÍSMICOS.....	23
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PROBABILISTA PARA ESTIMAR EL RIESGO SÍSMICO DE EDIFICIOS EN ZONAS URBANAS	79
CAPÍTULO 4: CÓDIGO DE CÓMPUTO USERISK 2011	109
CAPÍTULO 5: PELIGROSIDAD SÍSMICA DE BARCELONA.....	129
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN EL MÉTODO LM1_P.....	183
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO EN EL MÉTODO LM1_P.....	237
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.....	275
REFERENCIAS	283

ANEXO A. MODIFICADORES DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

ANEXO B. ZONAS ZRP DE BARCELONA POR BARRIO

ANEXO C. USO DE USERISK 2011

ANEXO D. CÓDIGOS EMPLEADOS POR EL AYUNTAMIENTO DE BARCELONA PARA IDENTIFICAR LAS TIPOLOGÍAS DE LOS EDIFICIOS

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 MOTIVACIÓN	16
1.3 OBJETIVOS	18
1.4 METODOLOGÍA LM1_P	18
1.5 CONTENIDO DE LA MEMORIA	20
CAPÍTULO 2: DAÑO Y RIESGO SÍSMICOS.....	23
2.1 DAÑO EN EDIFICIOS	25
2.1.1 Daño físico en edificios	25
2.1.2 Origen del daño físico en edificios.....	25
2.1.3 Cuantificación del daño físico en edificios	26
2.1.4 Pérdidas económicas por daño físico en edificios	28
2.2 DAÑO SÍSMICO.....	28
2.2.1 Daño sísmico en edificios.....	28
2.2.2 Origen del daño sísmico en edificios.....	29
2.2.3 Cuantificación del daño sísmico.....	29
2.2.4 Pérdidas sísmicas.....	30
2.3 RIESGO.....	31
2.3.1 Riesgo de daño físico	32
2.3.2 Origen del riesgo de daño físico.....	33
2.3.3 Riesgo sísmico de edificios	33
2.3.4 Origen del riesgo sísmico	34
2.3.5 Importancia de los estudios de riesgo sísmico.....	35
2.4 ESTIMACIÓN DEL RIESGO.....	36
2.4.1 Estimación del riesgo de daño físico en edificios.....	36

2.4.2	Estimación del riesgo sísmico de edificios.....	37
2.4.3	Metodologías para estimar vulnerabilidad sísmica y daño sísmico esperado de edificios en zonas urbanas	44
2.5	GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.....	70
2.5.1	Criterios de aceptabilidad del riesgo	72
2.5.2	Mitigación del riesgo sísmico de edificios	73
2.6	ESTUDIOS PREVIOS DEL RIESGO SÍSMICO DE BARCELONA	75
2.7	RESUMEN Y CONCLUSIÓN	77
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PROBABILISTA PARA ESTIMAR EL RIESGO SÍSMICO DE EDIFICIOS EN ZONAS URBANAS		79
3.1	INTRODUCCIÓN	79
3.2	MODELO PROBABILISTA	79
3.3	ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA	81
3.3.1	Modelo de recurrencia sísmica	82
3.3.2	Modelo de atenuación sísmica.....	83
3.3.3	Frecuencias de excedencia del parámetro de peligrosidad sísmica A^*	83
3.3.4	Resultados de peligrosidad sísmica para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P.....	84
3.4	ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	86
3.4.1	Obtención de la curva de la mejor estimación de la vulnerabilidad sísmica	87
3.4.2	Estimación de las curvas Inferior y Superior de la vulnerabilidad sísmica	95
3.5	FUNCIÓN DE DAÑO.....	99
3.5.1	Función para estimar daño sísmico en edificios.....	99
3.6	ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.....	100
3.7	RESUMEN Y DISCUSIÓN	104
CAPÍTULO 4: CÓDIGO DE CÓMPUTO USERISK 2011		109
4.1	INTRODUCCIÓN	109
4.2	VISIÓN GENERAL	109
4.2.1	Principales módulos	110
4.2.2	Datos.....	110
4.2.3	Resultados	111
4.2.4	Salidas gráficas.....	112

4.2.5	Vinculaciones con otros programas o plataformas	112
4.3	MÓDULOS DEL PROGRAMA.....	112
4.3.1	Archivo (File)	112
4.3.2	Datos (Data)	113
4.3.3	Ejecutar (Run)	116
4.3.4	Herramientas (Tools).....	118
4.3.5	Ayuda (Help)	119
4.4	CASO DE APLICACIÓN (EJEMPLO)	119
4.4.1	Objetivo	119
4.4.2	Preparación del material: datos	120
4.4.3	Ejecución del programa	121
4.4.4	Análisis de resultados	125
4.5	RESUMEN Y CONCLUSIONES	127
CAPÍTULO 5: PELIGROSIDAD SÍSMICA DE BARCELONA.....		129
5.1	INTRODUCCIÓN	129
5.2	GEOLOGÍA.....	132
5.3	FUENTES SISMOGENÉTICAS	134
5.3.1	Geometría de las fuentes sísmicas	134
5.3.2	Potencial sísmico	136
5.4	ATENUACIÓN	137
5.4.1	Leyes de atenuación de la intensidad	137
5.4.2	Ley de atenuación de espectros de respuesta uniformes	138
5.4.3	Leyes de atenuación en el CRISIS	140
5.5	EFFECTOS DE SITIO	141
5.5.1	Zonificación sísmica de la ciudad	141
5.5.2	Mapas de incrementos de intensidad en Barcelona	142
5.5.3	Funciones de transferencia para los espectros de respuesta	142
5.6	CURVA DE PELIGROSIDAD A PARTIR DE INTENSIDADES MACROSÍSMICAS	144
5.6.1	Influencia de la ley de atenuación	144
5.6.2	Influencia del parámetro beta	149
5.7	CURVAS DE PELIGROSIDAD A PARTIR DE LA MAGNITUD MS.....	151
5.7.1	Influencia de las leyes de transformación Intensidad-Magnitud	151

5.7.2	Influencia del parámetro beta	158
5.7.3	Influencia de la ley de atenuación	162
5.8	RESULTADOS	166
5.8.1	Curvas de peligrosidad probabilista basadas en intensidades.....	166
5.8.2	Curva de peligrosidad probabilista basada en magnitudes	167
5.8.3	Discusión. Comparación con otros estudios.....	175
5.8.4	Curvas de peligrosidad adoptadas	175
5.8.5	Efectos de sitio	178
5.9	OTROS ASPECTOS DEL PELIGRO SÍSMICO DE BARCELONA	179
5.10	RESUMEN Y CONCLUSIONES	180
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN EL MÉTODO LM1_P.....		183
6.1	INTRODUCCIÓN	183
6.2	LA CIUDAD DE BARCELONA	184
6.2.1	Fisiografía (geografía física)	184
6.2.2	Divisiones administrativas.....	184
6.2.3	Población.....	187
6.3	BASE DE DATOS DE EDIFICIOS	188
6.3.1	Base de datos del catastro.....	189
6.3.2	Antigüedad de los edificios	190
6.3.3	Tipologías constructivas.....	192
6.3.4	Estado de conservación	197
6.4	PLATAFORMA GIS	197
6.4.1	Segregación de edificios especiales.....	197
6.4.2	La información catastral	197
6.4.3	Altura de los edificios.....	199
6.4.4	Síntesis de los datos y fiabilidad	202
6.5	VULNERABILIDAD	203
6.5.1	USERISK 2011: un caso de aplicación	203
6.5.2	Vulnerabilidad de Barcelona	212
6.6	DISCUSIÓN	233
6.7	RESUMEN Y CONCLUSIONES	235

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO EN EL MÉTODO LM1_P.....	237
7.1 INTRODUCCIÓN.....	237
7.2 RIESGO SÍSMICO.....	237
7.2.1 USERISK 2011: un caso de aplicación	237
7.2.2 Riesgo sísmico de Barcelona.....	244
7.3 OTROS ASPECTOS DEL RIESGO SÍSMICO DE BARCELONA	268
7.4 DISCUSIÓN	272
7.5 RESUMEN Y CONCLUSIONES	273
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.....	275
8.1 CONCLUSIONES POR CAPÍTULO	275
8.2 CONCLUSIONES GENERALES.....	280
8.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	281
REFERENCIAS	283
ANEXO A. MODIFICADORES DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	
ANEXO B. ZONAS ZRP DE BARCELONA POR BARRIO	
ANEXO C. USO DE USERISK 2011	
ANEXO D. CÓDIGOS EMPLEADOS POR EL AYUNTAMIENTO DE BARCELONA PARA IDENTIFICAR LAS TIPOLOGÍAS DE LOS EDIFICIOS	

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1. Daño sísmico que de acuerdo con el ATC-13 se podrá presentar en los edificios 1 y 2, debido a la ocurrencia de un sismo de grado VII en la escala MM.	4
Figura 1-2. Distribución del daño sísmico estimado mediante el método LM1 de Risk-UE para el edificio 1 (a) y el edificio 2 (b), cuyos índices de vulnerabilidad total son iguales a 0.556 y 0.736, respectivamente, y están sometidos a una intensidad macrosísmica de VII.....	11
Figura 1-3. Curvas de fragilidad para el edificio A.....	14
Figura 1-4. Curvas de fragilidad para el edificio A, y línea vertical definida a partir del desplazamiento espectral del punto de desempeño del edificio A.....	15
Figura 2-1. Principales etapas en la vida de los edificios.....	23
Figura 2-2. Sismos que han generado las mayores pérdidas reportadas en California, USA, en el periodo 1970-2000 (Rowshandel et al, 2007).....	30
Figura 2-3. Número de fallecimientos en importantes sismos de California (Todd et al, 1994; Utsu, 2002).....	31
Figura 2-4. Frecuencia de muerte individual en cualquier año debido a diferentes causas (Coburn y Spence, 2002).	32
Figura 2-5. Elementos que generan el riesgo de daño físico en edificios.....	33
Figura 2-6. (a) Curva de riesgo sísmico de un edificio de mampostería no reforzada con muros de carga, y de baja altura (ATC-13, 1985), localizado en la prefectura de Tokio, Japón (Ishii et al, 2007); (b) Curva de riesgo sísmico de la ciudad de Cologne, Alemania (Grünthal et al, 2006).....	34
Figura 2-7. Mapa de pérdidas sísmicas anualizadas en millones de dólares de Estados Unidos (excepto Alaska y Hawai), por estado (FEMA-366, 2008).	34
Figura 2-8. Crecimiento de las poblaciones urbanas y rurales en el mundo, y crecimiento estimado de dichas poblaciones para las próximas décadas (UN-DESA, 2007; 2006).	35
Figura 2-9. Principales pasos en la estimación de escenarios de riesgo sísmico de edificios mediante el método LM1 de Risk-UE.....	39
Figura 2-10. Principales pasos en la estimación del riesgo sísmico de edificios en términos de frecuencias de excedencia del daño (adaptado de McGuire, 2004).	39
Figura 2-11. Curvas de peligro sísmico de las ciudades de Los Ángeles, California (USA), y Colima (México), en términos de la frecuencia anual de excedencia de la aceleración máxima del terreno (USGS, 2002; Ordaz et al, 1996).....	40

Figura 2-12. Esquema de una función de daño sísmico típica (adaptada de Mahdyiar y Porter, 2005).....	43
Figura 2-13. Función de distribución acumulativa beta del Factor de Daño (DF), para la clase de construcción No. 1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica $MM=IX$	50
Figura 2-14. Definiciones de cantidad en la EMS-98 (Grünthal, 1998).....	55
Figura 2-15. Probabilidades de ocurrencia de cada uno de los grados de daño sísmico (Tabla 2-10), asociados a un grado de daño sísmico medio, μ_D , igual a 2.	61
Figura 2-16. Curvas de daño sísmico-intensidad sísmica, plausibles y posibles para las clases de vulnerabilidad B (a), y para la clase de vulnerabilidad C (b).	63
Figura 2-17. Curvas daño-intensidad plausibles y posibles para las clases de vulnerabilidad sísmica B y C.....	64
Figura 2-18. Probabilidades de ocurrencia para cada uno de los grados de daño D_k , definidos en la EMS-98 (Tabla 2-10), asociados a un grado de daño medio (μ_D) igual a 3.....	68
Figura 2-19. Pasos de un procedimiento que puede emplearse para gestionar el riesgo sísmico de un edificio existente (adaptado de Krawinkler y Miranda, 2004).....	71
Figura 2-20. Nivel de atención que frecuentemente se destina a los riesgos, en función de su frecuencia anual de ocurrencia (McGuire, 2004).	72
Figura 3-1. Elementos empleados en la metodología LM1_P para estimar el riesgo sísmico de edificios (1,2,3), y ejemplo de los resultados de riesgo sísmico que se obtienen al aplicar dicha metodología (4).	80
Figura 3-2. Estimación de la probabilidad de excedencia del parámetro de peligrosidad sísmica A^* , a partir de la ley de atenuación sísmica, para el caso en el que la magnitud M es igual a M^* y la distancia R es igual a R^* (adaptado de Beauval, 2003).	83
Figura 3-3. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas, obtenida mediante el CRISIS2008.	85
Figura 3-4. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas (adaptadas de Secanell et al, 2004).....	85
Figura 3-5. Función de densidad de probabilidad beta, en la que el índice medio de la vulnerabilidad sísmica corresponde al valor medio de la función beta, y los valores de V_c y V_d delimitan el intervalo de confianza del 90%.	88
Figura 3-6. Funciones de distribución acumulativa tipo beta que representan a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN1 y BCN2.....	94
Figura 3-7. Funciones de distribución acumulativa beta, que representan la vulnerabilidad sísmica del edificio BCN1 (a) y del edificio BCN2 (b).....	98
Figura 3-8. Curvas $I-\mu_D$ obtenidas al evaluar la función semi-empírica representada en la Ec. 3-37, mediante cuatro valores del índice de vulnerabilidad y diferentes intensidades macrosísmicas.....	100
Figura 3-9. Curvas de probabilidad acumulada del grado de daño (D_k) para cuatro valores diferentes del índice de la vulnerabilidad y para la intensidad de VIII (Ec. 2-28 a Ec. 2-30).	100

Figura 3-10. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica para Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 3-3).....	101
Figura 3-11. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica para Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 3-3).....	102
Figura 3-12. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad sísmica para Barcelona de la Figura 3-4.....	103
Figura 3-13. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN2 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad sísmica para Barcelona de la Figura 3-4.....	104
Figura 3-14. Comparación de las curvas del grado de daño medio que se obtienen para los índices de vulnerabilidad iguales a 0.522 y 0.616, cuando se emplean la función de daño del método LM1 (Ec. 3-37) y la función de daño propuesta por Bernardini et al (2007a) (Ec. 3-42).	106
Figura 3-15. Curvas del grado de daño medio para $V=0.522$, obtenidas mediante la ecuación 3-37, y mediante las ecuaciones 3-38 y 3-41, para un valor de $\gamma = 0.013$	107
Figura 3-16. Curvas de probabilidad acumulada del grado de daño (D_k) para $I=VIII$ y $V=0.616$	107
Figura 4-1. Módulos para la estimación del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, mediante la metodología LM1_P.	109
Figura 4-2. Pantalla principal del código USERISK 2011.....	110
Figura 4-3. Pantalla de USERISK en la que se asignan o muestran el nombre de la ciudad o zona de estudio, y los límites del índice de vulnerabilidad sísmica.	113
Figura 4-4. Pantalla de USERISK 2011 en la que se asigna el archivo con extensión “.hz”, que contiene la información que define a las curvas de peligrosidad sísmica. Las curvas de peligrosidad sísmica mostradas en la presente figura se adaptaron para fines del ejemplo, a partir de las curvas que fueron estimadas para Barcelona por Secanell et al (2004).....	115
Figura 4-5. Pantalla de USERISK 2011 en la que es posible proporcionar información sobre los edificios por estudiar.....	116
Figura 4-6. Pantalla de USERISK con información general de dicho código.....	119
Figura 4-7. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado; en este caso se muestran las curvas y los respectivos parámetros α y β que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica (Inferior, Mejor y Superior) del edificio E-1.	122

Figura 4-8. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado; en este caso se muestran las curvas y los respectivos parámetros α y β que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica (Inferior, Mejor y Superior) del edificio E-2.	123
Figura 4-9. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-1, en términos de frecuencias anuales de excedencia del grado de daño.	123
Figura 4-10. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-2, en términos de frecuencias anuales de excedencia del grado de daño.	124
Figura 4-11. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-1, en términos de los periodos de retorno del grado de daño.	124
Figura 4-12. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-2, en términos de los periodos de retorno del grado de daño.	125
Figura 5-1. Ubicación de los principales epicentros de sismos con intensidades mayores o iguales a V, ocurridos entre los años 1152 y 1998 en la región de Cataluña y zonas aledañas (Susagna y Goula, 1999).	130
Figura 5-2. Imagen satelital de la ciudad de Barcelona (ICC, 2010).	132
Figura 5-3. Principales perfiles geológicos simplificados de la ciudad de Barcelona (Cid et al, 2001; 1999).	133
Figura 5-4. Situación geológica, en superficie, de la ciudad de Barcelona (Cid et al, 1999).	134
Figura 5-5. Representación geométrica de las fuentes sísmicas empleadas para estimar el peligro sísmico de Barcelona.	135
Figura 5-6. Imagen del CRISIS2007 en la que se muestran las fuentes sísmicas, que se consideraron para estimar el peligro sísmico de Barcelona.	135
Figura 5-7. Atenuación de la intensidad de un sismo con intensidad epicentral VII, de acuerdo con: (a) la ley de atenuación “Alta” y, (b) la ley de atenuación “Baja” de López Casado et al (2000a).	137
Figura 5-8. Curva de atenuación de los valores de PGA (g) versus distancia Joyner y Boore (1981), obtenida mediante la ecuación de Ambraseys et al (1996), para una magnitud $M_s = 6$ y para un sitio en roca.	139
Figura 5-9. Localización de las zonas sísmicas de Barcelona (Cid et al, 1999).	141
Figura 5-10. Mapa de incrementos de intensidad macrosísmica en Barcelona, para considerar efectos locales en el suelo.	142
Figura 5-11. Factores de amplificación espectral para Barcelona de acuerdo con Irizarry (2004).	143
Figura 5-12. Malla de cálculo generada en el código CRISIS2007 para estimar la peligrosidad sísmica en Barcelona.	145

Figura 5-13. Mapa de peligrosidad sísmica de Barcelona, generado a partir de los resultados obtenidos mediante el CRISIS2007, y localización del sitio elegido (+) para estimar curvas de peligrosidad sísmica representativas de Barcelona.....	146
Figura 5-14. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2007, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores de la ley de atenuación de la intensidad macrosísmica: los valores medios de la intensidad, y los valores medios de la intensidad más y menos una desviación estándar, respectivamente.	147
Figura 5-15. Mapa de peligrosidad sísmica de Barcelona, generado a partir de los resultados obtenidos mediante el CRISIS2008, y localización del sitio elegido (+) para estimar curvas de peligrosidad sísmica representativas de Barcelona.....	148
Figura 5-16. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida mediante el código CRISIS2008, en el que se integró directamente la incertidumbre en las leyes de atenuación de las intensidades macrosísmicas.	148
Figura 5-17. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente.	149
Figura 5-18. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que en un caso se consideran los coeficientes de variación del parámetros de sismicidad β indicados en la Tabla 5-8 (caso con incertidumbre en beta), y en el otro caso se considera que el valor de los coeficientes de variación de β es igual a cero (caso sin incertidumbre en beta).	150
Figura 5-19. Frecuencias de excedencia de la magnitud para la fuente sísmica 10, al considerar los valores medios de M_s , y los valores de M_s relativos al percentil 16 y al percentil 84, respectivamente.	153
Figura 5-20. Caso 1. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su estimación se tomaron en cuenta los parámetros de sismicidad que se obtienen al considerar tres valores de la magnitud M_s : los valores medios de M_s , y los valores medios de M_s más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-10 y Tabla 5-11).....	154
Figura 5-21. Caso 2. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su estimación se tomaron en cuenta los parámetros de sismicidad que se obtienen al considerar tres valores de la magnitud M_s : los valores medios de M_s , y los valores medios de M_s más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-12 y Tabla 5-13).....	155
Figura 5-22. Caso 3. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su estimación se tomaron en cuenta los parámetros de sismicidad que se obtienen al considerar tres valores de la magnitud M_s : los valores medios de M_s , y los valores medios de M_s más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-15 y Tabla 5-16).....	158

Figura 5-23. Caso 1. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medio de β más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-18).	159
Figura 5-24. Caso 2. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-19).	160
Figura 5-25. Caso 3. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-20).	161
Figura 5-26. Caso 1. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores diferentes de la ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno: los valores medios de PGA y los valores medios de PGA más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-22).	163
Figura 5-27. Caso 2. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores diferentes de la ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno: los valores medios de PGA y los valores medios de PGA más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-23).	164
Figura 5-28. Caso 3. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores diferentes de la ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno: los valores medios de PGA y los valores medios de PGA más y menos una desviación estándar (Tabla 5-24).	165
Figura 5-29. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas mediante el CRISIS2007 (media - σ , media, media + σ), y la curva de peligrosidad sísmica única obtenida mediante el CRISIS2008.	167
Figura 5-30. Ejemplo de árbol lógico que puede usarse para considerar las diferentes relaciones I_0 - M_s utilizadas para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona.	168
Figura 5-31. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008 para los casos 1,2,3 y para la combinación de ellos de acuerdo con los criterios del árbol lógico indicado en la Figura 5-30.	168
Figura 5-32. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida mediante el CRISIS2008 a partir de la combinación de los casos 1,2 y 3 de acuerdo con los criterios del árbol lógico indicado en la Figura 5-30.	169
Figura 5-33. Relaciones intensidad macrosísmica-PGA propuestas por Sorensen et al(2008), Wald et al (1999), Marin et al (2004) y la considerada en las normas NCSE-94 (1994).	170
Figura 5-34. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Wald et al (1999).	170

Figura 5-35. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Marin et al (2004).	171
Figura 5-36. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de la NCSE-94 (1994).	171
Figura 5-37. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Sorensen et al (2008).	172
Figura 5-38. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar la curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-32, mediante diferentes relaciones intensidad macrosísmica versus PGA.	172
Figura 5-39. Comparación de las curvas de las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar valores de PGA en intensidades macrosísmicas (Figura 5-38), con la curva de peligrosidad sísmica obtenida directamente en términos de intensidades macrosísmicas (Figura 5-16).	173
Figura 5-40. Curva de peligrosidad sísmica obtenida al transformar mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Sorensen et al (2008), la curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-32.	174
Figura 5-41. Comparación de la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida en el presente trabajo y las obtenidas por Secanell et al (2004).	177
Figura 5-42. Curva probabilista de peligrosidad sísmica de Barcelona adoptada para el presente trabajo para la zona sísmica R (línea continua), y curva que representa la peligrosidad sísmica de las zonas I, II y III (línea punteada), obtenida al considerar que la intensidad que se producirá en estas últimas tres zonas será medio grado mayor que la que se producirá en la zona sísmica R.	178
Figura 5-43. Porcentaje de contribución de cada una de las 11 fuentes sísmicas, a la tasa de excedencia de valores de PGA en roca, iguales a 5 cm/s ² (a), y a 20 cm/s ² (b), en el sitio de referencia de Barcelona (Longitud 2.195 grados, latitud 41.42 grados).	179
Figura 6-1. Localización de los 10 distritos municipales en los que actualmente está dividida la ciudad de Barcelona.	185
Figura 6-2. Localización de los 38 barrios de Barcelona listados en la Tabla 6-2.	186
Figura 6-3. Distribución de la densidad de población por barrio de Barcelona.	187
Figura 6-4. Número de edificios construidos en Barcelona en el periodo 1850-2005.	190
Figura 6-5. Número de edificios construidos por distrito en Barcelona en el periodo 1940-1980.	191
Figura 6-6. Año promedio de construcción de los edificios de cada distrito de Barcelona.	191
Figura 6-7. Antigüedad promedio de los edificios de cada barrio de Barcelona.	192
Figura 6-8. Distribución en porcentaje de las tipologías estructurales de los 69982 edificios de Barcelona.	194

Figura 6-9. Número de edificios construidos por tipología estructural (mampostería no reforzada y hormigón armado) en Barcelona en el periodo 1940-2005.	195
Figura 6-10. Proporción de las tipologías estructurales por distrito al considerar los 69982 edificios de Barcelona.	195
Figura 6-11. Proporción de las tipologías estructurales por barrio al considerar los 69982 edificios de Barcelona.	196
Figura 6-12. Ejemplo de una manzana con los datos catastrales facilitados por el Ayuntamiento de Barcelona.	198
Figura 6-13. Imagen digital de la manzana 41300 (ICC, 2010) representada mediante la Figura 6-12 en la base de datos del IMI (2009).	198
Figura 6-14. Detalle de la información catastral de la parcela 4 de la manzana 41300 (Figura 6-12).	199
Figura 6-15. Número medio de niveles de los edificios de cada distrito de Barcelona.	201
Figura 6-16. Número medio de niveles de los edificios de cada barrio de Barcelona.	201
Figura 6-17. Resumen de los datos disponibles en el presente trabajo sobre los edificios de Barcelona.	202
Figura 6-18. Modificadores en función del número de plantas de los edificios adyacentes (Lantada et al, 2009b).	204
Figura 6-19. Curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (a) y BCN4 (b).	209
Figura 6-20. Curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente, y curva Mejor promedio de los edificios BCN3 y BCN4.	211
Figura 6-21. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente, y curvas de vulnerabilidad promedio representativas de ambos edificios.	211
Figura 6-22. Curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de Barcelona.	213
Figura 6-23. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería (a) y de hormigón (b) de Barcelona.	214
Figura 6-24. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los distritos Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d).	215
Figura 6-25. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los distritos Sarrià-Sant Gervasi (a) y Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f).	216
Figura 6-26. Curvas Mejor promedio de la vulnerabilidad sísmica de los distritos de Barcelona.	218
Figura 6-27. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5 en cada distrito de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).	219
Figura 6-28. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 en cada distrito de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).	220

Figura 6-29. Curvas de vulnerabilidad sísmica promedio de los edificios de mampostería (a) y hormigón (b) de los distritos de Ciutat Vella (1), del Eixample (2) y de Nou Barris (3). ...	221
Figura 6-30. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 en los edificios de mampostería (a) y en los de hormigón (b) de los distritos de Barcelona, de acuerdo con sus respectivas curvas de vulnerabilidad Inferior (1), Mejor (2), y Superior (3)	224
Figura 6-31. Curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica del barrio de Parc del distrito de Ciutat Vella, y del barrio de Sagrera del distrito de Sant Andreu.	225
Figura 6-32. Curvas Mejores promedio (a), Inferiores promedio (b) y Superiores promedio (c) de la vulnerabilidad sísmica de cada uno de los 5 barrios del distrito del Eixample.....	228
Figura 6-33. Curvas de vulnerabilidad sísmica de uno de los edificios de mayor vulnerabilidad sísmica (a), y uno de los edificios de menor vulnerabilidad sísmica (b), del distrito del Eixample.	229
Figura 6-34. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5 en cada barrio de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).	230
Figura 6-35. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 en cada barrio de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).	231
Figura 6-36. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5 en cada edificio del distrito del Eixample, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b), y Superior (c).	232
Figura 7-1. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN3, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a).	240
Figura 7-2. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN4, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b).	241
Figura 7-3. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN3, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a).	242
Figura 7-4. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN4, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b).	242
Figura 7-5. Curvas Mejor de riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente, y curva Mejor promedio del riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4.	243

Figura 7-6. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (frecuencias de excedencia versus grado de daño), obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16).	245
Figura 7-7. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (periodo de retorno versus grado de daño), obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16).	245
Figura 7-8. Curva de peligrosidad sísmica obtenida al truncar a una frecuencia de excedencia igual a 1/(475 años), la curva de peligrosidad sísmica obtenida en el presente trabajo (Figura 5-16).	246
Figura 7-9. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, obtenidas mediante USERISK al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8).	247
Figura 7-10. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, obtenidas al considerar: 1) la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16) (curvas de riesgo sísmico en color negro); y 2) la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8) (curvas de riesgo sísmico en color gris).	247
Figura 7-11. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, sin considerar efectos de sitio.	249
Figura 7-12. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	250
Figura 7-13. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de hormigón de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	250
Figura 7-14. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c), Les Corts (d), Sarrià-Sant Gervasi (e), Gràcia (f) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	251
Figura 7-15. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Horta-Guinardó (a), Nou Barris (b), Sant Andreu (c) y Sant Martí (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	252
Figura 7-16. Curvas promedio Mejor del riesgo sísmico de los distritos de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	252
Figura 7-17. Periodos de retorno en años del grado de daño moderado en cada distrito de Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c), estimadas mediante la curva de peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	253

Figura 7-18. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16), y sin considerar efectos de sitio.....	254
Figura 7-19. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Sarrià-Sant Gervasi (a), Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16) y sin considerar efectos de sitio.	255
Figura 7-20. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).....	256
Figura 7-21. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de los distritos de Sarrià-Sant Gervasi (a), Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).	257
Figura 7-22. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de hormigón de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).....	258
Figura 7-23. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de los distritos de Sarrià-Sant Gervasi (a), Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f), obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).....	259
Figura 7-24. Periodos de retorno en años del grado de daño moderado en cada barrio de Barcelona de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c), estimadas mediante la curva de peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).....	262
Figura 7-25. Periodos de retorno del grado de daño moderado en cada edificio del distrito del Eixample de Barcelona de acuerdo con las curvas del riesgo sísmico Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c), estimadas mediante la curva de peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).....	263
Figura 7-26. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (frecuencias de excedencia versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad obtenidas por Secanell et al (2004), y la presencia de efectos locales en el suelo.	264
Figura 7-27. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (periodos de retorno versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004), y la presencia de efectos locales en el suelo.	265

- Figura 7-28. Curvas promedio Mejor del riesgo sísmico de Barcelona (frecuencias de excedencia versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio y la peligrosidad sísmica: a) obtenida en el presente trabajo y; b) estimada por Secanell et al (2004).....267
- Figura 7-29. Curvas promedio Mejor del riesgo sísmico de Barcelona (periodos de retorno versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio y la peligrosidad sísmica: a) obtenida en el presente trabajo y; b) estimada por Secanell et al (2004).....267
- Figura 7-30. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.....269
- Figura 7-31. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Ciutat Vella (a) y Eixample (b) de Barcelona, en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.....270
- Figura 7-32. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Sants-Montjuïc (a), Les Corts (b), Sarrià-Sant Gervasi (c), Gràcia (d), Horta-guinardó (e) y Nou Barris (f) de Barcelona, en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.271
- Figura 7-33. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Sant Andreu (a) y Sant Martí (b) de Barcelona, en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.....272

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1-1. Matriz de probabilidad de daño para edificios pertenecientes a la Clase 75, que corresponde a edificios de mampostería no reforzada (muros de carga) de baja altura (1-3 niveles) de acuerdo al ATC-13.	3
Tabla 1-2. Descripción de los estados de daño del ATC-13.	3
Tabla 1-3. Datos hipotéticos de dos edificios localizados en Los Ángeles, California.	4
Tabla 1-4. Grados de daño considerados en el método LM1 de Risk-UE.	6
Tabla 1-5. Equivalencia entre los grados de daño de las metodologías LM1 y LM2 de Risk-UE.	7
Tabla 1-6. Equivalencia entre los niveles de daño establecidos en el ATC-13 y el método LM1 de Risk-UE, de acuerdo con Lantada (2007).	11
Tabla 1-7. Datos de dos edificios localizados en Barcelona.	12
Tabla 1-8. Valores que definen el espectro bilineal del edificio A (Bonett, 2003).	13
Tabla 1-9. Valores de los umbrales de los Estados de daño definidos en función de D_y y D_u	13
Tabla 1-10. Desplazamientos espectrales medios correspondientes a los diferentes estados de daño para el edificio A.	14
Tabla 1-11. Desviaciones estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para cada estado de daño (Bonett, 2003).	14
Tabla 1-12. Matriz de probabilidad de daño para el edificio A localizado en Barcelona (Bonett, 2003).	15
Tabla 2-1. Estados de daño debido a viento o huracanes en construcciones tipo residencial (FEMA, 2009b; Vickery et al, 2006).	27
Tabla 2-2. Estados de daño en edificios debido a inundación considerados en el modelo HAZUS (FEMA, 2009c).	28
Tabla 2-3. Características de procedimientos <i>ex ante</i> y <i>ex post</i> para estimar el riesgo sísmico de edificios (Anagnostopoulos y Moretti, 2008a; 2008b; Baggio et al, 2007; Carreño et al, 2007b; NZSEE, 2006; ATC-20-1, 2005; FEMA 154, 2002; Anagnostopoulos, 1996).	38
Tabla 2-4. Estimaciones del menor daño probable para la clase de construcción No.1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica de IX.	47
Tabla 2-5. Pesos de las estimaciones del menor daño probable, para la clase de construcción No. 1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica de IX.	48
Tabla 2-6. Valores medios de las estimaciones de daño para la clase de construcción No. 1, sometida a una intensidad macrosísmica igual a IX.	49

Tabla 2-7. Matriz de Probabilidad de daño incompleta para la clase de construcción No.1 (edificio de baja altura formado por pórticos de madera), con datos únicamente para la intensidad MM= IX.....	51
Tabla 2-8. Matriz de probabilidad de daño completa para la clase de construcción No.1.	51
Tabla 2-9. Diferenciación de estructuras (edificios), conforme a clases de vulnerabilidad, de acuerdo con la escala EMS-98 (Grünthal, 1998).....	52
Tabla 2-10 Grados de daño en edificios, y descripción de las características particulares de dichos grados de daño en los edificios de mampostería y hormigón armado, según EMS-98 (Grünthal, 1998).	54
Tabla 2-11. Matriz de Probabilidad de daño incompleta, definida mediante variables lingüísticas, para edificios con vulnerabilidad clase A según EMS-98.	56
Tabla 2-12. Matriz de Probabilidad de daño incompleta, definida mediante porcentajes de daño, para edificios con vulnerabilidad clase A según EMS-98.	56
Tabla 2-13. Matriz de probabilidad de daño incompleta, definida mediante variables lingüísticas, para edificios con vulnerabilidad clase E.	57
Tabla 2-14. Matriz de probabilidad de daño incompleta, definida mediante valores numéricos que sustituyen a las variables lingüísticas, para edificios pertenecientes a la clase de vulnerabilidad E.....	57
Tabla 2-15. Matriz de probabilidad de daño completa para edificios pertenecientes a la clase de vulnerabilidad E.....	57
Tabla 2-16. Ejemplo de valores de μ_x obtenidos para diferentes valores de μ_D mediante la Ec. 2-27.....	60
Tabla 2-17. Intervalos que sustituyen a las variables lingüísticas de cantidad EMS-98, en los que se incluyen únicamente a los valores plausibles (más probables).....	62
Tabla 2-18. Intervalos que sustituyen a las variables lingüísticas EMS-98, en los que se incluyen tanto los valores plausibles como los valores posibles.	62
Tabla 2-19. Intervalos de valores que sustituyen a las variables lingüísticas de poco y mucho en edificios clase B, sometidos a una intensidad de VI.....	62
Tabla 2-20. Valores de control para completar la matriz de distribución de daño de los edificios clase B, sometidos a una intensidad de VI.....	62
Tabla 2-21. Valores que completan la distribución de daño para los edificios clase B, sometidos a una intensidad de VI.	63
Tabla 2-22. Definición de las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98, en términos de valores del índice de vulnerabilidad (Giovinazzi, 2005).....	64
Tabla 2-23. Valores del índice de vulnerabilidad para diferentes tipologías de edificios (Giovinazzi, 2005).....	66
Tabla 2-24. Normas y documentos que tienen como uno de sus principales objetivos, contribuir a la adecuada reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes.	74
Tabla 2-25. Estudios relacionados con la estimación del riesgo sísmico de Barcelona.	75

Tabla 2-26. Grados de daño medio esperado por distrito en Barcelona, obtenidos al aplicar la metodología LM1 de Risk-UE y al considerar dos escenarios sísmicos (Lantada et al, 2010).....	76
Tabla 3-1. Datos de dos edificios en Barcelona.	84
Tabla 3-2. Tipologías estructurales y sus correspondientes valores representativos de la vulnerabilidad, en términos del índice de vulnerabilidad (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	89
Tabla 3-3. Modificadores regionales de la vulnerabilidad sísmica de las principales tipologías estructurales existentes en Barcelona (Lantada, 2007).	90
Tabla 3-4. Modificador de la vulnerabilidad en función del estado de conservación del edificio en Barcelona (Lantada, 2007).	91
Tabla 3-5. Modificador de la vulnerabilidad en función del número de niveles del edificio en Barcelona (Lantada, 2007).	92
Tabla 3-6. Modificadores de la vulnerabilidad y sus respectivas puntuaciones para los edificios BCN1 y BCN2.	92
Tabla 3-7. Resumen de los valores empleados para estimar el índice de vulnerabilidad medio de los edificios BCN1 y BCN2.	92
Tabla 3-8. Valores de los parámetros α y β que definen las funciones beta de la Figura 3-7.	98
Tabla 4-1. Opciones del módulo Archivo (File) de USERISK 2011.	113
Tabla 4-2. Opciones del módulo datos (Data) de USERISK 2011.	114
Tabla 4-3. Descripción de los datos que debe contener el archivo de texto con extensión “.csv”, mediante el cual se proporcionan los datos de los edificios de Barcelona, de los cuales se requiere estimar su vulnerabilidad y riesgo sísmico.	114
Tabla 4-4. Datos que debe contener el archivo de peligrosidad sísmica con extensión “.hz”, mediante el cual se define la peligrosidad sísmica que se usará para estimar el riesgo sísmico de edificios.	115
Tabla 4-5. Opciones del módulo Ejecutar (Run) de USERISK 2011.	116
Tabla 4-6. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.vuln1”, el cual es generado por USERISK, para concentrar los resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos al aplicar la metodología LM1_P.	117
Tabla 4-7. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.dam1”, el cual es generado por USERISK 2011, para concentrar resultados de riesgo sísmico obtenidos al aplicar la metodología LM1_P.	118
Tabla 4-8. Opciones del módulo Herramientas (Tools) de USERISK 2011.	119
Tabla 4-9. Opciones del módulo Ayuda (Help) de USERISK 2011.	119
Tabla 4-10. Parámetros que definen a las curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios E-1 y E-2 de Barcelona.	126

Tabla 4-11. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.1, en los edificios E-1 y E-2 de Barcelona.....	126
Tabla 4-12. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño, en el edificio E-1 de Barcelona.....	126
Tabla 4-13. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño, en el edificio E-2 de Barcelona.....	127
Tabla 4-14. Periodos de retorno en años del estado de daño moderado ($D2$), en el edificio E-1 y en el E-2 de Barcelona.....	127
Tabla 5-1. Grados de intensidad sísmica EMS-98 estimados en la ciudad de Barcelona, debidos a la ocurrencia de importantes sismos en los siglos XIV y XV (Olivera et al, 2006).	130
Tabla 5-2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5 (Secanell et al, 2004).	136
Tabla 5-3. Valores para determinar las leyes con una atenuación alta y una atenuación baja en la Península Ibérica de acuerdo con López Casado et al (2000a).	137
Tabla 5-4. Valores de los coeficientes de la Ec. 5-3 para el periodo $T = 0$ s.	139
Tabla 5-5. Valores de los coeficientes S_A y S_S de la ley de atenuación de Ambraseys et al (1996).	139
Tabla 5-6. Zonas sísmicas de Barcelona (Cid et al, 1999).	141
Tabla 5-7. Factores de amplificación del suelo en cada una de las diferentes zonas sísmicas de Barcelona (Irizarry, 2004).	143
Tabla 5-8. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados al estimar mediante el CRISIS2007 las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-14 (Secanell et al, 2004).	147
Tabla 5-9. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-17.	150
Tabla 5-10. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-7 propuesta por López Casado et al (2000b).	152
Tabla 5-11. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-20. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-7 propuesta por López Casado et al (2000b).	153
Tabla 5-12. Caso 2. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-8, propuesta por Gutdeutsch et al (2002).	155

Tabla 5-13. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-21. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-8, propuesta por Gutdeutsch et al (2002).	155
Tabla 5-14. Caso 3. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Tales parámetros están asociados a la magnitud sísmica M_L , y fueron obtenidos mediante las ecuaciones 5-9, 5-10 y 5-11.	156
Tabla 5-15. Caso 3. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Dichos parámetros están asociados a la magnitud sísmica M_s , y fueron obtenidos a partir de los datos de la Tabla 5-14 y la Ec. 5-12.	157
Tabla 5-16. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-22. Dichos parámetros están asociados a la magnitud sísmica M_s , y fueron obtenidos a partir de los datos de la Tabla 5-14 y la Ec. 5-12.	157
Tabla 5-17. Valores del periodo de retorno de un PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos para cada uno de los tres casos descritos en el presente apartado.	158
Tabla 5-18. Caso 1. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) considerados para estimar la influencia del parámetro sísmico β .	159
Tabla 5-19. Caso 2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) considerados para estimar la influencia del parámetro sísmico β .	160
Tabla 5-20. Caso 3. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) considerados para estimar la influencia del parámetro sísmico β .	161
Tabla 5-21. Valores del periodo de retorno de un PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos para cada uno de los tres casos descritos en el presente apartado.	162
Tabla 5-22. Caso 1. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) consideradas para estimar la influencia de la ley de atenuación.	163
Tabla 5-23. Caso 2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) consideradas para estimar la influencia de la ley de atenuación.	164
Tabla 5-24. Caso 3. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) consideradas para estimar la influencia de la ley de atenuación.	165
Tabla 5-25. Valores del periodo de retorno de un PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos para cada uno de los tres casos descritos en el presente apartado.	166
Tabla 5-26. Aceleración máxima del terreno (cm/s^2), en Barcelona para los periodos de retorno de 475 y 975 años.	174
Tabla 5-27. Intensidad macrosísmica en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años.	174
Tabla 5-28. Valores de la intensidad macrosísmica en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años, estimados en diferentes estudios de peligrosidad sísmica.	175

Tabla 5-29. Valores de la aceleración máxima del terreno en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años, estimados en diferentes estudios de peligrosidad sísmica.	175
Tabla 5-30. Ejemplo de los valores de amplificación de PGA y de la intensidad macrosísmica para las diferentes zonas sísmicas de Barcelona, al considerar los factores de amplificación de Irizarry (2004), y las relaciones PGA-Intensidad macrosísmica de Marin et al (2004) y de Sorensen et al (2008).	178
Tabla 6-1. Superficie por distrito en Barcelona en km ² (Idescat, 2009).	185
Tabla 6-2. Barrios por distrito de Barcelona (Idescat, 2007).	186
Tabla 6-3. Distribución de población por distrito de Barcelona (Idescat, 2010).	187
Tabla 6-4. Número de manzanas y de parcelas edificadas por distrito de Barcelona (Lantada et al, 2009b).	189
Tabla 6-5. Equivalencia entre las tipologías del Ayuntamiento de Barcelona y las de Risk-UE (Lantada, 2007).	193
Tabla 6-6. Distribución de tipologías estructurales por distrito de los edificios de Barcelona.	193
Tabla 6-7. Clasificación empleada por el Ayuntamiento de Barcelona para indicar el nivel de conservación de los edificios.	197
Tabla 6-8. Número medio de niveles de los edificios de cada distrito de Barcelona y su correspondiente desviación estándar.	199
Tabla 6-9. Número medio y desviación estándar de los niveles de los edificios de cada barrio de Barcelona.	200
Tabla 6-10. Modificador de la vulnerabilidad por irregularidad geométrica en planta (Lantada et al, 2009b).	204
Tabla 6-11. Modificador de la vulnerabilidad por la posición del edificio en la manzana.	204
Tabla 6-12. Códigos para identificar en USERISK los diferentes casos del modificador relativo al número de plantas de los edificios adyacentes (Figura 6-18).	205
Tabla 6-13. Descripción de los datos que contiene el archivo de texto <i>datos_generales.data</i> , requerido para estimar mediante USERISK la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4.	205
Tabla 6-14. Descripción de los datos que contiene el archivo de texto <i>edificios_BCN.csv</i> , requerido para estimar mediante USERISK 2011 la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4.	206
Tabla 6-15. Descripción de la información que contiene el archivo de texto <i>edificios_vulnerability.res</i> , el cual es generado por USERISK 2011, para concentrar los resultados de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4.	208
Tabla 6-16. Índices de vulnerabilidad de los edificios BCN3 y BCN4 que tienen la misma probabilidad acumulada, $P(V < v)$, de acuerdo con sus respectivas curvas Mejor de la vulnerabilidad; e índices de vulnerabilidad promedio de los edificios BCN3 y BCN4, que determinan la curva Mejor promedio de los edificios BCN3 y BCN4.	210

Tabla 6-17. Valores de α y β que definen a cada una de las curvas promedio que representan a la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, y sus respectivos valor medio y desviación estándar	211
Tabla 6-18. Parámetros que definen a cada una de las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de Barcelona.	213
Tabla 6-19. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de la ciudad.	213
Tabla 6-20. Parámetros que definen a las curvas de vulnerabilidad sísmica promedio de los edificios de mampostería y de hormigón de Barcelona.	214
Tabla 6-21. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los grupos de edificios pertenecientes a la tipología de hormigón y de mampostería, respectivamente.	214
Tabla 6-22. Parámetros que definen a cada una de las curvas de la vulnerabilidad sísmica de los distritos de Barcelona.	217
Tabla 6-23. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los distritos de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada distrito.	217
Tabla 6-24. Parámetros que definen a cada una de las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería y de hormigón de cada distrito de Barcelona.	222
Tabla 6-25. Probabilidades en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los edificios de mampostería y hormigón de los distritos de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica.	223
Tabla 6-26. Parámetros que definen a cada una de las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de los barrios de Barcelona.	226
Tabla 6-27. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los barrios de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada barrio.	227
Tabla 7-1. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN3 de Barcelona, obtenidas al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a), y las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4).	239
Tabla 7-2. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN4 de Barcelona, obtenidas al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b), y las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4).	239
Tabla 7-3. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN3 de Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-1.	240

Tabla 7-4. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN4 de Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-2.	241
Tabla 7-5. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN3 de Barcelona, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a), y la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16).	241
Tabla 7-6. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN4 de Barcelona, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b), y la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16).	241
Tabla 7-7. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN3 en Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-5.	242
Tabla 7-8. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN4 en Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-6.	243
Tabla 7-9. Frecuencias anuales de excedencia que definen a la curva Mejor de riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4, y a la curva Mejor promedio que representa el riesgo sísmico de ambos edificios.	244
Tabla 7-10. Frecuencias anuales de excedencia promedio de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico de la Figura 7-6.	244
Tabla 7-11. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico de la Figura 7-7.	245
Tabla 7-12. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico obtenidas mediante la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8).	248
Tabla 7-13. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio Mejor del riesgo sísmico obtenidas mediante: a) la curva completa de la peligrosidad sísmica de Barcelona (Figura 5-16); y b) la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8).	248
Tabla 7-14. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, obtenidos al no considerar efectos de sitio.	249
Tabla 7-15. Frecuencias anuales de excedencia promedio de los estados de daño de cada barrio de Barcelona, de acuerdo con la curva Mejor promedio.	260
Tabla 7-16. Periodos de retorno promedio del estado de daño moderado de cada barrio de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior promedio, Mejor promedio y Superior promedio.	261
Tabla 7-17. Frecuencias anuales de excedencia promedio de cada estado de daño en Barcelona obtenidos al considerar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004).	265

Tabla 7-18. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona obtenidos al considerar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004).	265
Tabla 7-19. Ejemplos de factores de daño para estimar pérdidas económicas.....	269
Tabla 7-20. Pérdidas sísmicas promedio en M€ asociadas a la ocurrencia de cada grado de daño en Barcelona.	269
Tabla 7-21. Frecuencias anuales de excedencia promedio de diferentes valores de las pérdidas sísmicas promedio (M€) de Barcelona.	269
Tabla 7-22. Superficie destinada a vivienda por distrito de Barcelona (Ayuntamiento de Barcelona, 2010).....	270

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En ocasiones los movimientos sísmicos del terreno causan daños a edificios. Desafortunadamente, en ciertos casos el nivel de dicho daño llega a producir el colapso parcial o total de los edificios, y genera lesiones a personas e incluso la muerte de algunos de sus ocupantes (Utsu, 2002). Por otra parte, sabemos que seguirán ocurriendo sismos de magnitudes moderadas y grandes, pero por el momento, no sabemos con exactitud la fecha de su ocurrencia, ni tampoco las características precisas que tendrán dichos movimientos sísmicos (McGuire, 2004). Tal incertidumbre asociada a la ocurrencia de sismos, es una razón más que contribuye a que la percepción del riesgo relacionado con la ocurrencia de sismos, sea un tema complejo (Coburn y Spence, 2002). Sin embargo, como sí tenemos la certeza de que seguirán ocurriendo sismos y sabemos además que la capacidad sismorresistente de los edificios existentes no es uniforme, entonces, podemos afirmar que los edificios existentes pueden sufrir algún tipo de daño durante la ocurrencia de futuros sismos.

Con la finalidad de estimar el daño que puede generarse en edificios durante la ocurrencia de sismos, se realizan diversos tipos de estudios, por ejemplo, los estudios de riesgo sísmico, los cuales tienen el propósito de contestar preguntas como las siguientes: ¿Cuál es el daño más probable que puede sufrir un edificio determinado debido a la ocurrencia de un sismo específico? ¿Cuál es la frecuencia anual de que ocurra el colapso de un edificio determinado debido a la ocurrencia de movimientos sísmicos del terreno?

Para estimar el riesgo sísmico de edificios es posible emplear diversas metodologías, sin embargo, la elección de la metodología apropiada depende de diversos factores, entre los que destacan, la naturaleza del problema y el propósito del estudio (Coburn y Spence, 2002). Por ejemplo, el número de edificios que se incluirán en un estudio de riesgo sísmico, será un factor que influirá en la elección de la metodología empleada para la estimación de dicho riesgo. Porque en general, no es igual la cantidad de recursos que se pueden destinar para evaluar el riesgo sísmico de un solo edificio, que los recursos que se pueden destinar para evaluar cada uno de los miles de edificios de una ciudad.

Por otro lado, en las últimas décadas se han desarrollado diversas metodologías para estimar el riesgo sísmico de zonas urbanas. Dichas metodologías se caracterizan porque mediante ellas se pueden realizar

estimaciones del riesgo sísmico de grandes cantidades de construcciones, especialmente de edificios. Asimismo, algunas de tales metodologías han sido producto de proyectos relevantes como los siguientes: ATC-13, ATC-25, HAZUS'99 y Risk-UE. El programa HAZUS'99 es anterior al proyecto Risk-UE y es adoptado por este último para técnicas de evaluación de daño esperado basadas en espectros de capacidad y de demanda. No se dedica una mayor atención a este tipo de métodos avanzados ya que el método propuesto en este trabajo da continuidad a métodos basados en intensidades macrosísmicas y en índices de vulnerabilidad. Así, sólo se describen a continuación las principales características de los métodos ATC-13, ATC-25 y Risk-UE por su relación con los desarrollos de esta Tesis, haciendo énfasis en la conveniencia de incorporar enfoques probabilistas al análisis de riesgo sísmico. Por otra parte esta descripción de técnicas y métodos de evaluación de daño se incluye en esta introducción, para dar una mayor completitud al trabajo pero puede ser obviada por el lector conocedor de las mismas.

ATC-13

El principal objetivo del proyecto denominado ATC-13 (*“Earthquake Damage Evaluation Data for California”*), fue generar estimaciones del daño físico directo y pérdidas de origen sísmico en construcciones de California en Estados Unidos (ATC-13, 1985). Dicho proyecto incluyó las siguientes tareas: a) elección de la forma de caracterizar los movimientos sísmicos del terreno, con la finalidad de estimar daños y pérdidas futuras en construcciones por la ocurrencia de movimientos sísmicos; b) determinación o elección de una clasificación que representara a la mayoría de las construcciones existentes en California; c) desarrollo de un método para estimar pérdidas y daño sísmicos futuros, en términos del movimiento sísmico seleccionado y del tipo de construcción identificado.

Los participantes en el proyecto eligieron la escala Mercalli modificada (MM) para caracterizar los movimientos sísmicos del terreno. Además, emplearon dos tipos de clasificaciones para identificar a las construcciones. La primera clasificación se realizó desde el punto de vista de la ingeniería sísmica y se presentó como la *“Earthquake Engineering Facility Classification”*. Esta primera clasificación agrupó a la totalidad de las construcciones en 78 clases, de las cuales 40 corresponden a edificios y las restantes 38 a otros tipos de estructuras. Mientras que la segunda clasificación corresponde al uso o función social de la construcción, para la cual emplearon 35 clases de usos (ATC-13, 1985).

Por otra parte, para cumplir con el objetivo de generar una metodología que permitiese estimar pérdidas y daño sísmicos futuros en construcciones, optaron por emplear el conocimiento de expertos en dicho tema, y para tal fin, utilizaron una metodología previamente validada que se conoce como el método Delphi. Por ejemplo, emplearon dicho método para obtener matrices de probabilidad de daño. Para ello, realizaron las actividades siguientes: a) creación de formularios para realizar encuestas; b) elección de las personas expertas a ser encuestadas; c) realización de las encuestas en las que se le pedía a cada experto

que estimara en función de su experiencia, el porcentaje de daño físico directo que se puede presentar en construcciones tipo, después de la ocurrencia de diferentes grados de intensidad de la escala MM; d) análisis estadístico de los resultados de las encuestas, y; e) cálculo de las matrices de probabilidad de daño.

La Tabla 1-1 muestra un ejemplo de las 78 matrices de probabilidad de daño obtenidas en el proyecto ATC-13, la cual corresponde a una edificación de mampostería no reforzada de baja altura (*Facility Class* No. 75). Las matrices de probabilidad de daño del ATC-13 expresan la probabilidad de ocurrencia de estados de daño (Tabla 1-2) en función del grado de intensidad macrosísmica MM.

Tabla 1-1. Matriz de probabilidad de daño para edificios pertenecientes a la Clase 75, que corresponde a edificios de mampostería no reforzada (muros de carga) de baja altura (1-3 niveles) de acuerdo al ATC-13.

Estado de daño	Intensidad Mercalli Modificada						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1-Nulo.	***	***	***	***	***	***	***
2-Leve.	9.1	0.6	***	***	***	***	***
3-Ligero.	90.5	55.5	10.9	0.5	***	***	***
4-Moderado.	0.4	43.4	66.0	22.4	2.0	0.1	0.1
5-Severo.	***	0.5	22.9	65.9	35.0	10.1	3.4
6-Grave.	***	***	0.2	11.2	62.5	83.1	50.4
7-Colpaso.	***	***	***	***	0.5	6.7	46.1

*** Probabilidad muy pequeña

Tabla 1-2. Descripción de los estados de daño del ATC-13.

Estado de daño	Intervalo del factor de daño (%)	Factor de daño central (%)	Descripción
1-Nulo.	0	0	Sin daño.
2-Pequeño.	0-1	0.5	Daño menor localizado y limitado que no requiere reparación.
3-Ligero.	1-10	5	Daño localizado significativo de algunos componentes que generalmente no requieren reparación.
4-Moderado.	10-30	20	Daño localizado significativo de muchos componentes que justifica la reparación.
5-Fuerte.	30-60	45	Daño extenso que requiere reparación mayor.
6-Mayor.	60-100	80	Gran daño generalizado que puede originar que la edificación sea demolida o reparada.
7-Destruido.	100	100	Destrucción total de la mayor parte de la edificación.

Aplicación del método ATC-13

Enseguida se muestra en forma simplificada, un ejemplo del proceso basado en el ATC-13 para estimar un escenario de riesgo sísmico de edificios. Específicamente, se estima el daño sísmico que puede producirse en los dos edificios descritos en la Tabla 1-3, cuando ocurra en Los Ángeles, California, un escenario sísmico caracterizado por una intensidad MM igual a VII. Ambos edificios pertenecen a la clase

de construcción No.75 por ser edificios de mampostería no reforzada (muros de carga) de baja altura (1-3 niveles).

Tabla 1-3. Datos hipotéticos de dos edificios localizados en Los Ángeles, California.

Características	Edificio 1	Edificio 2
Tipo de edificio.	Mampostería no reforzada con muros de carga y con forjados de losas de hormigón armado.	Mampostería no reforzada con muros de carga y con forjados de losas de hormigón armado.
Número de niveles.	2	3
Irregularidad geométrica en planta.	Baja.	Alta.
Irregularidad geométrica en elevación (vertical).	Baja.	Alta.
Estado de conservación.	Bueno.	Ruinoso.

Para estimar el daño esperado de los edificios 1 y 2 se emplea la matriz de probabilidad de daño de la Tabla 1-1, y se considera que el escenario sísmico está determinado por una intensidad macrosísmica de grado VII. Al hacerlo se obtiene que el daño que tiene mayor probabilidad de presentarse, en los edificios 1 y 2, es el asociado al estado de daño 3 (ligero), con un 55.5% de probabilidad, seguido del estado de daño 4 (moderado), con un 43.4% de probabilidad (Figura 1-1).

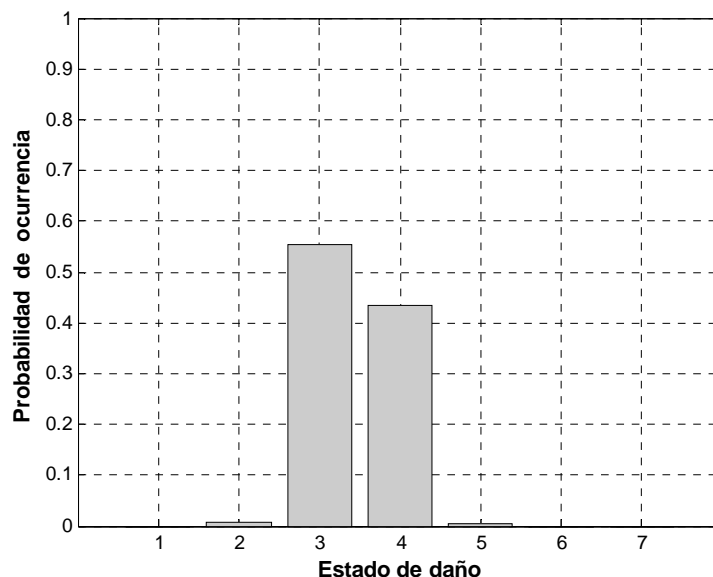


Figura 1-1. Daño sísmico que de acuerdo con el ATC-13 se podrá presentar en los edificios 1 y 2, debido a la ocurrencia de un sismo de grado VII en la escala MM.

De manera que es posible observar que al aplicar la metodología del ATC-13, se obtienen los mismos resultados de daño sísmico para los edificios 1 y 2. Esto último se debe al hecho de que en el ATC-13 sólo se considera la clase de edificación para representar al edificio, y los edificios 1 y 2 a pesar de tener diferencias entre sí, pertenecen a la misma clase de edificio.

ATC-25

El principal objetivo del proyecto denominado ATC-25 fue estimar el riesgo sísmico de las líneas vitales de Estados Unidos. En dicho proyecto las líneas vitales son consideradas como aquellos sistemas necesarios para la vida humana y el funcionamiento urbano, sin las cuales grandes regiones urbanas no pueden existir. Las líneas vitales básicamente transportan comida, agua, combustibles, energía, información, y otros materiales necesarios para la existencia humana, desde las áreas de producción hasta las áreas de consumo urbano (ATC-25, 1991). En el ATC-25 se realizaron algunos cambios significativos con respecto a la metodología del ATC-13. Por ejemplo, se hicieron modificaciones para que con las propuestas del ATC-25 fuese posible estimar el riesgo sísmico de líneas vitales en cualquier parte de Estados Unidos y no sólo en California.

Por otra parte, en el ATC-25 consideraron únicamente cuatro estados de daño: 1) daño ligero (valor de reemplazo de 1-10%); 2) daño moderado (valor de reemplazo de 10-30%); 3) daño fuerte (valor de reemplazo de 30-60%) y; 4) daño mayor a destrucción (valor de reemplazo de 60-100%). En este proyecto obtuvieron funciones de vulnerabilidad que permiten estimar el riesgo sísmico de las líneas vitales (camino o autopistas, tanques de almacenamiento, líneas o tuberías de transporte de gas natural, etc.). Dichas funciones de vulnerabilidad están expresadas principalmente en porcentaje de daño versus intensidad macrosísmica MM.

Risk-UE

El proyecto Risk-UE fue un trabajo desarrollado en la Unión Europea, que se inició en 2001 y se concluyó en 2004 (Mouroux y Le Brun, 2006). El principal objetivo del proyecto fue proponer metodologías para estimar escenarios de riesgo sísmico de ciudades europeas. De manera específica Risk-UE adoptó dos metodologías para estimar el daño sísmico esperado en edificios, las cuales identificaron con los nombres LM1 y LM2 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). En la metodología LM1 o de nivel 1 el peligro sísmico se define mediante los grados de intensidades de la escala macrosísmica EMS-98. Mientras que la vulnerabilidad sísmica de los edificios se expresa principalmente mediante el índice de vulnerabilidad total. Dicho índice es un valor comprendido entre 0 y 1, siendo los valores cercanos a cero los que representan a edificios con baja vulnerabilidad sísmica, y los valores cercanos a uno los que representan a edificios con alta vulnerabilidad sísmica. El índice de vulnerabilidad total de cada edificio estudiado se obtiene al considerar la tipología estructural de dicho edificio, y las características del mismo que contribuyan a aumentar o disminuir su vulnerabilidad sísmica final.

Para estimar mediante la metodología LM1 el nivel de daño sísmico medio de cada edificio estudiado, se emplea una función de daño semi-empírica que depende de dos parámetros: el índice de vulnerabilidad

total del edificio estudiado y el grado de intensidad macrosísmica. Adicionalmente, este método considera expresiones para obtener una distribución de probabilidad tipo beta, que describe la distribución del daño a partir del daño sísmico medio estimado. De manera que para estimar las probabilidades de que se presenten cada uno de los 5 estados de daño (Tabla 1-4) en los edificios de una zona urbana, será necesario: a) clasificar a cada edificio dentro de una tipología estructural; b) estimar el índice de vulnerabilidad total de cada edificio; c) estimar la intensidad sísmica que afectará a cada uno de los edificios y; d) calcular la distribución de daño a partir del índice de vulnerabilidad total de cada edificio, y de la intensidad sísmica que se estimó afectará a cada edificio (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tabla 1-4. Grados de daño considerados en el método LM1 de Risk-UE.

Grado de daño	Descripción
0-Nulo.	Sin daño.
1-Ligero.	Daño insignificante a daño ligero.
2-Moderado.	Daño estructural ligero, daño no estructural moderado.
3-Substancial a fuerte.	Daño estructural moderado, daño no estructural fuerte.
4-Muy fuerte.	Daño estructural fuerte, daño no estructural muy fuerte.
5-Destrucción.	Daño estructural muy fuerte, colapso total o cerca del colapso total.

En el caso de la metodología LM2 o de nivel 2 el peligro sísmico se expresa en términos de espectros de respuesta lineal 5% amortiguada, y la vulnerabilidad sísmica de los edificios tipo se expresa mediante espectros de capacidad. En este método las funciones de daño son estimadas mediante modelos analíticos. Específicamente, se obtienen curvas de fragilidad por tipología estructural, las cuales permiten estimar la probabilidad condicional de que un estado de daño sea excedido. Dichas curvas de fragilidad están expresadas en términos de la probabilidad condicional de superar un estado de daño, versus el desplazamiento espectral del edificio tipo. De tal forma que para determinar las probabilidades de que se excedan los diferentes niveles de daño en el edificio tipo, es necesario estimar su punto de capacidad por demanda o punto de desempeño (*performance point*). Dicho punto define el nivel de demanda que sufrirá el edificio tipo sometido a la acción sísmica específica, y corresponde a la intersección del espectro de respuesta no lineal (llamado también espectro de demanda), con el espectro de capacidad (Pujades et al, 2007).

Mediante el método LM2 es posible obtener una matriz de probabilidad de daño para cada tipología estructural. Esta matriz se obtiene al ubicar el desplazamiento espectral que le corresponde al punto de desempeño del edificio, en las curvas de fragilidad de dicho edificio. Al hacerlo, se obtienen las probabilidades de ocurrencia asociadas a cada uno de los cuatro estados de daño no nulos (Tabla 1-5), considerados en la metodología LM2 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Una vez que se han obtenido las matrices de probabilidad de daño para cada tipología estructural estudiada se realiza lo siguiente: 1) se clasifica a cada uno de los edificios de la zona urbana en estudio, dentro de una de las posibles tipologías

estructurales, de las cuales se obtuvieron matrices de probabilidad de daño y; 2) se identifica la matriz de daño que le corresponde a cada edificio, en función de su tipología estructural, para conocer las probabilidades de que se presente en el edificio cada uno de los diferentes estados de daño.

Tabla 1-5. Equivalencia entre los grados de daño de las metodologías LM1 y LM2 de Risk-UE.

Grado de daño	
LM1	LM2
0-Nulo.	0-Nulo.
1-Ligero.	1-Menor.
2-Moderado.	2-Moderado.
3-Substancial a fuerte.	3-Severo.
4-Muy fuerte.	4-Colapso.
5-Destrucción.	

Por otra parte, el proyecto Risk-UE se organizó en bloques o paquetes de trabajo (*workpackages*) en función de los principales objetivos, y áreas de estudio previstas en el proyecto. Cada paquete de trabajo generó su respectivo informe, dando lugar a diferentes documentos, siendo los más relevantes para el presente estudio los que se describen enseguida.

WP1 Report. European distinctive features, inventory database and typology (Lungu et al, 2001). Este documento describe algunas directrices que tienen la finalidad de facilitar el proceso de obtención de información, que suele ser relevante en los estudios de riesgo sísmico de zonas urbanas. Sin embargo, desde el punto de vista de la estimación del daño sísmico de edificios, la principal contribución de este documento es la propuesta de un grupo de tipologías estructurales, que representan a la mayoría de los edificios en Europa. Para este fin, se incluyó en dicho documento una matriz de tipologías de edificios, que permite identificar edificios en función de las principales características estructurales, de la altura del edificio y del nivel del código sísmico empleado para su diseño. Finalmente, se describen características generales de las 7 ciudades europeas elegidas para aplicar las metodologías generadas dentro del proyecto Risk-UE.

WP2 Report. Basis of a handbook of earthquake ground motions scenarios (Faccioli et al, 2003; Faccioli, 2006). Este documento se planeó para que fuese la base para un manual europeo sobre escenarios sísmicos en áreas urbanas. De manera específica, en dicho documento se establecen directrices y recomendaciones para estimar escenarios sísmicos deterministas y probabilistas.

Evaluación determinista del peligro sísmico para la ciudad. De acuerdo con esta metodología el escenario determinista representa la severidad de un movimiento sísmico del terreno sobre un área

urbana, mediante el uso de uno o más descriptores de peligro sísmico. Dicho escenario puede ser obtenido:

- mediante la consideración de un “sismo de referencia” especificado por una magnitud o una intensidad epicentral, asociado a una fuente sísmica particular (por ejemplo, una falla, un punto o un volumen de la corteza). En este caso, normalmente los niveles de intensidad sísmica local necesitan ser estimados a través de relaciones de atenuación para él o los parámetros de peligro seleccionados, o;
- directamente, a través de los valores de intensidad macrosísmica, o de parámetros medidos instrumentalmente, que hayan sido generados por sismos dañinos del pasado. En este caso se suele seleccionar el valor de la intensidad o de los parámetros sísmicos asociados al sismo histórico, que a su vez fue seleccionado como el sismo representativo.

Evaluación probabilista del peligro sísmico. De acuerdo con esta metodología la evaluación probabilista del movimiento sísmico, o del escenario de peligrosidad uniforme, es una representación del movimiento sísmico sobre una área urbana que describe, a través de los parámetros de peligrosidad seleccionados, la severidad de los movimientos sísmicos esperados que tienen una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (periodo de retorno de 475 años). Tal representación se obtiene mediante el uso de una herramienta computacional denominada CRISIS99 (Ordaz et al, 1999), la cual incorpora y actualiza el método de Cornell (1968) para un análisis probabilista del peligro sísmico (PSHA por sus siglas en inglés).

Los escenarios sísmicos obtenidos en forma determinista o probabilista deben ser descritos en términos de la intensidad macrosísmica EMS-98, para que sea posible estimar el escenario de daño sísmico mediante el método LM1 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Mientras que para que se pueda emplear el método LM2 para estimar escenarios de daño sísmico (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), es necesario que los escenarios sísmicos deterministas o probabilistas sean descritos en términos de espectros de respuesta en su formato *Sa-Sd* (pseudo-aceleración versus pseudo-desplazamiento).

WP4 Report. Vulnerability of current buildings. Este documento contiene la descripción de las dos metodologías que fueron propuestas para estimar el daño sísmico en edificios. La primera de ellas denominada LM1 o de nivel 1, y la segunda LM2 o de nivel 2 (Mouroux y Le Brun, 2006; Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Tales metodologías fueron aplicadas en la estimación de escenarios de riesgo sísmico en 7 ciudades europeas entre las que se incluyó a Barcelona (ICC/CIMNE, 2004; Milutinovic et al, 2004; Lungu et al, 2004; Faccioli et al, 2004; Brgm, 2004; Kostov et al, 2004; Pitilakis et al, 2004). Enseguida se describe en forma simplificada cada una de las dos metodologías de Risk-UE.

Método LM1 de Risk-UE

En la metodología LM1 el índice de vulnerabilidad total, que representa la vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado, se estima mediante la Ec. 1-1 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

$$\overline{V}_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 1-1$$

donde V_I^* es el índice de vulnerabilidad más probable del edificio por su tipología; ΔV_R es el factor de vulnerabilidad regional y ΔV_m es la suma de las puntuaciones de todos los factores que modifican la vulnerabilidad más probable del edificio por su tipología.

El índice de vulnerabilidad por tipología estructural es un valor que puede representar la vulnerabilidad de un edificio, si sólo se considera el dato de su tipología. En cualquier caso, en el método LM1 la selección del tipo estructural es una actividad crítica, porque determina en gran medida el valor de la vulnerabilidad sísmica que se asignará al edificio estudiado.

Una vez que se han estimado la intensidad sísmica I y el índice de vulnerabilidad total \overline{V}_I , es posible estimar mediante una función semi-empírica el grado de daño medio μ_D . Para ello, se emplea la Ec. 1-2, en donde I corresponde a un grado de intensidad macrosísmica EMS-98.

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25\overline{V}_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad 1-2$$

En la Ec. 1-2 tanto el índice de vulnerabilidad total como la intensidad macrosísmica, son escalares que no representan parte importante de la incertidumbre asociada a dichos valores. De acuerdo con el método LM1, una vez que se ha obtenido el grado de daño medio μ_D , es posible obtener una distribución de daño sísmico asociada a una función de densidad de probabilidad tipo beta (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Por otra parte, las estimaciones que se realizan en el método LM1 son mediante escenarios sísmicos que llevan a valores únicos del grado de daño estimado por lo que, a pesar de incorporar elementos probabilistas como los análisis de escenarios probabilistas, puede considerarse que los resultados mantienen un enfoque determinista.

Aplicación del método LM1 de Risk-UE

Enseguida se describen los principales pasos empleados para estimar mediante el método LM1, el daño sísmico esperado en los edificios descritos en la Tabla 1-3, cuando son sometidos a una intensidad MM igual a VII.

Debido al hecho de que uno de los objetivos de las metodologías Risk-UE, fue que las mismas se pudiesen emplear para estimar el riesgo sísmico de edificios localizados en diferentes países y regiones europeas, se incluyeron en las metodologías elementos que permiten su fácil adaptación, para estimar el riesgo sísmico de edificaciones ubicadas en regiones diferentes. Por tal motivo, con la metodología LM1 también es posible estimar el riesgo sísmico de edificios localizados en regiones fuera de Europa, como es el caso del presente ejemplo hipotético.

De acuerdo con la metodología LM1 la vulnerabilidad sísmica de los edificios 1 y 2, está representada por un índice de vulnerabilidad total igual a 0.556 y 0.736, respectivamente. Dichos valores se obtuvieron al considerar: a) cada uno de los datos de la Tabla 1-3; b) que la tipología estructural para edificios de mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón armado se denomina M3.4 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003); c) que a la tipología M3.4 le corresponde un índice por tipología estructural igual a 0.616; d) que la suma de las puntuaciones debidas a los modificadores de la vulnerabilidad de los edificios 1 y 2, son iguales a -0.06 y 0.12, respectivamente.

En la metodología LM1 de Risk-UE la escala de intensidad considerada es la EMS-98, sin embargo, los grados macrosísmicos de dicha escala son considerados equivalentes a los grados macrosísmicos de la escala MM (ATC-13, 1985). Para ello, es importante tener en cuenta que la escala EMS-98 tiene como punto de partida la escala MSK, y que en términos de la definición del grado de intensidad los grados EMS-98, son equivalentes a los grados MSK (Grünthal, 1998).

Al aplicar la Ec. 1-2 es posible obtener el grado de daño medio que corresponde a los edificios 1 y 2. Posteriormente, a partir de los valores del daño medio obtenidos se puede estimar una distribución de daño para cada edificio (Figura 1-2). De acuerdo con las distribuciones de daño estimadas, el edificio 2 tiene mayor probabilidad de sufrir daño sísmico que el edificio 1. Por ejemplo, el edificio 2 tiene una probabilidad cercana al 6.0% de sufrir el grado de daño substancial, mientras que el edificio 1 sólo tiene una probabilidad cercana al 0.7%, de sufrir el mismo grado de daño.

Es importante destacar que con la metodología LM1 de Risk-UE es posible usar diferentes tipos de datos de los edificios, para distinguir entre las diferentes vulnerabilidades sísmicas que suelen tener dos edificios que pertenecen a la misma tipología estructural. Dicha posibilidad no está prevista en el ATC-13 (1985).

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos con el ATC-13 y con el método LM1 de Risk-UE, es posible emplear una equivalencia entre los niveles de daño establecidos en cada una de dichas metodologías. En este caso se empleará la equivalencia determinada por Lantada (2007), en la que señala, por ejemplo, que el estado de daño moderado del ATC-13, equivale al grado de daño moderado del

método LM1 (Tabla 1-6). A partir de esta última consideración y de acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 1-1 y Figura 1-2), es posible identificar que la probabilidad de que ocurra el daño moderado en el edificio 2 si se presenta una intensidad sísmica de VII, es igual al 43% o al 21%, ya sea que se emplee el ATC-13 o el método LM1, respectivamente. Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos al aplicar la metodología LM1, el daño sísmico esperado en los edificios 1 y 2 es diferente (Figura 1-2), debido a que su índice de vulnerabilidad total es distinto.

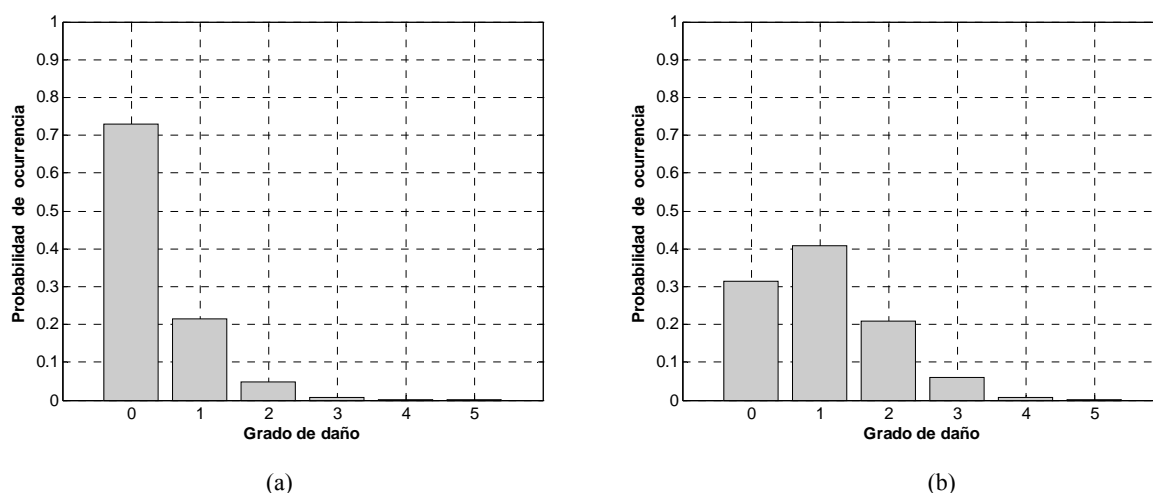


Figura 1-2. Distribución del daño sísmico estimado mediante el método LM1 de Risk-UE para el edificio 1 (a) y el edificio 2 (b), cuyos índices de vulnerabilidad total son iguales a 0.556 y 0.736, respectivamente, y están sometidos a una intensidad macrosísmica de VII.

Tabla 1-6. Equivalencia entre los niveles de daño establecidos en el ATC-13 y el método LM1 de Risk-UE, de acuerdo con Lantada (2007).

ATC-13 Estado de daño (<i>Damage State</i>)	LM1 Grado de daño
1-Nulo (<i>None</i>).	0-Nulo.
2-Pequeño (<i>Slight</i>).	1-Ligero.
3-Ligero (<i>Light</i>).	2-Moderado.
4-Moderado (<i>Moderate</i>).	3-Substancial a fuerte.
5-Fuerte (<i>Heavy</i>).	4-Muy fuerte.
6-Mayor (<i>Major</i>).	5-Destrucción.
7-Destruido (<i>Destroyed</i>).	

Método LM2 de Risk-UE

En el método LM2 es necesario identificar las principales tipologías estructurales, que representen a la mayoría de los edificios que existen en la zona urbana, en la que se desea estimar el riesgo sísmico. Posteriormente, se debe realizar un estudio analítico para estimar las probabilidades de que se presenten diferentes niveles de daño, en cada uno de los edificios tipo determinados. De tal forma que el riesgo sísmico de un edificio “X” de la zona urbana estudiada, será igual al daño esperado para el edificio tipo

que tenga las mayores similitudes con el edificio “X”. Es decir, el análisis analítico para estimar el daño sísmico esperado sólo se realiza para edificios representativos, y posteriormente, se infiere que el resto de los edificios de la zona urbana que tengan similitudes importantes con los edificios representativos estudiados, tendrán un riesgo sísmico similar.

El estudio analítico propuesto en el método LM2 para analizar a los edificios representativos, incluye principalmente los pasos siguientes (Milutinovic y Trendafiloski, 2003): 1) selección del modelo de edificio de la matriz de tipologías estructurales de Risk-UE o, definición de las características de una nueva tipología estructural; 2) cálculo del espectro de capacidad del edificio tipo; 3) estimación de las curvas de fragilidad para el edificio tipo; 4) determinación del espectro de demanda (sísmica) del sitio específico, donde se ubica el o los edificios en estudio; 5) cálculo del punto de desempeño del edificio tipo; 6) empleo del punto de desempeño del edificio tipo y de las curvas de fragilidad correspondientes, para la obtención de las probabilidades de que ocurran en el edificio tipo, cada uno de los 4 diferentes estados de daño (Tabla 1-5).

Aplicación del método LM2 de Risk-UE

Con el propósito de observar las principales ventajas y algunas de las limitaciones del método LM2 de Risk-UE, se estima enseguida mediante dicho método el riesgo sísmico de dos edificios. Para ello, se consideran los datos sobre los edificios 3 y 4 indicados en la Tabla 1-7. Dichos edificios están ubicados en suelo duro de la ciudad de Barcelona, y corresponden a tipologías de edificios característicos de dicha ciudad (Bonett, 2003; Paricio, 2001). Además, se considera que los edificios 3 y 4 estarán sometidos a intensidades sísmicas que tienen asociado un periodo de retorno de 500 años.

Tabla 1-7. Datos de dos edificios localizados en Barcelona.

Características	Edificio 3	Edificio 4
Tipo de edificio.	Mampostería no reforzada. Forjados de vigueta de madera, bovedilla manual, relleno de cascotes y mortero, mortero de cal y pavimento.	
Número de niveles.	6	4
Irregularidad geométrica en planta.	Baja.	
Irregularidad geométrica en elevación.	Alta.	
Estado de conservación.	Bueno.	Ruinoso.

Bonett (2003) estudió la respuesta sísmica de edificios con diversas características, por ejemplo, estudió dos edificios que se identificarán en el presente trabajo como los edificios A y B, los cuales tienen importantes similitudes con los edificios 3 y 4 (Tabla 1-7), respectivamente. Los estudios de Bonett (2003) incluyeron la obtención de curvas de capacidad, y de espectros de capacidad de los edificios A y B. Específicamente, Bonett (2003) obtuvo para cada edificio, los dos puntos de control que definen el

espectro de capacidad bilineal simplificado. Dichos puntos son el de capacidad de cedencia (o fluencia), y el de capacidad última. El punto de cedencia representa el desplazamiento en el que la respuesta del edificio empieza a ser esencialmente no lineal, mientras que el punto de capacidad última representa el desplazamiento, en el que el sistema estructural global ha alcanzado el mecanismo de colapso (Bonett, 2003). Los valores que definen el espectro de capacidad bilineal del edificio A, estudiado por Bonett (2003), se indican en la Tabla 1-8.

Tabla 1-8. Valores que definen el espectro bilineal del edificio A (Bonett, 2003).

Punto de cedencia		Punto de capacidad última	
D_y (cm)	A_y (g)	D_u (cm)	A_u (g)
0.69	0.105	2.61	0.100

Los cuatro estados de daño sísmico no nulos que se establecieron en la metodología LM2 de Risk-UE (Tabla 1-5), se pueden definir mediante diferentes criterios. Uno de ellos se basa en los valores del desplazamiento espectral de cedencia (D_y), y del desplazamiento espectral último (D_u), tal como se indica en la Tabla 1-9.

Tabla 1-9. Valores de los umbrales de los Estados de daño definidos en función de D_y y D_u .

Estado de daño	\bar{S}_d (desplazamiento espectral medio)
Leve	$0.7 D_y$
Moderado	D_y
Severo	$D_y + 0.25(D_u - D_y)$
Completo	D_u

Por otra parte, en el método LM2 se estiman curvas de fragilidad mediante la Ec.1-3, la cual fue propuesta por HAZUS (FEMA, 1999; FEMA, 2009a).

$$P[ds | S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad 1-3$$

donde S_d es el desplazamiento espectral,

$\bar{S}_{d,ds}$ es la mediana (percentil 50) del desplazamiento espectral en el cual el edificio alcanza el umbral del estado de daño ds ,

β_{ds} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado de daño, ds , y

Φ es la función de distribución acumulativa.

En el caso de Risk-UE se fijó la probabilidad del umbral de daño en un 50%, y se consideró que el daño se distribuye de forma binomial, o beta equivalente (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Lantada, 2007).

Con la finalidad de estimar las curvas de fragilidad para el edificio A mediante la Ec. 1-3, Bonett (2003) estimó: a) los desplazamientos espectrales medios correspondientes a los diferentes estados de daño para el edificio A (Tabla 1-10); y b) las desviaciones estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para cada estado de daño (Tabla 1-11). A partir de los resultados de dichas estimaciones obtuvo las curvas de fragilidad mostradas en la Figura 1-3.

Tabla 1-10. Desplazamientos espectrales medios correspondientes a los diferentes estados de daño para el edificio A.

\bar{Sd}_{Leve} (cm)	$\bar{Sd}_{Moderado}$ (cm)	\bar{Sd}_{Severo} (cm)	$\bar{Sd}_{Completo}$ (cm)
0.483	0.69	1.17	2.61

Tabla 1-11. Desviaciones estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para cada estado de daño (Bonett, 2003).

$\beta_{d_{leve}}$	$\beta_{d_{moderado}}$	$\beta_{d_{severo}}$	$\beta_{d_{completo}}$
0.30	0.45	0.65	0.65

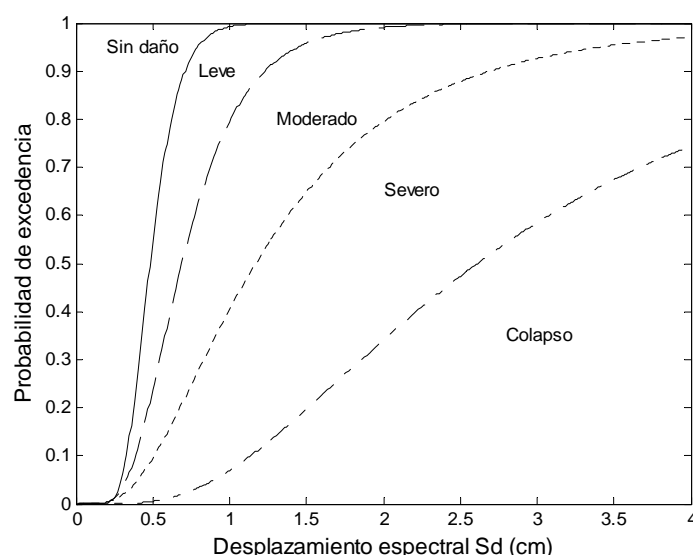


Figura 1-3. Curvas de fragilidad para el edificio A.

Posteriormente, Bonnet empleó el espectro de capacidad estimado para el edificio A, y el espectro de demanda sísmica correspondiente a un periodo de retorno de 475 años, para obtener el punto de capacidad por demanda correspondiente al edificio A. Dicho punto está definido por un desplazamiento espectral de 1.13 cm, y por una aceleración espectral de 0.104 g (Bonett, 2003). A continuación, utilizó el punto de

desempeño del edificio A, y las curvas de fragilidad del mismo edificio (Figura 1-3), para obtener la matriz de daño de la Tabla 1-12 (Figura 1-4). Dicha matriz de daño, muestra las probabilidades de que ocurran los diferentes niveles de daño en el edificio A.

Tabla 1-12. Matriz de probabilidad de daño para el edificio A localizado en Barcelona (Bonett, 2003).

0 - Nulo	Probabilidades de ocurrencia del estado de daño			
	1 - Leve	2 - Moderado	3 - Severo	4 - Completo
0.002	0.133	0.385	0.38	0.1

Por otra parte, es posible emplear la Ec. 1-4 para estimar un parámetro de daño medio (DS_m), el cual permite realizar comparaciones simplificadas de los resultados de riesgo sísmico. Por ejemplo, de acuerdo con los resultados, el valor del daño medio DS_m para el edificio A es igual a 2.44, lo cual significa que el estado de daño más probable para dicho edificio es el estado de daño moderado.

$$DS_m = \sum_{i=0}^N iP[DS_i]$$

1-4

donde N corresponde al número de estados de daño considerados, i es el número correspondiente al estado de daño DS_i , y $P[DS_i]$ es la probabilidad de ocurrencia del estado de daño i .

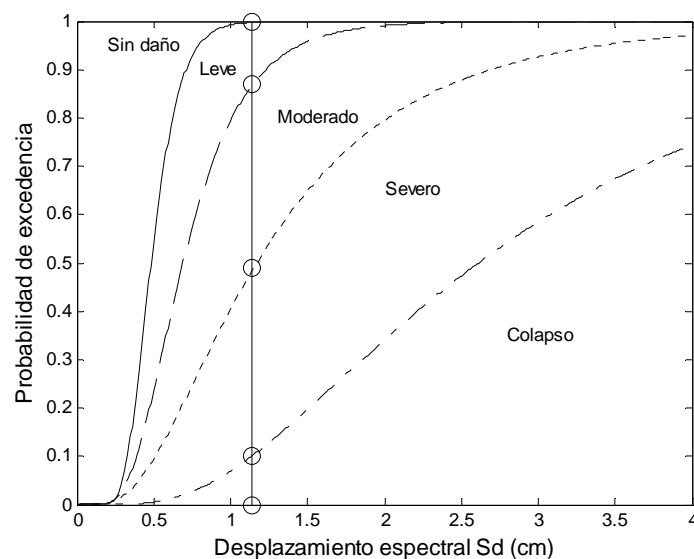


Figura 1-4. Curvas de fragilidad para el edificio A, y línea vertical definida a partir del desplazamiento espectral del punto de desempeño del edificio A.

Todo el procedimiento descrito anteriormente para la obtención del daño medio DS_m para el edificio A, constituye en forma simplificada, el procedimiento que se propone en el método LM2 de Risk-UE, para estimar el daño sísmico esperado en edificios representativos. Por otra parte, siguiendo un proceso similar

al empleado para el edificio A, Bonett (2003) estimó un daño medio de 2.31 para el edificio B, lo cual significa que el estado de daño más probable para el edificio B es el estado de daño moderado.

Debido a que al inicio del presente ejemplo de aplicación se identificó una gran similitud entre los edificios 3 y 4 (Tabla 1-7), con los edificios A y B estudiados por Bonett (2003), es posible inferir que el daño sísmico esperado en los edificios 3 y 4, es esencialmente, el mismo daño sísmico que se espera en los edificios A y B, respectivamente. Esta última inferencia, es un ejemplo del tipo de simplificaciones que se requieren realizar en la práctica, y que es parte de la propuesta del método LM2 para evaluar el riesgo sísmico de los numerosos edificios que existen en las zonas urbanas. En otras palabras, por diversas razones no es posible realizar los estudios detallados hechos por Bonett (2003), para cada uno de los miles de edificios diferentes que puede requerirse estudiar en una zona urbana. Por lo tanto, es necesario agrupar a los edificios en tipologías estructurales que permitan evaluar el riesgo sísmico de decenas, centenas o incluso miles de edificios, a partir de una sola tipología estructural (Lantada, 2007).

Es importante mencionar que la metodología LM2 de Risk-UE tiene como referencia principal la metodología conocida como HAZUS'99 (FEMA, 1999), la cual significó un avance importante en la estimación del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. En el capítulo siguiente se incluye más información sobre algunas de las más importantes metodologías que se han creado, para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. La conclusión más importante de este análisis y discusión de métodos de análisis del riesgo sísmico al uso, es que todos ellos definen el daño sísmico esperado para escenarios sísmicos específicos, de forma que aunque pueden analizar escenarios definidos en términos deterministas y probabilistas los resultados en cualquier caso se dan bajo un enfoque determinista, es decir, no incorporan las incertidumbres ni en las acciones sísmicas esperadas ni en la vulnerabilidad de los edificios definidos mediante índices, espectros de capacidad y curvas de fragilidad. Esta Tesis persigue incorporar y cuantificar estos elementos de incertidumbre mediante un enfoque probabilista del método LM1. Esta motivación y los principales objetivos de esta Tesis se definen a continuación.

1.2 Motivación

Actualmente, se suelen realizar dos grandes tipos de estimaciones del riesgo sísmico:

- A. Estimaciones de escenarios de riesgo sísmico [nivel de daño asociado a la ocurrencia de un solo evento sísmico o a las intensidades asociadas a un periodo de retorno] (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), y;
- B. Estimaciones de daño sísmico anualizado [frecuencia anual de ocurrencia o de excedencia del daño asociado a todos los sismos de diferentes tamaños y localizaciones que pueden ocurrir] (Coburn y Spence, 2002).

Las metodologías LM1 y LM2 de Risk-UE corresponden básicamente a metodologías tipo A, es decir, el principal objetivo de las mismas es estimar escenarios de riesgo sísmico. Por otra parte, tal como se mencionó anteriormente dichas metodologías tienen en gran medida un enfoque determinista. Es decir, el número de consideraciones de carácter probabilista empleadas en dichos métodos para estimar el riesgo sísmico, es reducido.

Por otra parte, a pesar de que los escenarios sísmicos obtenidos con las metodologías LM1 y LM2 son de gran utilidad (Coburn y Spence, 2002; Scawthorn, 2003), sólo constituyen una parte de la información del riesgo sísmico requerida para gestionar adecuadamente, el riesgo en las zonas urbanas. En general, además de la información de los escenarios de riesgo sísmico asociados a un evento sísmico, o a las intensidades sísmicas asociadas a un periodo de retorno determinado, es necesario, por ejemplo, tener información del riesgo sísmico expresado en términos de frecuencias anuales de excedencia del daño sísmico. Esta última información es fundamental para poder tomar decisiones asociadas a relaciones costo-beneficio, las cuales forman parte importante de la gestión integral del riesgo sísmico de zonas urbanas.

En relación a las metodologías LM1 y LM2 de Risk-UE, se puede concluir que las mismas son de gran utilidad en la estimación del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, sin embargo, también se puede afirmar que dichas metodologías son susceptibles de ser modificadas para que: a) consideren importantes fuentes de incertidumbre relacionadas con la estimación de los escenarios de riesgo sísmico, que actualmente no son consideradas, o que pueden ser consideradas con un mayor nivel de detalle; b) representen explícitamente incertidumbres asociadas a los resultados de riesgo sísmico; c) se puedan usar para realizar estimaciones de daño sísmico anualizado, el cual se obtiene al considerar los efectos de todos los sismos de diferentes tamaños que pueden ocurrir en diferentes intervalos de tiempo.

Por otra parte, en el caso de Barcelona, además del estudio de riesgo sísmico realizado para dicha ciudad dentro del proyecto Risk-UE, se han realizado en los últimos años, importantes trabajos relacionados con diferentes aspectos del riesgo sísmico de tal ciudad (Irizarry et al, 2010; Pujades et al, 2010; Lantada et al, 2010; Barbat et al, 2009; Lantada et al, 2009a; Barbat et al, 2008; Carreño et al, 2007a; Barbat et al, 2006a; Barbat et al, 1998; Barbat et al, 1996; Yépez et al, 1996). Dichos estudios han permitido tener un panorama importante sobre el riesgo sísmico de la ciudad, sin embargo, los mismos se han enfocado principalmente a la obtención de escenarios de riesgo sísmico, por lo que es conveniente realizar nuevos estudios del riesgo sísmico en Barcelona, en los que se realicen estimaciones de daño sísmico anualizado.

En función de todo lo mencionado anteriormente, las principales motivaciones del presente trabajo son las siguientes: 1) proponer modificaciones que permitan considerar más elementos probabilistas en la metodología LM1 de Risk-UE; 2) hacer las modificaciones requeridas para que el método LM1 de Risk-

UE pueda emplearse para estimar el riesgo sísmico, en términos de frecuencias anuales de excedencia de diferentes estados de daño; 3) aplicar la metodología modificada en el presente trabajo para obtener el riesgo sísmico de Barcelona, en términos de frecuencias anuales de ocurrencia de los diferentes estados de daño, y con ello complementar los resultados de escenarios sísmicos que se obtuvieron en estudios previos, en los que se aplicó la metodología LM1 de Risk-UE.

1.3 Objetivos

El objetivo general de la presente tesis es modificar mediante un enfoque probabilista el método LM1 propuesto en el proyecto Risk-UE, para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. La metodología modificada se llamará LM1_P, y permitirá expresar el riesgo sísmico estimado en términos de frecuencias anuales de excedencia del daño sísmico.

A partir de este objetivo general se han definido los objetivos metodológicos siguientes:

- Incorporar la definición del peligro sísmico en términos de curvas probabilistas que representen, principalmente, la frecuencia anual de excedencia en función de intensidades macrosísmicas.
- Definir la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante distribuciones de probabilidad del índice de vulnerabilidad.
- Obtener estimaciones de daño que incorporen las incertidumbres en las definiciones de la acción sísmica y de la vulnerabilidad.

Por otra parte, los objetivos aplicados son los siguientes:

- Desarrollar una herramienta informática que permita automatizar la aplicación del método LM1_P a escala de edificio individual, a escala urbana y a escala regional. Dicha herramienta facilitará el proceso requerido para hacer estimaciones del riesgo sísmico de los cientos o miles de edificios, que pueden existir en una región o en una zona urbana.
- Realizar una estimación probabilista del riesgo sísmico de Barcelona, para obtener frecuencias anuales de excedencia de diferentes estados de daño en términos probabilistas, es decir, incluyendo los intervalos de incertidumbre asociados a la acción sísmica y a los índices de vulnerabilidad.
- Comparar los resultados con escenarios sísmicos desarrollados hasta la fecha.

1.4 Metodología LM1_P

Las principales características del método LM1_P, que se desarrolla en el presente trabajo bajo un enfoque probabilista, son las siguientes: 1) el peligro sísmico se estima a través de un análisis

probabilista, y se expresa fundamentalmente, a través de frecuencias anuales de excedencia de intensidades macrosísmicas, que incluyen incertidumbres asociadas a los procedimientos utilizados para su cuantificación; 2) la vulnerabilidad sísmica de los edificios se estima a través de un análisis probabilista. Dicho análisis permite que la vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado sea representada en términos de funciones de densidad de probabilidad, que describen la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad tome determinados valores; 3) los resultados del daño esperado se expresan de forma probabilista, e incorporan las incertidumbres asociadas a la vulnerabilidad y a la intensidad sísmicas.

Por otra parte, se utiliza la metodología LM1_P para estimar el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona, de los cuales se dispone datos actualizados al año 2008. Al aplicar la metodología se obtienen curvas de frecuencia anual de excedencia del daño y de las pérdidas económicas.

La estimación del riesgo sísmico mediante la metodología probabilista LM1_P se ha organizado en los siguientes módulos: 1) peligrosidad sísmica, 2) vulnerabilidad sísmica y 3) daño sísmico esperado.

1. Peligrosidad sísmica. Con la finalidad de realizar la estimación probabilista de la peligrosidad sísmica en la metodología propuesta, se considera el uso del modelo probabilista bien conocido de Cornell-Esteva (McGuire, 2008; Esteva, 1970; Cornell, 1968), y para tal fin se han elegido usar los códigos de cómputo CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008) y CRISIS2007 (Ordaz et al, 2007). Dichas herramientas de cómputo permiten obtener las frecuencias de excedencia de diferentes parámetros de peligrosidad sísmica (aceleración máxima del terreno, intensidades macrosísmicas, etc.).
2. Vulnerabilidad sísmica. La estimación de la vulnerabilidad sísmica es el apartado de la metodología en la que se han hecho algunas de las contribuciones más importantes, que permiten distinguir la metodología LM1 con respecto a la metodología LM1_P propuesta en el presente trabajo. Además, con el propósito de sistematizar la estimación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios se han empleado fundamentalmente dos herramientas: a) Los códigos SIG (Sistemas de Información Geográfica), y b) El código de cómputo USERISK 2011, el cuál fue creado como parte del presente trabajo para ayudar en la sistematización de la metodología probabilista LM1_P.
3. Daño sísmico esperado. Mediante la metodología LM1_P se obtienen principalmente curvas de frecuencias anuales de excedencia de diferentes estados de daño sísmico, que permiten incorporar las incertidumbres en la acción sísmica y en la vulnerabilidad. La obtención de tales curvas de riesgo sísmico puede realizarse mediante el código USERISK 2011, el cual genera archivos de resultados que facilitan su representación mediante herramientas SIG.

1.5 Contenido de la memoria

En el capítulo 2 denominado Daño y Riesgo Sísmicos, se incluye una breve revisión de temas relacionados con el riesgo sísmico, los cuales son relevantes para el presente trabajo. Se hace especial énfasis en las metodologías existentes para emplear el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas.

La metodología probabilista LM1_P propuesta para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, se describe en el capítulo 3. Dicha metodología permite considerar un importante número de incertidumbres asociadas a la estimación de la vulnerabilidad y de la peligrosidad sísmica, y en consecuencia, al riesgo sísmico de edificios. La metodología propuesta permite obtener resultados de riesgo sísmico en términos de frecuencias anuales de excedencia de diferentes estados de daño. Adicionalmente, en el capítulo 3 se mencionan los principales conceptos usados en el presente trabajo, y se destacan las principales ventajas de la metodología LM1_P. Este capítulo también incluye una descripción detallada de los principales pasos de la metodología probabilista LM1_P.

En el capítulo 4 se describen las principales características de un código para ordenador denominado USERISK 2011, el cual se desarrolló para implementar los principales pasos de la metodología LM1_P que permiten estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. USERISK 2011 se ejecuta en plataforma Windows y facilita el proceso de estimación del daño sísmico esperado en edificios de zonas urbanas. Debido a que la cantidad de datos que usualmente se manejan en estudios de riesgo sísmico de zonas urbanas suele ser importante, USERISK 2011 está diseñado para leer archivos de datos generados en el formato estándar CSV (*Comma delimited*). Esto último permite que el manejo de los datos se pueda realizar mediante el empleo de muy diversas herramientas informáticas. Adicionalmente, los principales resultados generados por USERISK 2011, son almacenados en archivos que permiten que diferentes aspectos del riesgo sísmico puedan ser representados a través de diversos sistemas computacionales, incluyendo los sistemas de información geográfica.

En los capítulos 5, 6 y 7 se describen los principales procedimientos empleados para estimar el riesgo sísmico de Barcelona, mediante las directrices de la metodología LM1_P. Específicamente, en el capítulo 5 se describe el procedimiento usado para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona. Dicho procedimiento incluyó el uso del código CRISIS, el cual fue elegido para estimar la peligrosidad sísmica en el proyecto Risk-UE y también en la metodología LM1_P. Adicionalmente, los resultados obtenidos de la peligrosidad sísmica de Barcelona son comparados con resultados generados en estudios previos. Por otra parte, en el capítulo 6 se describen los principales pasos utilizados para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios en Barcelona, mediante la metodología probabilista LM1_P. En este mismo capítulo, los resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos son comparados con resultados estimados en estudios previos. Por otra parte, en el capítulo 7 se describen los principales resultados del riesgo sísmico

de los edificios de Barcelona, los cuales se obtienen al integrar la peligrosidad sísmica de Barcelona y la vulnerabilidad sísmica de sus edificios (capítulos 5 y 6). Los resultados obtenidos sobre el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona son comparados con resultados de estudios previos. Finalmente, en el capítulo 8 se mencionan las principales conclusiones del trabajo y las futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2: DAÑO Y RIESGO SÍSMICOS

Edificios

Los edificios son objetos diseñados y contruidos por el hombre, que tienen la función de ofrecer espacios en los que se pueda realizar en forma satisfactoria una o varias actividades. Sin embargo, los edificios son también bienes inmuebles, es decir, objetos que tienen un valor económico (Guimet, 2002). Por lo tanto, con frecuencia, durante las diversas etapas en la vida de los edificios (Figura 2-1) se toman decisiones de carácter económico.

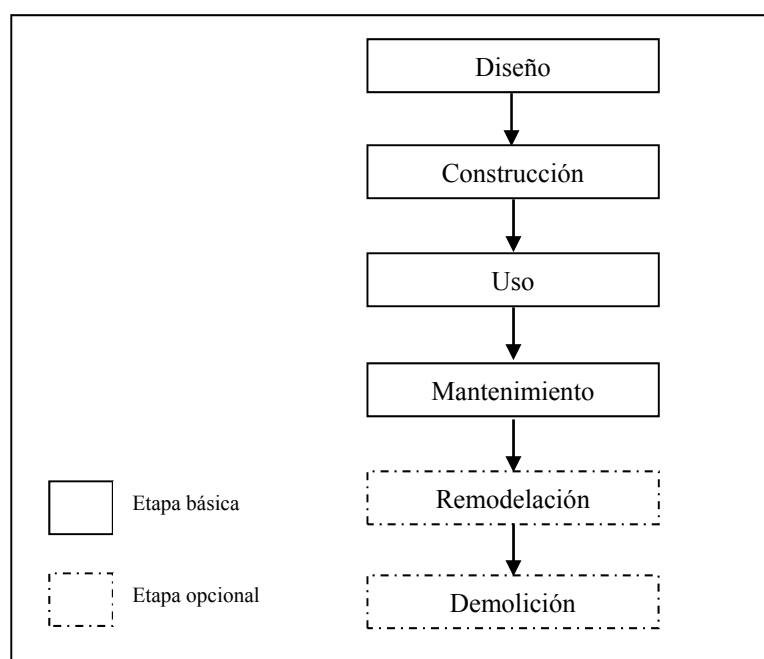


Figura 2-1. Principales etapas en la vida de los edificios.

Por otra parte, con el propósito de que los edificios cumplan con condiciones mínimas de seguridad y habitabilidad, los gobiernos suelen establecer códigos o normas en las que se indican los requisitos básicos que deben cumplir los edificios nuevos (IBC, 2009; NTC-08, 2008; CTE, 2006; RCDF, 2004). Tales normas suelen actualizarse con frecuencia para incluir nuevos requerimientos y nuevos conocimientos, sobre el diseño y la construcción de edificios.

En general, no hay periodos predeterminados para realizar actualizaciones de las normas de diseño de edificios, pero algunas de ellas se actualizan en periodos que suelen oscilar entre 5 y 10 años. De tal forma que si la mayoría de los edificios son diseñados para tener una vida útil de al menos 50 años, es posible concluir que la mayor parte de los edificios existentes no cumplen las normas más recientes que para diseño y construcción de edificios se han publicado. Por tal motivo, en algunos países, estados o ciudades, los gobiernos crean también normas para los edificios existentes (IEBC, 2009), las cuales difieren de las normas para los edificios que apenas se construirán (IBC, 2009). Por ejemplo, en el estado de Nueva York en Estados Unidos tienen vigente el Código para Edificios del Estado de Nueva York (BC-NY, 2007), el cual es aplicable a la construcción de nuevos edificios, y el Código para Edificios Existentes del Estado de Nueva York, el cual es aplicable cuando se realizan modificaciones en edificios existentes (EBC-NY, 2007). También hay códigos que señalan explícitamente, que son aplicables legalmente en el caso de que el propietario de un edificio desee mejorar voluntariamente, la capacidad sismorresistente de su edificio (CCP, 2009).

La imposibilidad de exigir que se apliquen las mismas normas de diseño y construcción a los edificios nuevos y a los edificios existentes, obedece principalmente a razones económicas. Es decir, desde el punto de vista técnico sería factible que un importante número de edificios existentes se modificara para cumplir con nuevas exigencias de diseño, pero con frecuencia no se dispone de los recursos económicos requeridos para hacerlo (Erdey, 2007).

Afectaciones en edificios

Los edificios están expuestos a diferentes acciones durante todas las etapas de su vida útil. Por lo tanto, uno de los objetivos durante la etapa de diseño de un edificio es identificar las acciones que deberá soportar tal edificio durante su vida útil, para posteriormente diseñarlo para que sea capaz de soportar en forma adecuada la presencia de tales acciones. En determinados casos ciertas acciones pueden afectar a los edificios de alguna de las siguientes maneras: a) impidiendo el funcionamiento normal del edificio; b) causándole daño físico al edificio o; c) generándole ambas afectaciones en diferentes magnitudes. Sin embargo, en cualquiera de estas situaciones suele haber una pérdida económica asociada.

El tipo de afectaciones que se puede permitir en un edificio se suele determinar en función de la importancia del edificio. Por ejemplo, los hospitales suelen ser considerados como edificios de gran importancia, en los cuales las afectaciones que pueden permitirse durante su vida útil son mínimas, porque se acepta que el funcionamiento de los hospitales no debe verse interrumpido en ningún caso. Por ello, en los reglamentos de diseño las exigencias suelen aumentar conforme sube el nivel de importancia del edificio (IBC, 2009; NCSE-02, 2002; RCDF, 2004).

2.1 Daño en edificios

2.1.1 Daño físico en edificios

Usualmente, los edificios sufren algún tipo de daño físico durante su vida. Sin embargo, son las características del daño físico las que determinarán el nivel de perjuicio o afectación que dicho daño causa a los usuarios, dueños e interesados en los edificios. El daño en los edificios puede clasificarse en función de la parte del edificio en la que ocurre el daño. Por ejemplo, con frecuencia se distingue entre daño estructural y daño no estructural. En el primer caso el daño se localiza en los elementos de la estructura (columnas, muros, etc.). Mientras que en el segundo caso el daño se localiza principalmente en cualquier elemento del edificio que no sea parte de la estructura (ventanas, muros no estructurales o de relleno, etc.).

2.1.2 Origen del daño físico en edificios

Un daño común en los edificios es el deterioro físico de los materiales de la estructura del edificio, debido al efecto que el medio ambiente genera sobre dichos materiales, durante el tiempo de existencia del edificio (Ashworth, 1996; 2004). Las características del daño físico que se puede presentar en un edificio suelen depender de varios factores. Algunos de estos factores se relacionan con las propias características del edificio (factores internos), y otros factores están asociados a determinadas características o elementos del medio que rodea al edificio (factores externos). Por ejemplo, algunos elementos o factores internos que influyen en las características del daño que se puede presentar en un edificio son: a) las características de la estructura del edificio (columnas, muros, etc.); b) la calidad y propiedades de los materiales del edificio y; c) la calidad en la mano de obra usada durante la construcción del edificio.

De manera semejante, los factores externos que pueden contribuir a generar daño en un edificio existente son, por ejemplo: a) el clima y las condiciones ambientales que afectan al edificio durante su vida; b) cambios en las condiciones del suelo donde el edificio se localiza; c) presencia de movimientos sísmicos del terreno y; d) presencia de lluvias y huracanes. Por otra parte, la mayoría de los factores externos que pueden contribuir a generar daño en un edificio pueden clasificarse a su vez en función de la frecuencia de ocurrencia como: 1) eventos frecuentes; 2) eventos poco frecuentes o raros; 3) eventos extraordinarios. También es posible realizar una clasificación del daño en función de la principal fuente que lo desencadena, por ejemplo: a) daño por sismo o daño sísmico; b) daño por inundación; c) daño por tsunami; d) daño por viento; e) daño por fuego y; f) daño por explosiones (FEMA 427, 2003).

El colapso es el nivel de daño físico más grave que puede sufrir un edificio ya que supone su destrucción. Tal nivel de daño suele ser producto de una combinación de condiciones adversas, en las que no siempre está presente alguna acción accidental (sismo, explosión, huracán, etc.). Por ejemplo, algunos edificios sufren colapso ante las solicitaciones de cargas gravitacionales, como fue el caso de un edificio estudiado por Palmisiano et al (2007). Conforme a dicho estudio la causa más probable del inesperado colapso de un edificio en la avenida Giotto en Foggia, Italia, fue la excepcional vulnerabilidad de las estructuras de hormigón armado del edificio, debida a las extremadamente pobres características mecánicas y físicas del hormigón, y a serios errores de diseño y construcción. Además se determinó que dicho edificio colapsó sólo 30 años después de su construcción, y sin evidentes signos premonitorios, y sin la ocurrencia de alguna acción accidental (Palmisiano et al, 2007).

Otro caso similar ocurrió en Turquía, donde colapsó totalmente y súbitamente, el edificio de apartamentos de Zumurt. En este caso se determinó que las causas más probables del colapso de dicho edificio fueron las deficientes consideraciones, y errores hechos durante la etapa de diseño y los errores cometidos durante la construcción (Kaltakci et al, 2007). Estos últimos errores, fueron principalmente, el uso de miembros de dimensiones menores a los especificados en los planos, el empleo de materiales improprios como hormigón de pobre calidad, y el uso de inadecuados espaciamientos y detallados del refuerzo del hormigón.

Los estudios de Palmisiano et al (2007), y de Kaltakci et al (2007), coinciden en que la causa más probable del colapso de los edificios que estudiaron, fue la combinación de diversos factores. En ambos casos se habla de causas más probables del colapso, porque se reconoce que hay incertidumbres en la determinación precisa de dichas causas.

2.1.3 Cuantificación del daño físico en edificios

Para describir el nivel de daño físico en edificios con frecuencia se emplean estados de daño. El empleo de tales estados de daño facilita en gran medida el proceso de estimación y cuantificación del daño físico que puede presentarse en los edificios. Por ejemplo, en la Tabla 2-1 se muestra una escala que emplea estados de daño para cuantificar daño físico. En este caso, tales estados están asociados al daño que es generado por huracanes en edificios residenciales. De manera similar, en la Tabla 1-2 es posible observar otra escala de daño, pero en este caso la utilizada para describir la magnitud del daño físico generado por sismos en edificios. Mientras que en la Tabla 2-2 se muestra una de las escalas de daño, utilizada para describir el nivel de daño físico generado por inundaciones en edificios.

Tabla 2-1. Estados de daño debido a viento o huracanes en construcciones tipo residencial (FEMA, 2009b; Vickery et al, 2006).

Estado de daño	Descripción de daño cualitativo	Falla en la cubierta del techo	Fallas en puertas y ventanas	Caída del techo	Impacto de proyectiles sobre los muros	Falla en la estructura del techo	Falla en los muros de la estructura
0	Daño ligero o no visible desde el exterior. Sin ventanas rotas, o fallas en cubiertas del techo. Pérdida mínima del acabado de azotea, con poca o nula penetración de agua.	Menor o igual al 2% de la superficie total de la cubierta.	No	No	No	No	No
1	Máximo de una ventana rota, puerta o puerta del garaje. Moderada pérdida del acabado del techo que puede ser cubierta para prevenir entrada adicional de agua en el edificio. Marcas o abolladuras en los muros que requieren de pintura o resane para su reparación.	Entre el 2% y el 15%.	Falla en una ventana, puerta, o puerta de garaje.	No	Menos de 5 impactos.	No	No
2	Daño importante del acabado de azotea, rompimiento moderado de ventanas. Falta de cubierta de azotea de menor importancia. Algún daño en el interior del edificio debido al agua.	Entre el 15% y el 50%.	En más de uno y en menos de 3 ó del 20% de las puertas y ventanas.	Entre 1 a 3 paneles	Típicamente, entre 5 a 10 impactos.	No	No
3	Daño importante en ventanas o pérdida de cubierta de azotea. Pérdida importante del acabado de azotea. Daño grande en el interior debido a agua.	Más del 50%.	Más de 3 ó del 20% de las puertas y ventanas, pero menos del 50% de las puertas y ventanas.	Más de 3 y menos del 25 % del techo.	Típicamente, entre 10 a 20 impactos.	No	No
4	Falla completa de la cubierta y/o falla de los muros del marco. Pérdida de más del 50 % de la cubierta de azotea.	Típicamente, más del 50%.	Más del 50% de las puertas y ventanas.	Más del 25% del techo.	Típicamente, más de 20 impactos.	Si	Si

Tabla 2-2. Estados de daño en edificios debido a inundación considerados en el modelo HAZUS (FEMA, 2009c).

Estado de daño	Porcentaje de daño
Ligero	1-10
Moderado	11-50
Substancial	51-100

2.1.4 Pérdidas económicas por daño físico en edificios

En general, cualquier daño físico en edificios tiene asociada una pérdida económica, la cual suele deberse al costo de reparación del daño físico y al costo de la interrupción de las actividades productivas o comerciales que se desarrollaban normalmente en los edificios. Por otra parte, expresar el daño físico en edificios en términos de unidades monetarias, facilita la toma de decisiones relacionadas con dicho daño (Kleindorfer et al, 2005; ATC-58-1, 2002).

Para fines de identificación se suele distinguir entre diferentes tipos de pérdidas económicas. Así, por ejemplo, la pérdida económica asociada al costo de reparación del daño físico que se ha presentado en un edificio, se suele identificar como pérdida económica directa. Mientras que una pérdida económica indirecta puede corresponder a las pérdidas asociadas a la interrupción de las actividades productivas o comerciales que se desarrollaban normalmente en un edificio.

2.2 Daño sísmico

2.2.1 Daño sísmico en edificios

En general, las palabras sismo o seísmo, terremoto y temblor son usadas como sinónimos, y provienen del griego *σεισμός* – sacudida; del latín *terraemōtus* - movimiento de tierra; y del latín *tremulāre* – sacudirse, respectivamente. Por otra parte, para fines de ingeniería se usan definiciones como las siguientes: “sismo es una sacudida de la Tierra que tiene origen tectónico o volcánico” (Aki y Lee, 2003), y “Un sismo es el fenómeno entero de la ruptura de una falla que libera energía de deformación almacenada en la corteza de la Tierra, y de la propagación de la energía desde la fuente en forma de ondas vibratorias en todas direcciones” (McGuire, 2004).

Por otra parte, el concepto de daño sísmico en edificios se refiere al daño físico que se produce en edificios durante la ocurrencia de determinados sismos. Además, el daño sísmico suele clasificarse en daño sísmico directo y daño sísmico indirecto. Un ejemplo de daño sísmico directo son los cristales rotos de una ventana de un edificio, siempre que el daño en dicha ventana se haya producido durante la ocurrencia del sismo. Mientras que el fuego en un edificio que se inicia debido al daño generado por un

sismo, es un caso de daño sísmico indirecto, el cual en ocasiones puede ser de grandes dimensiones (Kircher et al, 2006). También, es posible distinguir entre daño sísmico estructural y daño sísmico no estructural (FEMA 74, 1994), sin embargo, es importante destacar que la clasificación del daño en estos dos grandes grupos, es de carácter ingenieril, y no es consistente con los intereses de los propietarios o aseguradores. Para ellos, los dos grupos de interés son: 1) la estructura y el resto de los sistemas del edificio, los cuales suelen ser responsabilidad del propietario del edificio y; 2) los contenidos de los edificios, los cuales son típicamente la responsabilidad del ocupante o inquilino del edificio (ATC-69, 2008).

A menos que se establezca algo diferente, cuando en el presente trabajo se mencione daño sísmico, se estará refiriéndose al daño físico directo, que es originado en los edificios, durante la ocurrencia de un sismo.

2.2.2 Origen del daño sísmico en edificios

Todos los edificios soportan cargas estáticas, porque al menos soportan su peso propio. Sin embargo, en ocasiones los edificios deben soportar también solicitaciones dinámicas importantes. Por tal razón, se han definido diversos conceptos que facilitan el estudio del efecto que pueden generar las solicitaciones dinámicas sobre los edificios. Uno de dichos conceptos se denomina respuesta sísmica de un edificio y corresponde al comportamiento de un edificio que es movido desde la base por un movimiento sísmico del terreno. Dicha respuesta sísmica depende en gran medida de las características del edificio y del movimiento sísmico del terreno (Jennings, 2003; Chopra, 1995); a su vez las particularidades de la respuesta sísmica determinarán en gran medida las características del daño sísmico que se puede presentar en el edificio.

2.2.3 Cuantificación del daño sísmico

Dos variables importantes que influyen en la determinación del nivel de detalle con que se describen los daños en un edificio, ocasionados por un sismo, son el tiempo disponible para identificar los daños y el propósito de la identificación de los daños. Por ejemplo, después de la ocurrencia de un sismo importante suele ser necesario evaluar si hay edificios que presenten algún nivel de daño, que reduzca la seguridad estructural del edificio a niveles tales que impidan que pueda seguirse ocupando (ATC-20-1, 2005; Carreño et al, 2005; Anagnostopoulos y Moretti, 2008a y 2008b). En estos casos, es necesario evaluar daños en poco tiempo y frecuentemente a partir de una inspección visual de pocos minutos.

Por otra parte, la estimación del daño que han generado sismos en edificios suele realizarse mediante diferentes procedimientos, lo cual dificulta el uso de dicha información para realizar análisis estadísticos

del daño sísmico en edificios. Por ello, en años recientes se han hecho propuestas para uniformizar el proceso para identificar y registrar los daños sísmicos, que se han presentado en edificios (EERI, 2003; 1996).

2.2.4 Pérdidas sísmicas

El concepto de pérdidas sísmicas suele emplearse para indicar pérdidas económicas asociadas a los daños sísmicos directos, indirectos o ambos. Además, las pérdidas sísmicas pueden referirse al daño sísmico de un edificio o de muchos edificios, e incluso pueden estar asociadas a la totalidad del daño generado por un sismo en una ciudad, estado o país. Las pérdidas sísmicas pueden ser muy importantes incluso en sismos de magnitud moderada. Por ejemplo, las pérdidas totales generadas por el sismo de Northridge de 1994, excluyendo efectos indirectos, ascendieron a más de 40 mil millones de dólares (Eguchi et al, 1998), cantidad que superó en forma significativa las pérdidas asociadas a otros sismos importantes de California (Figura 2-2). Tales pérdidas fueron también cerca de la mitad de las pérdidas económicas que generó el huracán Katrina en 2005 (Kunreuther y Pauly, 2006), el cual es considerado como el desastre natural que ha generado las mayores pérdidas en la historia de Estados Unidos (Viscusi, 2006). En el caso de las pérdidas de Northridge las mismas produjeron un perjuicio significativo en el sistema internacional de seguros, porque tales pérdidas superaron en mucho las previsiones hechas.

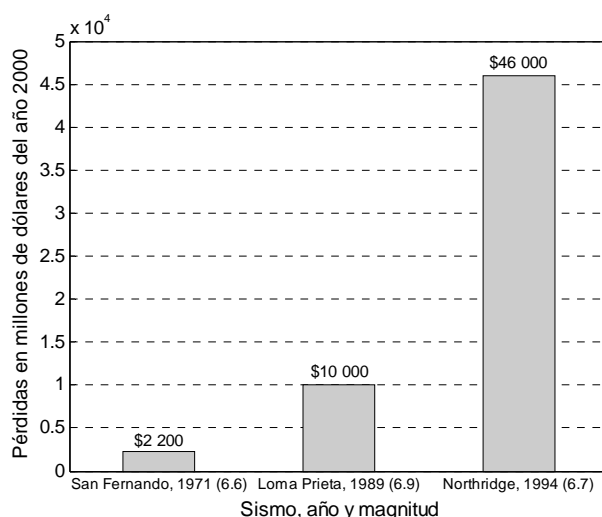


Figura 2-2. Sismos que han generado las mayores pérdidas reportadas en California, USA, en el periodo 1970-2000 (Rowshandel et al, 2007).

Por otra parte, es importante destacar que a pesar del gran tamaño de las pérdidas en Northridge, el número de víctimas mortales fue relativamente pequeño. Esta última afirmación se apoya en el hecho de que las 58 muertes atribuidas al sismo de Northridge, fue una cantidad similar a las atribuidas al sismo de

San Fernando y al sismo de Loma Prieta (Figura 2-3). Adicionalmente, se reportó que del total de muertes debidas a Northridge, únicamente 22 fueron causadas por fallas estructurales de los edificios (Todd et al, 1994).

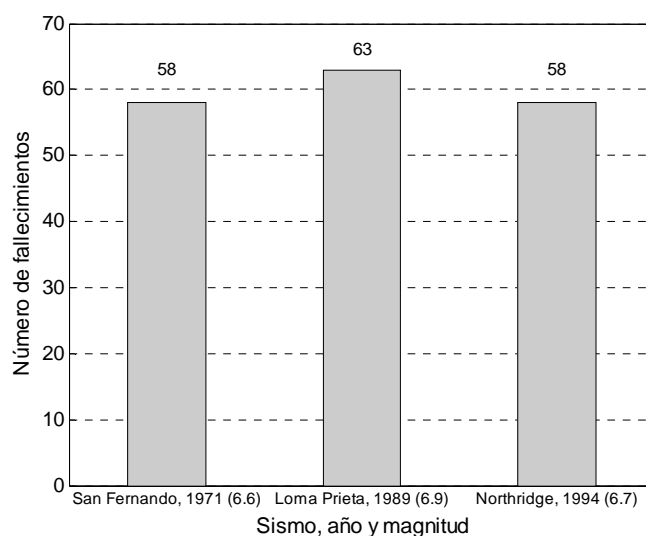


Figura 2-3. Número de fallecimientos en importantes sismos de California (Todd et al, 1994; Utsu, 2002).

El sismo de Northridge confirmó la importancia de generar nuevo conocimiento sobre el comportamiento sísmico de edificios, que permitiese tener edificios capaces de soportar sismos de magnitud moderada como el de Northridge, sin sufrir colapso ni daño físico excesivo (Todd et al, 1994).

2.3 Riesgo

El concepto de riesgo se usa en diferentes aspectos de la vida moderna. Sin embargo, en general, la gente suele estar más familiarizada con ciertos tipos de riesgo. Por ejemplo, actualmente muchas personas en el mundo tenemos nociones sobre el riesgo relacionado a fumar y entonces, entendemos la afirmación: si fumas más de un paquete de cigarrillos cada día durante varios años, entonces, tienes un alto riesgo de desarrollar cáncer de pulmón. Esta última aseveración también significa que si eres un fumador habitual, entonces, la probabilidad de que desarrolles cáncer de pulmón es alta. Dicha aseveración está basada en diferentes estudios que se han realizado desde hace varias décadas (Bach, 2009; Wynder y Graham, 1950). Otros estudios ofrecen valores comparativos con la finalidad de facilitar la comprensión del nivel de riesgo. Por ejemplo, Weinstein et al (2005) señalan que el riesgo de un fumador de desarrollar cáncer de pulmón puede ser entre 10 y 22 veces mayor que el que tiene un no fumador.

Algunas definiciones del riesgo son las siguientes:

- Riesgo es la probabilidad de sufrir una pérdida debida a un evento peligroso (FEMA 366, 2000).

- Riesgo se define como el potencial de consecuencias negativas de eventos peligrosos que pueden ocurrir en una específica unidad de área y en un determinado período de tiempo (Giovinazzi, 2005).

En la Figura 2-4 se muestra la frecuencia anual de que una persona muera debido a tres causas: 1) que la persona fume más de 10 cigarros al día; 2) que la persona viva en Irán y ocurra un sismo y; 3) que la persona viva en California y ocurra un sismo. Es importante destacar que las frecuencias indicadas en la Figura 2-4 deben considerarse como estimaciones que tienen asociadas muchas incertidumbres, y que además no son estimaciones recientes. Por lo tanto, en el presente trabajo dicha información se incluye únicamente con la finalidad de mostrar un ejemplo de los términos en que es posible expresar el riesgo (Coburn y Spence, 2002).

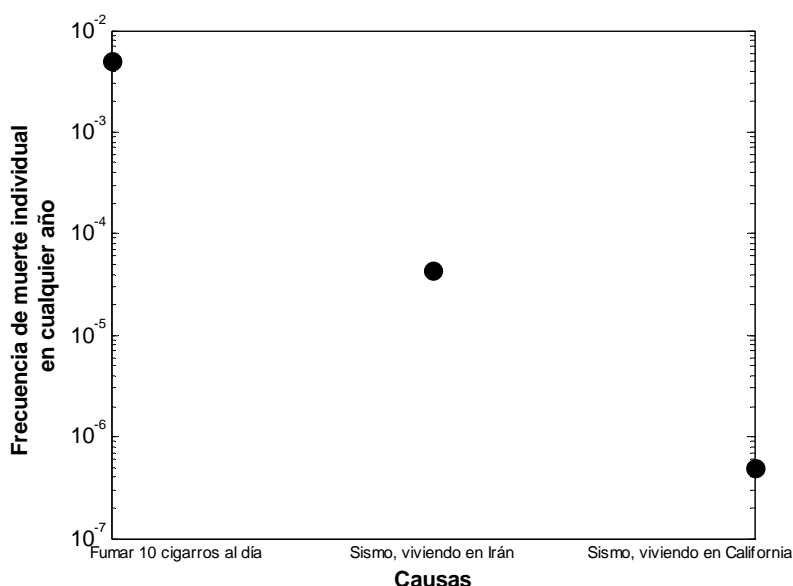


Figura 2-4. Frecuencia de muerte individual en cualquier año debido a diferentes causas (Coburn y Spence, 2002).

Por otra parte, las estimaciones de muertes probables asociadas a la ocurrencia de sismos, involucran muchas variables entre las que destacan el número de edificios que se han colapsado en sismos previos, y el número de edificios que se estima pueden colapsarse en futuros sismos. En relación a este tema se ha estimado que en el siglo XX, cerca del 75% de las muertes de personas atribuidas a sismos, fueron causadas por el colapso de edificios (Coburn y Spence, 2002).

2.3.1 Riesgo de daño físico

El riesgo de daño físico de un edificio, es la probabilidad de que se alcance o exceda un determinado nivel de daño físico en dicho edificio, debido a la posible ocurrencia de eventos peligrosos durante un

periodo específico. El riesgo de un edificio de sufrir daño físico puede deberse a diferentes causas externas. Por ejemplo, un edificio localizado en Colima, México, tiene cierto nivel de riesgo sísmico pero también tiene determinado nivel de riesgo por huracán. Es decir, dicho edificio tiene posibilidades de sufrir anualmente un nivel de daño físico determinado, ante la ocurrencia de un huracán, y tendrá también determinada posibilidad de sufrir anualmente un nivel de daño físico específico, debido a la ocurrencia de un sismo. Por otra parte, es común que el riesgo de daño físico en edificios se exprese en términos de frecuencias de excedencia de estados de daño físico (FEMA, 2009b).

2.3.2 Origen del riesgo de daño físico

El riesgo de daño físico de un edificio surge en la intersección de la vulnerabilidad del edificio, y el peligro en el sitio donde se localiza el edificio (Figura 2-5). Es decir, el riesgo de daño físico de un edificio, es función de la vulnerabilidad del edificio ante el tipo de evento peligroso que puede ocurrir, y de la posibilidad de que ocurra un evento peligroso (huracán, sismo, etc.). Adicionalmente, se puede afirmar que cada edificio tiene diferentes niveles de riesgo de sufrir daño físico, porque cada edificio tiene sus propias características, y además se localiza en un lugar que tiene condiciones particulares.

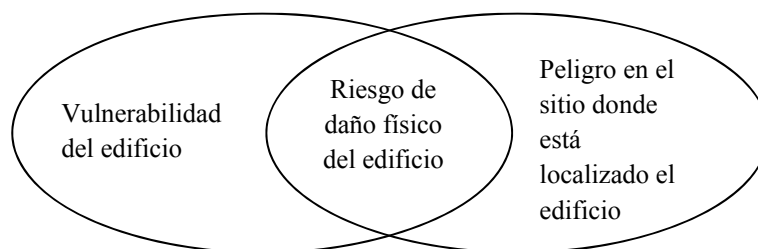


Figura 2-5. Elementos que generan el riesgo de daño físico en edificios.

2.3.3 Riesgo sísmico de edificios

De acuerdo a Bertero y Bozorgnia (2004) el EERI estableció en 1984 que el riesgo sísmico es: “la probabilidad de que consecuencias sociales o económicas debidas a sismos igualen o excedan valores específicos en un sitio, en varios sitios o en un área durante un tiempo de exposición determinado.” De manera similar es posible establecer la siguiente definición: “El riesgo sísmico de un edificio es la probabilidad de que se iguale o exceda en dicho edificio, algún nivel de daño o pérdida debida a sismos durante un tiempo de exposición determinado”. Definición que ha sido adoptada para el presente trabajo. En otras palabras, el riesgo sísmico de un edificio indica los daños o pérdidas sísmicos que pueden generarse en el edificio, en un intervalo de tiempo determinado. Dicho riesgo se expresa en diferentes maneras, sin embargo, algunas de las formas más comunes de expresar el riesgo sísmico son las

siguientes: 1) curvas de frecuencias anuales de excedencia de daño o pérdidas (Figura 2-6), y; 2) mapas de daño o pérdidas sísmicos (Figura 2-7).

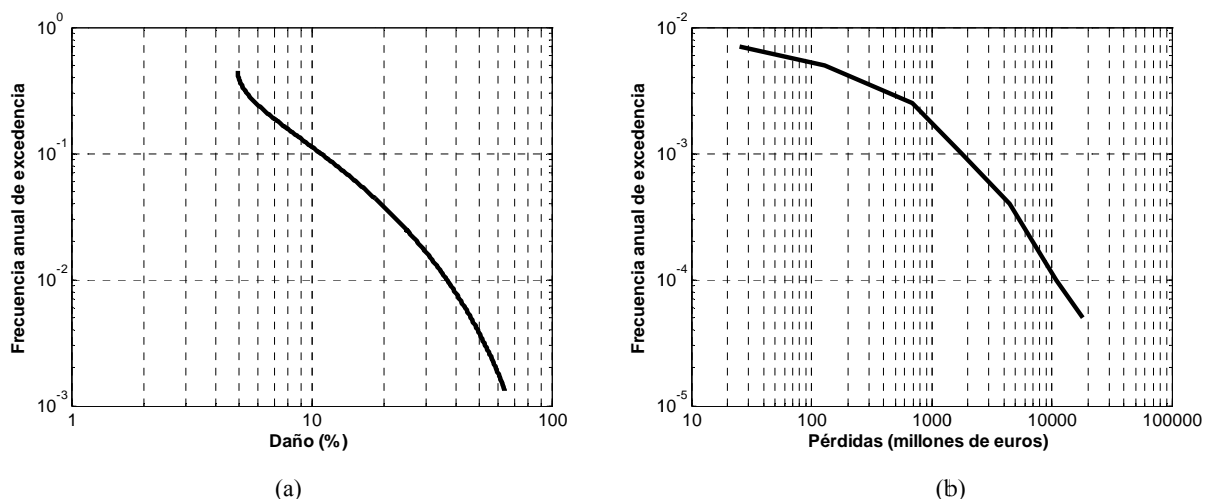


Figura 2-6. (a) Curva de riesgo sísmico de un edificio de mampostería no reforzada con muros de carga, y de baja altura (ATC-13, 1985), localizado en la prefectura de Tokio, Japón (Ishii et al, 2007); (b) Curva de riesgo sísmico de la ciudad de Cologne, Alemania (Grünthal et al, 2006).

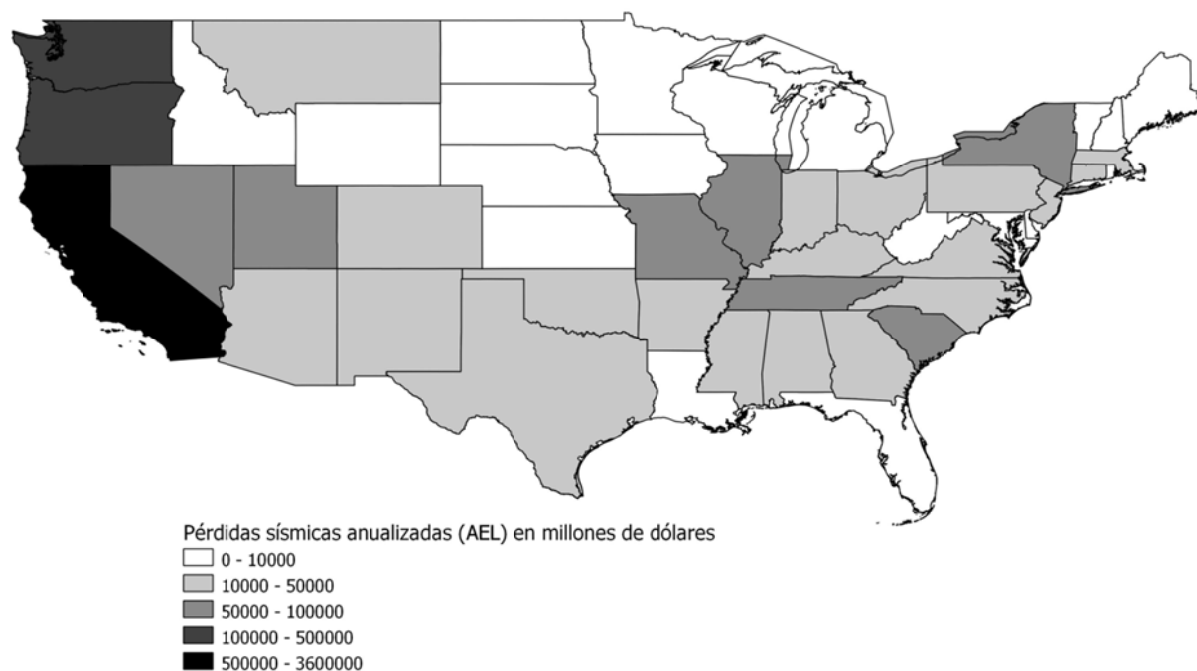


Figura 2-7. Mapa de pérdidas sísmicas anualizadas en millones de dólares de Estados Unidos (excepto Alaska y Hawaii), por estado (FEMA-366, 2008).

2.3.4 Origen del riesgo sísmico

El riesgo sísmico de un edificio ocurre en la intersección de la vulnerabilidad sísmica del edificio, y el peligro sísmico del sitio donde se localiza el edificio (Figura 2-5), es decir, el riesgo sísmico es función de

la vulnerabilidad sísmica del edificio, y de la posibilidad de que ocurran sismos. De manera que si la vulnerabilidad sísmica del edificio o el peligro sísmico del sitio son iguales a cero, entonces, el riesgo sísmico del edificio también es cero. Sin embargo, en el primer caso sería necesario que el edificio fuese 100% resistente a sismos, lo cual en función del conocimiento disponible para diseñar y construir edificios aún no es posible. En el segundo caso significaría que en el sitio no hay ninguna posibilidad de que ocurra un movimiento sísmico del terreno, lo cual en sentido estricto tampoco es posible afirmar. Por lo tanto, desde este enfoque, es posible concluir que la totalidad de los edificios existentes en el mundo tienen algún nivel de riesgo sísmico.

2.3.5 Importancia de los estudios de riesgo sísmico

De acuerdo con datos de la ONU en 2006 la mitad de la población mundial vivía en ciudades, mientras que para el año 2030, tres de cada cinco personas en el mundo muy probablemente residirán en centros urbanos (UN-DESA, 2007; 2006). Adicionalmente, en la Figura 2-8 se puede observar el crecimiento que han experimentado las poblaciones rurales y urbanas en las últimas décadas, y la estimación del aumento de las mismas para los próximos años. De manera que, dado que las poblaciones urbanas seguirán aumentando, es necesario mejorar la gestión del riesgo en las zonas urbanas, para evitar que sigan ocurriendo desastres como los generados durante la ocurrencia del sismo del 12 de enero de 2010 en Haití (USGS/EERI, 2010), del sismo del 27 de febrero de 2010 en Chile (Bray y Frost, 2010), y del sismo del 11 de marzo de 2011 en Japón (USGS, 2011).

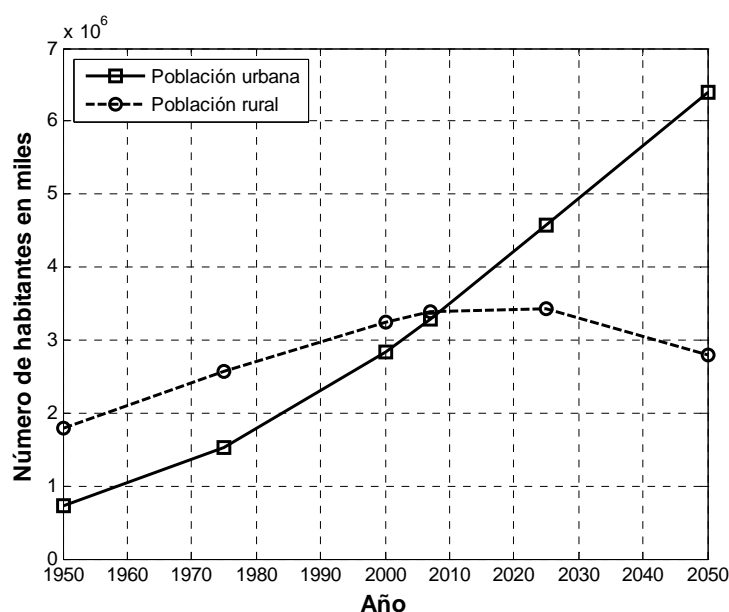


Figura 2-8. Crecimiento de las poblaciones urbanas y rurales en el mundo, y crecimiento estimado de dichas poblaciones para las próximas décadas (UN-DESA, 2007; 2006).

De acuerdo con un documento del National Research Council (1989), algunos de los más importantes objetivos por los que se realizan estimaciones de pérdidas sísmicas son los siguientes:

- Identificar las áreas geográficas especialmente peligrosas;
- Identificar grupos de edificios u otro tipo de estructuras especialmente peligrosos;
- Ayudar en el desarrollo de planes de atención de la emergencia;
- Evaluar el impacto económico global;
- Ayudar en el cálculo de estimaciones rápidas del impacto aproximado de un sismo cuando apenas han transcurrido pocas horas desde que ocurrió el sismo;
- Estimar las consecuencias esperadas de un sismo previsto.

Además, en el documento del National Research Council, se reconoce que la estimación de las pérdidas sísmicas potenciales es una tarea esencial para estimular y guiar, las acciones de mitigación del riesgo asociado a la ocurrencia de sismos (National Research Council, 1989).

2.4 Estimación del riesgo

La estimación del riesgo se puede realizar mediante diferentes metodologías. Por ejemplo, en el caso de riesgos en los que hay importante número de datos, se emplean con mayor frecuencia los métodos estadísticos. Esto último se debe al hecho de que las estimaciones estadísticas que se basan en importante número de datos representativos y confiables, suelen tener un alto nivel de confianza. Por citar un caso, en la estimación del riesgo que tienen las personas de sufrir ciertos tipos de enfermedades, se emplea con mucha frecuencia los métodos estadísticos. Esto último es posible porque para determinadas afecciones hay un número importante de datos, que permiten hacer estimaciones estadísticas del riesgo asociado a dichas afecciones. Esto ocurre, por ejemplo, en estimaciones del riesgo que tienen los fumadores de desarrollar cáncer de pulmón (Bach et al, 2003).

2.4.1 Estimación del riesgo de daño físico en edificios

La evaluación del riesgo combina información sobre un peligro físico, con información sobre vulnerabilidad y valor económico, para determinar los probables impactos de un evento peligroso (National Research Council, 1994). En el caso de la estimación del riesgo de daño físico en edificios, se emplean diferentes tipos de modelos, los cuales dependen en gran medida de los datos disponibles, y del nivel de conocimiento del tipo de riesgo por analizar. En los últimos lustros se han realizado esfuerzos importantes para mejorar los procesos de estimación del riesgo de daño físico en edificios, asociado a la ocurrencia de fenómenos naturales como los sismos, huracanes e inundaciones (Mouroux y Le Brun, 2006; FEMA 433, 2004).

Por otra parte, es importante destacar que una adecuada identificación de las características del edificio y del sitio en el que se localiza, es fundamental para obtener una razonable estimación del nivel de riesgo, que tendrá dicho edificio de sufrir algún tipo de daño físico.

2.4.2 Estimación del riesgo sísmico de edificios

Es ampliamente aceptado que en los principales elementos requeridos para estimar el riesgo sísmico de edificios hay importantes incertidumbres epistémicas y aleatorias, por lo tanto, cualquier estudio de riesgo sísmico, implica necesariamente incertidumbres importantes (Ellingwood, 2007; Crowley et al, 2005; Mahdyar y Porter, 2005; McGuire, 2004; Grossi et al, 1998). Por otra parte, el tipo de estudio de riesgo sísmico que se puede realizar depende de diversos factores, sin embargo, los más relevantes son los siguientes:

- 1) El objetivo del estudio de riesgo sísmico, es decir, contestar ¿Para qué se quiere estimar el riesgo sísmico del edificio o de los edificios?
- 2) El número de edificios que se quiere evaluar;
- 3) Los recursos económicos disponibles para realizar la evaluación;
- 4) El tiempo disponible para ejecutar la evaluación;
- 5) Los datos disponibles para realizar la evaluación.

Existen diversos tipos de estudios de riesgo sísmico de edificios, los cuales se distinguen por haber sido diseñados para aplicarse después de la ocurrencia de un sismo importante (*ex post*) o antes de la ocurrencia de sismos (*ex ante*). En la Tabla 2-3 se incluyen algunas de las características que distinguen a estos tipos de procedimientos. Por ejemplo, en años recientes se han desarrollado diversas metodologías *ex post* y herramientas para ordenador que tienen la finalidad de ayudar a determinar si los edificios pueden volver a ocuparse después de que ha ocurrido un sismo importante (Anagnostopoulos y Moretti, 2008a; 2008b; Baggio et al, 2007; Carreño et al, 2007b; ATC-20-1, 2005; Anagnostopoulos, 1996). De manera que mediante dichas metodologías se determina en forma simplificada el nivel de riesgo sísmico de cada edificio, y en función de dicho nivel se decide si es un riesgo sísmico aceptable para que pueda volver a ocuparse el edificio. En relación a las metodologías *ex ante* es posible observar que algunas de ellas tienen como principal objetivo el identificar, inventariar y clasificar a grupos de edificios que pueden tener un importante nivel de riesgo sísmico (FEMA 154, 2002; NZSEE, 2006).

Las metodologías *ex ante* que tienen la finalidad de estimar escenarios de riesgo sísmico pueden representarse mediante esquemas como el de la Figura 2-9, que en este caso corresponde a la metodología LM1 de Risk-UE. De acuerdo con esta metodología los principales pasos que se deben realizar para

estimar un escenario de riesgo sísmico de un grupo de edificios de una zona urbana, son los siguientes: 1) estimar un escenario sísmico expresado en términos de un grado de intensidad EMS-98; 2) estimar la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, la cual se expresará en términos de un índice de vulnerabilidad total; 3) emplear la función de daño propuesta para usarse en el método LM1; 4) estimar el grado de daño medio y la distribución completa de los diferentes estados de daño, mediante el empleo de la función de daño propuesta en el método LM1, a partir del escenario sísmico obtenido en el paso 1, y de la vulnerabilidad sísmica obtenida en el paso 2. Los resultados de daño sísmico estarán asociados al periodo de retorno del escenario sísmico estimado, que en el método LM1 se recomienda sea de 475 años (10% de probabilidad de que sea excedido en 50 años).

Tabla 2-3. Características de procedimientos *ex ante* y *ex post* para estimar el riesgo sísmico de edificios (Anagnostopoulos y Moretti, 2008a; 2008b; Baggio et al, 2007; Carreño et al, 2007b; NZSEE, 2006; ATC-20-1, 2005; FEMA 154, 2002; Anagnostopoulos, 1996).

Tipo de procedimiento.	Etapas de la vida del edificio en que se prevé aplicar el procedimiento.	Ejemplo del tipo de estimación del riesgo sísmico.	Ejemplos de los términos en que se expresa el riesgo sísmico estimado.	Ejemplos de los usos de los resultados de riesgo sísmico.
<i>Ex ante.</i>	En cualquier momento de la etapa normal de servicio del edificio.	-Se realiza una estimación simplificada del riesgo sísmico, basada principalmente en una inspección visual rápida del edificio.	-El riesgo sísmico se expresa mediante una puntuación final del edificio. Dicha puntuación es el resultado de realizar una estimación simplificada, de la probabilidad de que el edificio pueda colapsar, si ocurre el sismo máximo considerado.	-Establecer si es necesaria o no una evaluación más detallada de la vulnerabilidad y riesgo sísmico del edificio. -Generar mapas de vulnerabilidad sísmica de las ciudades.
		-Se realiza una estimación simplificada del riesgo sísmico, basada principalmente en datos básicos de los edificios.	-El riesgo sísmico se expresa mediante probabilidades de ocurrencia de diferentes estados de daño asociadas a la ocurrencia de un evento sísmico específico.	-Estimar escenarios de riesgo sísmico de zonas urbanas que faciliten la labor de los encargados de gestionar el riesgo de las zonas urbanas. -Estimar mapas de vulnerabilidad sísmica de las ciudades.
<i>Ex post.</i>	Pocas horas o días después de la ocurrencia de un sismo potencialmente dañino.	-Estimación simplificada en función del daño observado en inspección visual del edificio.	-Determinación cualitativa del riesgo estructural en términos de variables lingüísticas (v.g., riesgo alto o riesgo bajo).	-Determinar, si el edificio puede ocuparse nuevamente o si requiere una evaluación más detallada antes de que pueda usarse nuevamente, o si es necesaria una reparación antes de que pueda ser usado de nuevo, o si es un edificio inutilizable (no puede repararse).

Por otra parte, para estimar el daño sísmico anualizado es posible emplear los pasos indicados en la Figura 2-10, donde en el primer paso se realiza una estimación probabilista del peligro sísmico que puede presentarse en el sitio, donde el edificio se localiza. Dicho peligro corresponde a una descripción

probabilista (una frecuencia de excedencia) de un parámetro sísmico, como los grados de intensidad macrosísmica (McGuire, 2004). En el segundo paso se estima la vulnerabilidad sísmica del edificio o su capacidad sismorresistente. En el tercer paso se estiman probabilidades de que se origine un nivel de daño sísmico determinado, en edificios con diferentes niveles de vulnerabilidad, durante la ocurrencia de movimientos sísmicos del terreno. En el cuarto paso se trasladan la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad sísmica en riesgos sísmicos (frecuencias de daño) mediante el empleo de funciones de daño.

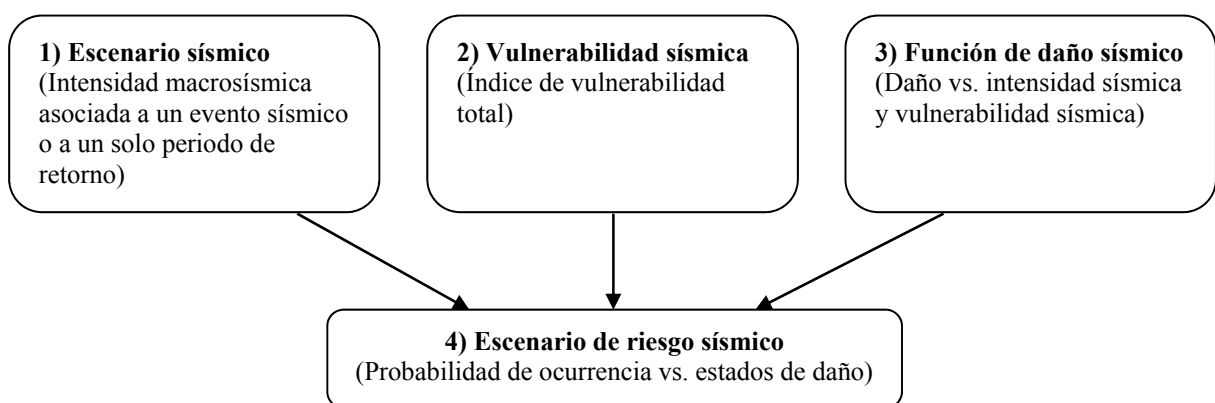


Figura 2-9. Principales pasos en la estimación de escenarios de riesgo sísmico de edificios mediante el método LM1 de Risk-UE.

Debido a que el presente trabajo hace énfasis en las estimaciones de riesgo sísmico en términos de frecuencias anuales de excedencia del daño sísmico o de las pérdidas sísmicas, enseguida se incluyen conceptos importantes relacionados con el enfoque probabilista que permite hacer ese tipo de estimaciones del riesgo sísmico.

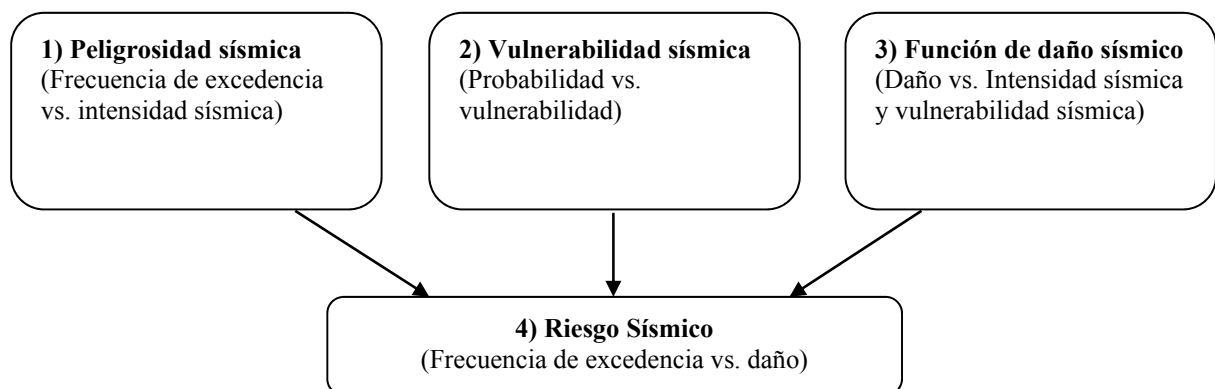


Figura 2-10. Principales pasos en la estimación del riesgo sísmico de edificios en términos de frecuencias de excedencia del daño (adaptado de McGuire, 2004).

Peligro sísmico

El concepto de peligro sísmico suele emplearse en las dos acepciones siguientes:

- 1) El peligro sísmico es cualquier fenómeno físico asociado con un sismo (v.g., movimiento del terreno, falla del terreno, licuefacción y tsunami), y sus efectos sobre el uso del suelo, las estructuras hechas por el hombre, y los sistemas socioeconómicos, que tienen el potencial de producir una pérdida (Aki y Lee, 2003). De manera similar McGuire (2004) define el peligro sísmico como “una propiedad de un sismo que puede causar daño o pérdida. Ejemplos son la amplitud del movimiento sísmico en cierto intervalo, las olas inducidas por un tsunami que alcanzan cierta elevación en un puerto”.
- 2) El peligro sísmico indica la probabilidad de que ocurra un nivel determinado de movimiento sísmico del terreno, en un punto específico, dentro de cierto periodo de tiempo (Aki y Lee, 2003; Thenhaus y Campbell, 2003). En este caso, el peligro sísmico suele ser calculado como la frecuencia (número de veces por unidad de tiempo), en que una amplitud del movimiento sísmico del terreno será mayor que un valor especificado (McGuire, 2004).

En el presente trabajo se empleará esencialmente la segunda acepción del peligro sísmico. La Figura 2-11 muestra a manera de ejemplo curvas de peligro sísmico en términos de la frecuencia anual de excedencia de la aceleración máxima del terreno, de las ciudades de Los Ángeles en California (USA), y de Colima (México).

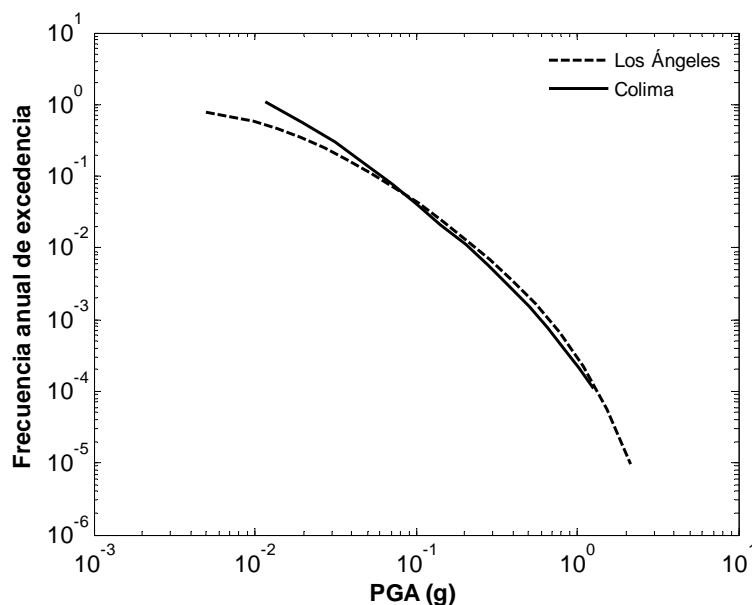


Figura 2-11. Curvas de peligro sísmico de las ciudades de Los Ángeles, California (USA), y Colima (México), en términos de la frecuencia anual de excedencia de la aceleración máxima del terreno (USGS, 2002; Ordaz et al, 1996).

Vulnerabilidad sísmica

Debido a las diferentes formas en que se considera la vulnerabilidad sísmica, es posible identificar que en ocasiones se usa el término de funciones de vulnerabilidad, o curvas de vulnerabilidad, para referirse a relaciones de algún parámetro que represente las características de la acción sísmica (PGA, etc.) con el daño sísmico (Khater et al, 2003; Porter, 2003), mientras que en otros casos las mismas relaciones se identifican como funciones de daño (Grossi y Kunreuther, 2005). Por lo tanto, para evitar errores de interpretación, es necesario identificar claramente el uso que se le esté dando al término de vulnerabilidad sísmica, en cualquier estudio de vulnerabilidad, daño o riesgo sísmicos.

En el presente trabajo se considera a la vulnerabilidad sísmica como una propiedad de cada edificio, la cual es inversamente proporcional a la resistencia sísmica del edificio (Ec. 2-1). Además, se considera que la vulnerabilidad sísmica es una variable que se puede cuantificar explícitamente.

$$\text{Vulnerabilidad sísmica} \propto \frac{1}{\text{Resistencia sísmica}} \quad 2-1$$

Por otra parte, una importante fuente de conocimiento respecto a la vulnerabilidad sísmica de los edificios es el análisis de los daños que ciertos sismos han ocasionado en edificios. Por ejemplo, de acuerdo con un estudio y evaluación de daños hecho por Dogangün (2004), muchos de los colapsos y daños en edificios de hormigón armado que ocurrieron en el sismo de Bingöl, Turquía, del primero de mayo de 2003, se debieron en gran medida a una alta vulnerabilidad sísmica de los edificios ocasionada por los siguientes factores: 1) el uso de detalles no dúctiles; 2) la presencia de pisos débiles; 3) la pobre calidad del hormigón; 4) la presencia de columnas cortas; 5) la presencia de columnas débiles – vigas fuertes; 6) la existencia de voladizos largos y pesados; 7) muros de hastial sin confinar.

En forma más general, en un documento publicado por el EERI (EERI, 2004) se establece que los edificios con baja vulnerabilidad sísmica, suelen ser aquellos que cumplen con lo siguiente:

- Han sido bien diseñados, bien detallados, y bien contruidos;
- Han sido detallados para ductilidad y redundancia, lo cual les provee seguridad contra el colapso;
- Tienen adecuados diafragmas horizontales para distribuir las fuerzas sísmicas, los cuales están adecuadamente diseñados, para todas las transferencias de carga requeridas hacia y desde los elementos verticales.

Mientras que de acuerdo con el mismo documento del EERI (EERI, 2004), los edificios con alta vulnerabilidad sísmica suelen ser aquellos que satisfacen lo siguiente:

- Han tenido inadecuados procedimientos de construcción y ausencia de control de calidad;

- Han experimentado sismos sucesivos de importante magnitud;
- Contienen elementos rígidos que no fueron considerados en el diseño;
- Tienen irregularidades en planta y elevación;
- Tienen pisos débiles;
- Tienen distancia inadecuada entre edificios;
- Tienen inadecuadas conexiones entre elementos estructurales;
- Tienen elementos dúctiles con resistencia baja;
- Tienen columnas de esquina que no han sido diseñadas adecuadamente;
- Tienen paneles exteriores y parapetos con anclaje débil (EERI, 2004).

Por otra parte, en el informe del ATC-13 (ATC-13, 1985) mencionan que en general para fines de estimar posible daño sísmico, las características importantes de las estructuras son las siguientes:

- El material de construcción;
- El suelo sobre el que está la cimentación;
- La cimentación;
- La altura;
- El sistema estructural;
- La configuración;
- La continuidad estructural;
- La calidad del diseño y de la construcción;
- La edad;
- La proximidad a otras estructuras para considerar los efectos de golpeteo.

Por lo tanto, esta última lista contiene algunas de las variables más importantes que de acuerdo con el ATC-13, determinan la vulnerabilidad sísmica de un edificio.

Funciones de daño

Una función de daño es una relación entre niveles de daño y los correspondientes niveles de sacudida sísmica. Específicamente, con estas funciones, se obtiene una estimación del daño que sufrirá una estructura durante la ocurrencia de un sismo determinado. Las funciones de daño pueden clasificarse en cuatro grupos de acuerdo con el origen de las mismas: empíricas, de opinión experta, analíticas e híbridas.

Las funciones empíricas se obtienen principalmente, de los datos de daño observados en investigaciones de campo realizadas después de la ocurrencia de sismos. Mientras que las funciones de opinión experta, como su nombre lo indica, son aquellas que se obtienen a partir del tratamiento estadístico de la opinión de expertos. Por otra parte, las funciones analíticas se obtienen a partir de los resultados de simulaciones

analíticas, y las funciones híbridas resultan de la combinación de algunos de los tres tipos de funciones anteriores (Rossetto y Elnashai, 2003).

Un ejemplo de las funciones de daño es la Ec. 1-1, la cual se emplea en la metodología LM1 de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), para estimar el valor del grado de daño medio que se espera ocurra en un edificio, que tiene una vulnerabilidad sísmica determinada, y que es sometido a una intensidad macrosísmica específica. Por otra parte, la Figura 2-12 muestra un esquema de una función de daño sísmico típica, en la que se representan las importantes incertidumbres que suelen estar presentes en dichas funciones.

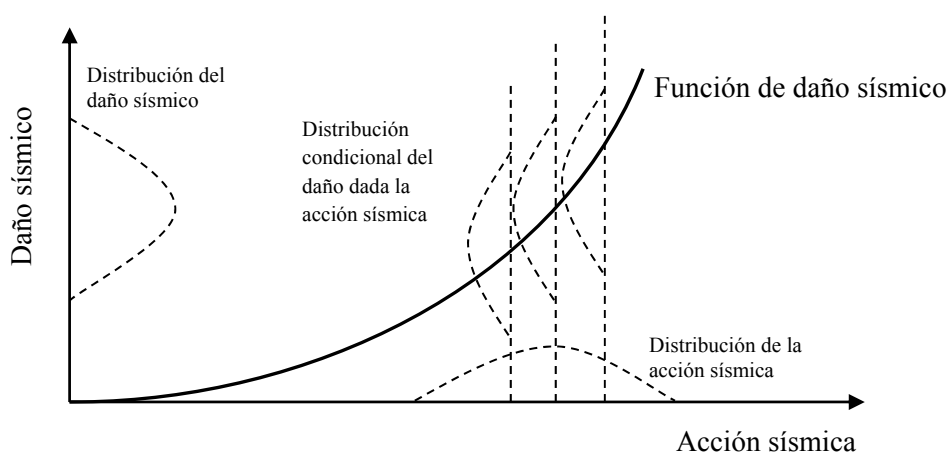


Figura 2-12. Esquema de una función de daño sísmico típica (adaptada de Mahdyiar y Porter, 2005).

Riesgo sísmico

Actualmente, no hay una metodología estándar para estimar riesgo sísmico. Esto último se debe principalmente, al hecho de que aún hay significativas incertidumbres en los principales elementos que determinan el riesgo sísmico de un edificio. Es decir, las incertidumbres asociadas a las estimaciones del peligro sísmico, de la vulnerabilidad sísmica y del daño sísmico, todavía son importantes. Por tal motivo, los modelos probabilistas son una opción apropiada para estimar el riesgo sísmico de edificios.

En el área de la ingeniería sísmica destacan dos enfoques para estimar el riesgo sísmico: a) uno en el que se considera que el riesgo sísmico es el resultado de la relación de la peligrosidad sísmica y de las funciones de daño, en el que no interviene el concepto de vulnerabilidad (McGuire, 2004; ATC-13, 1985); y b) otro en el que se considera que el riesgo sísmico es el resultado de la relación entre tres grandes elementos, la peligrosidad sísmica, la vulnerabilidad sísmica y las funciones de daño (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006). En el primer caso (a) se considera que la vulnerabilidad sísmica de los

edificios es inherente a las funciones de daño, y en el segundo caso (b) se considera que la vulnerabilidad sísmica puede ser tratada como una variable independiente.

Para estimar el riesgo sísmico bajo el primer enfoque (a) es posible emplear la Ec. 2-2 [adaptada de McGuire (2004) y de ERN (2009)], mediante la cual se estima la frecuencia anual de exceder un cierto nivel de daño.

$$\nu[D] = \sum_{mmi} P[D > d | mmi] \gamma'[mmi] \quad 2-2$$

donde $\gamma'[mmi]$ es la frecuencia de ocurrencia de la intensidad macrosísmica (McGuire, 2004); $P[D > d | mmi]$ es la probabilidad de que un nivel de daño d sea excedido, dado que un edificio fue sometido a una intensidad macrosísmica mmi .

De manera similar, la estimación del riesgo sísmico bajo las consideraciones del segundo enfoque (b) puede realizarse mediante la Ec. 2-3. Específicamente, al emplear dicha ecuación es posible estimar también la frecuencia anual de exceder un cierto nivel de daño.

$$\nu[D] = \sum_{mmi} \sum_V P[D > d | V, mmi] P[V] \gamma'[mmi] \quad 2-3$$

donde $\gamma'[mmi]$ es la frecuencia de ocurrencia de la intensidad macrosísmica; $P[V]$ es la probabilidad de que se presente el nivel de vulnerabilidad sísmica V ; $P[Daño > d | V, mmi]$ es la probabilidad de que un nivel de daño d sea excedido, dado que un edificio con un nivel de vulnerabilidad sísmica V , fue sometido a una intensidad macrosísmica mmi .

En forma semejante, es posible obtener la Ec.2-4, la cual corresponde a la forma continua de la ecuación 2-3.

$$\nu[D] = \int_{mmi} \int_V P[D > d | V, mmi] P[V] \gamma'[mmi] dV dmmi \quad 2-4$$

2.4.3 Metodologías para estimar vulnerabilidad sísmica y daño sísmico esperado de edificios en zonas urbanas

Enseguida se mencionan características relevantes de proyectos que han contribuido en forma significativa, al desarrollo de metodologías para estimar el riesgo sísmico de edificios en regiones o zonas urbanas. Particularmente, se incluyen proyectos que son una referencia fundamental para el presente trabajo.

ATC-13

En el capítulo 1 se mencionaron las principales características del proyecto ATC-13, en el que abordaron diferentes aspectos del riesgo sísmico. Sin embargo, dado que el tema principal del presente trabajo es la estimación del riesgo sísmico en edificios, en los siguientes apartados únicamente se hacen comentarios y descripciones relacionados con la propuesta metodológica del ATC-13 para estimar el daño físico directo en edificios.

Como se mencionó en el capítulo anterior uno de los productos más relevantes del ATC-13 fueron las matrices de probabilidad de daño, que se generaron a partir de las respuestas que dieron los expertos a las encuestas que les aplicaron. En dichas encuestas cada experto estableció tres estimaciones del daño que el tipo de edificación sufrirá, cuando ocurra una intensidad macrosísmica determinada. Dicho daño se expresó en términos de un factor de daño, el cual se define mediante la Ec. 2-5.

$$\text{Factor de daño (DF)} = \frac{\text{Pérdida en dólares}}{\text{Valor de reposición}} \quad 2-5$$

donde el valor de reposición es el costo actual del reemplazo del edificio, en su condición previa a la pérdida.

Adicionalmente, establecieron estados de daño y cada estado de daño quedó definido por un intervalo de valores del factor de daño (DF), y por una descripción del tipo de daño (Tabla 1-2). Además, seleccionaron a la escala de intensidad MM como la forma más apropiada, para caracterizar el movimiento sísmico (ATC-13, 1985), con la finalidad de que los expertos estimaran un porcentaje de daño sísmico, según la clase de construcción considerada. Es importante destacar que los estados de daño de la Tabla 1-2, se refieren a daño físico directo en las construcciones (daño estructural y daño no estructural).

Cada experto fue consultado para que realizara tres estimaciones de daño por cada tipo de construcción y para cada intensidad macrosísmica. Siendo la mejor estimación (*best estimate*) la que el experto considera la más probable, y las estimaciones baja (*low estimate*), y alta (*high estimate*), corresponden a los valores que delimitan el 90% de los posibles niveles de daño según el propio experto. Esto último significa también que hay únicamente 10% de probabilidad, de que el nivel de daño sea menor o mayor que los respectivos límites inferior y superior, que cada experto especificó.

En la misma consulta cada experto estableció una valoración entre 1 y 10 de su experiencia en el tipo de construcción evaluada, y asignó un nivel de confianza a cada una de sus estimaciones de daño. Con dicha información fue posible aplicar el método Delphi, mediante el cual se asignan diferentes pesos a cada una

de las opiniones de los expertos, en función de su experiencia declarada en el tipo de construcción, y del nivel de confianza aceptada de su valoración.

Para estimar pérdidas económicas emplearon las ecuaciones 2-5 y 2-6, las cuales permiten estimar para un edificio el factor de daño, y la razón de daño, respectivamente. Además emplearon la Ec. 2-7, la cual permite estimar para un grupo de edificios el factor de daño medio.

$$\text{Razón de daño (DR)} = \frac{\text{Número de edificios dañados}}{\text{Número total de edificios}} \quad 2-6$$

El Factor de Daño Medio (*Mean Damage Factor –MDF*) para un grupo de estructuras similares, expuestas a la misma intensidad del movimiento sísmico, está definido como:

$$\text{Factor de daño medio (MDF)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Pérdida en dólares})_i}{(\text{Valor de reposición})_i} \quad 2-7$$

donde n es el número de estructuras en la muestra.

Enseguida se incluye un ejemplo en el que se describen las principales consideraciones realizadas, para procesar la información proporcionada por los expertos, con la finalidad de obtener las matrices de probabilidad de daño para diferentes tipos de construcciones. En este ejemplo, se parte de las respuestas de estimación del daño realizadas por 8 expertos, para la clase de construcción No.1 (“*Facility Class No. 1*”), la cual corresponde a una edificación de pórticos de madera de baja altura. Dichos especialistas indicaron sus estimaciones de daño para la clase de construcción No.1, cuando la misma estuviese sometida a una intensidad sísmica de IX en la escala MM. El resumen de las estimaciones del menor daño probable (“*Low estimate*”) para la clase de construcción No.1, y para la intensidad macrosísmica MM=IX se indica en la Tabla 2-4.

Posteriormente, con la finalidad de realizar un análisis estadístico ponderado, se emplearon las ecuaciones 2-8, 2-9, 2-10 y 2-11, las cuales se detallan enseguida.

$$w_i = q_i^\alpha c_i \quad 2-8$$

donde w_i es igual al peso de la estimación de daño del experto i -ésimo; q_i es igual a la experiencia del experto i -ésimo en la clase de construcción expresada en valores entre 0 y 10; c_i es la confianza del experto i -ésimo en su estimación de daño en una escala de 0 a 10; α es igual a la potencia dependiente de los valores de la experiencia y confianza. El valor de α asegura que la asignación de pesos está de acuerdo en primer término con el nivel de experiencia del experto, y en segundo término con el nivel de confianza en su estimación. Si $\alpha=1$, entonces, todos los valores de experiencia y confianza de los expertos tendrán

igual peso. Por lo tanto, si las respuestas de algunos expertos tienen mayor peso que las respuestas de otros, entonces, el valor de α debe ser necesariamente mayor que 1. La jerarquización de pesos es la siguiente: el caso de combinaciones de alta experiencia y alta confianza, tiene mayor peso que la combinación de alta experiencia y baja confianza. Esta última combinación tiene mayor peso que la combinación de baja experiencia y alta confianza, la cual únicamente tiene mayor peso que la combinación de baja experiencia y baja confianza. Finalmente, las opiniones de los expertos con niveles de confianza o de experiencia iguales a cero son automáticamente descartados (ATC-13, 85).

Tabla 2-4. Estimaciones del menor daño probable para la clase de construcción No.1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica de IX.

Experto i	Experiencia del experto i (q_i)	Factor de daño en % estimado por el experto i (y_i)	Confianza del experto i en el factor de daño estimado por él mismo (c_i)
A	9	5	9
B	9	2	7
C	8	8	7
D	8	6	8
E	7	10	8
F	7	7	8
G	9	1	7
H	7	2	8

En el caso del ATC-13 evaluaron diferentes valores de α hasta encontrar un valor suficientemente alto para asegurar la requerida jerarquización de pesos, siendo el valor de $\alpha=4$ el que cumplió con dicha condición. Al usar dicho valor de alfa, las respuestas de los expertos con bajos niveles de experiencia, contribuyen muy poco al valor medio ponderado de los factores de daño estimados por los expertos.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} \quad 2-9$$

donde \bar{Y} es igual al factor de daño medio ponderado de las estimaciones de todos los expertos; y_i es igual al factor de daño estimado por el experto i -ésimo.

$$S^2 = \frac{\sum_i w_i (y_i - \bar{Y})^2}{\sum_i w_i} \quad 2-10$$

donde S^2 es la varianza de las estimaciones de todos los expertos.

$$Vp = \frac{S}{\bar{Y}}$$

2-11

donde Vp es el coeficiente de variación de las estimaciones de todos los expertos.

El paso siguiente consiste en emplear los datos de la Tabla 2-4 y la ecuación 2-8, para calcular los pesos de las estimaciones de daño de cada experto (Tabla 2-5).

Tabla 2-5. Pesos de las estimaciones del menor daño probable, para la clase de construcción No. 1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica de IX.

Experto i -ésimo	Experiencia del experto i -ésimo (q_i)	Factor de daño estimado por el experto i -ésimo (y_i)	Confianza del experto i -ésimo en el factor de daño estimado por él mismo (c_i)	Peso de la opinión del experto i -ésimo (w_i)	Peso normalizado de la opinión del experto i -ésimo (W_i)
A	9	5	9	59049	0.22
B	9	2	7	45927	0.17
C	8	8	7	28672	0.11
D	8	6	8	32768	0.12
E	7	10	8	19208	0.07
F	7	7	8	19208	0.07
G	9	1	7	45927	0.17
H	7	2	8	19208	0.07
				269967	1.00

Posteriormente, con la Ec. 2-9 se calcula el factor medio ponderado de las estimaciones del menor daño probable para la clase de construcción No.1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica de IX. Adicionalmente, se emplean las ecuaciones 2-10 y 2-11, para determinar la varianza y el coeficiente de variación, respectivamente. Al aplicar los pasos descritos anteriormente se obtienen los resultados siguientes:

$$\bar{Y} = 4.53\%; S^2 = 7.82; Vp = 0.62$$

De manera que de acuerdo con estos resultados, el valor medio ponderado de la estimación baja del factor de daño, que puede presentarse en la clase de construcción No.1 ante la ocurrencia del grado de intensidad sísmica IX (MM), es igual a 4.53%.

El procedimiento anterior se aplica para todas las estimaciones de daño (*low estimate*, *best estimate*, *high estimate*) de los expertos, para diferentes grados de intensidad, desde el grado VI hasta el grado XII, y para cada clase de construcción ("Facility class"). Al hacerlo, se obtiene para cada clase de construcción tres datos básicos: 1) la media ponderada del menor factor de daño probable (*low estimate*); 2) la media ponderada del factor de daño más probable (*best estimate*) y; 3) la media ponderada del mayor factor de daño probable (*high estimate*). La Tabla 2-6 muestra los valores medios ponderados del daño estimado, para la clase 1, y para una intensidad macrosísmica MM = IX. Con los resultados de la Tabla 2-6 se tiene

el valor medio de daño más probable (*mean-best estimate*), y los valores medios de daño menos probables por debajo (*mean-low estimate*), y por arriba del más probable (*mean-high estimate*). Estos tres valores definen en forma aproximada, una distribución de factores de daño para la clase de construcción No. 1, sometida a una intensidad sísmica de IX.

Tabla 2-6. Valores medios de las estimaciones de daño para la clase de construcción No. 1, sometida a una intensidad macrosísmica igual a IX.

Media ponderada de la estimación baja (<i>Mean of low estimate</i>)	Media ponderada de la estimación más probable (<i>Mean of best estimate</i>)	Media ponderada de la estimación alta (<i>Mean of high estimate</i>)
4.53	9.23	19.69

Adicionalmente, los autores del ATC-13 emplearon los valores contenidos en la Tabla 2-6, para realizar un ajuste y obtener una función de densidad de probabilidad. Para ello, después de analizar resultados y realizar diferentes ajustes, concluyeron que la distribución beta era la que ajustaba con mayor precisión, las mejores estimaciones (*best estimate*) de los expertos (ATC-13, 1985). De esta forma, para el ejemplo de la clase de construcción No. 1, realizaron el ajuste con la distribución beta a partir de los valores indicados en la Tabla 2-6, y con la consideración de que entre los valores extremos (*low estimate* y *high estimate*) de dicha tabla, se contenía al 90% de los posibles factores de daño. La función de densidad de probabilidad beta y la función de distribución acumulativa beta, se definieron en el ATC-13 mediante las ecuaciones 2-12 y 2-14, respectivamente.

$$f_Y(y) = \frac{1}{B(\lambda, \nu)} \frac{(y)^{\lambda-1} (100-y)^{\nu-1}}{(100)^{\lambda+\nu-1}} \quad \text{para } 0 \leq y \leq 100 \quad 2-12$$

donde

$$B(\lambda, \nu) = \frac{\Gamma(\nu)\Gamma(\lambda)}{\Gamma(\lambda+\nu)} ; \quad \lambda \text{ y } \nu \text{ son los parámetros de la distribución, y } \Gamma() \text{ es la función Gamma.} \quad 2-13$$

$$F_Y(y) = \int_0^y f_Y(u) du \quad 2-14$$

En la distribución beta el valor medio, μ_Y , la varianza, σ_Y^2 , y el coeficiente de variación V_Y del factor de daño, están relacionados con los parámetros λ y ν , como se indica en las ecuaciones 2-15, 2-16 y 2-17, respectivamente.

$$\mu_Y = \frac{100\lambda}{(\lambda+\nu)} \quad 2-15$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{\lambda \nu}{(\lambda + \nu)^2 (\lambda + \nu + 1)} (100)^2 \quad 2-16$$

$$V_Y^2 = \frac{\sigma_Y^2}{\mu_Y^2} = \frac{\nu}{\lambda(\lambda + \nu + 1)} \quad 2-17$$

Finalmente, al considerar la Ec. 2-18 y obtener mediante solución numérica los valores de λ y ν , que satisfagan dicha ecuación, se obtienen los valores que definen a la distribución de probabilidad beta, que mejor ajusta los valores medios de las estimaciones de los expertos.

$$0.9 = \int_{y_1}^{y_2} f_Y(y) dy = \frac{[B_{y_2}(\lambda, \nu) - B_{y_1}(\lambda, \nu)]}{B(\lambda, \nu)} \quad 2-18$$

donde y_1 y y_2 son la estimación baja (*low*) y la estimación alta (*high*) del factor de daño, respectivamente, $B_{y_2}(\lambda, \nu)$ y $B_{y_1}(\lambda, \nu)$ son funciones beta incompleta para los valores de y_2 y y_1 , y $B(\lambda, \nu)$ corresponde a la Ec. 2-13.

La Figura 2-13 muestra la función de distribución acumulativa beta, que se obtiene al realizar el ajuste a los valores de la Tabla 2-6. Dicha función se representa en forma discreta mediante tablas denominadas matrices de probabilidad de daño como la mostrada en la Tabla 2-7. En forma semejante, al analizar estadísticamente las estimaciones de los expertos para los diferentes niveles de intensidad sísmica, es posible completar la matriz de probabilidad de daño, para cada clase de construcción, hasta obtener matrices como la mostrada en la Tabla 2-8, la cual corresponde a la clase de construcción No.1 y No. 75, respectivamente.

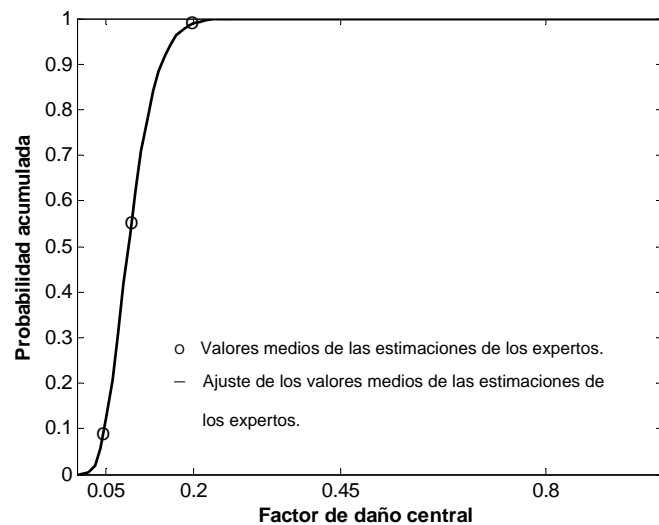


Figura 2-13. Función de distribución acumulativa beta del Factor de Daño (DF), para la clase de construcción No. 1, dada la ocurrencia de una intensidad sísmica MM=IX.

Tabla 2-7. Matriz de Probabilidad de daño incompleta para la clase de construcción No.1 (edificio de baja altura formado por pórticos de madera), con datos únicamente para la intensidad MM= IX.

Estado de daño	Intervalo del factor de daño (%)	Intensidad MM						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Nulo	0				***			
Leve	0-1				***			
Ligero	1-10				62.4			
Moderado	10-30				37.6			
Severo	30-60				***			
Grave	60-100				***			
Colapso	100				***			

*** Probabilidad muy pequeña

Las matrices de daño generadas en el ATC-13 fue una gran aportación, porque permitió que se hicieran estimaciones simplificadas del riesgo sísmico de importante número de edificaciones. Sin embargo, en el ATC-13 limitaron el potencial probabilista de la metodología cuando establecieron que la estimación del daño físico esperado se haría únicamente con los valores medios ponderados de las estimaciones de los expertos. No obstante, los resultados del ATC-13 suelen ser una referencia importante en el desarrollo de metodologías para estimar el riesgo sísmico de construcciones dentro y fuera de Estados Unidos (Bai et al, 2009; Onur et al, 2005; Jang et al, 2002; Ordaz et al, 2000).

Tabla 2-8. Matriz de probabilidad de daño completa para la clase de construcción No.1.

Estado de daño	Intervalo del factor de daño (%)	Intensidad MM						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Nulo	0	3.7	***	***	***	***	***	***
Leve	0-1	68.5	26.8	1.6	***	***	***	***
Ligero	1-10	27.8	73.2	94.9	62.4	11.5	1.8	***
Moderado	10-30	***	***	3.5	37.6	76.0	75.1	24.8
Severo	30-60	***	***	***	***	12.5	23.1	73.5
Grave	60-100	***	***	***	***	***	***	1.7
Colapso	100	***	***	***	***	***	***	***

*** Probabilidad muy pequeña.

EMS-98

El objetivo principal de la escala EMS-98 es estimar la severidad del movimiento sísmico, basado en los efectos observados en un área limitada (Tertulliani et al, 2010). Sin embargo, en la propia publicación de la EMS-98 se reconoce el creciente uso de la misma, como parte de procedimientos para estimar futuras pérdidas en edificios, debidas a la ocurrencia de sismos (Grünthal, 1998). Por otra parte, debido a que el tema principal del presente documento es la estimación de daño sísmico futuro en edificios existentes, se incluyen y comentan enseguida los principales elementos de la EMS-98, que facilitan su uso en la estimación de daño sísmico futuro en edificios.

Escala de Intensidad

La escala macrosísmica EMS-98 (*European Macroseismic Scale* 1998), define diferentes niveles de intensidad sísmica en función de los principales daños y efectos, ocasionados por un movimiento sísmico en las personas, en los objetos, en la naturaleza y en los edificios de un lugar. Por tal razón, en la EMS-98 se refieren al término de intensidad macrosísmica para indicar la severidad del movimiento sísmico.

Los edificios y su vulnerabilidad sísmica

Para identificar a los edificios en la EMS-98 emplean tipologías estructurales y clases de vulnerabilidad. Específicamente, emplean 15 tipologías estructurales y 6 clases de vulnerabilidad (A, B, C, D, E y F). Siendo las estructuras que pertenecen a la clase A, las más vulnerables, y las que pertenecen a la clase F, las menos vulnerables. La relación entre las tipologías estructurales y las clases de vulnerabilidad se indica en la Tabla 2-9. De manera que es posible observar que en la escala EMS-98 se emplea de forma explícita y clara el concepto de vulnerabilidad, para representar la debilidad de los edificios para soportar el efecto que les producen los movimientos sísmicos del terreno.

Tabla 2-9. Diferenciación de estructuras (edificios), conforme a clases de vulnerabilidad, de acuerdo con la escala EMS-98 (Grünthal, 1998).

Tipo de estructura*		Clases de vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Cascotes, cantos rodados, piedra de campo.	●					
	Adobe (ladrillo de barro).	●	●				
	Piedra simple.	○	●				
	Piedra pesada y de gran tamaño.		●	●	○		
	Sin refuerzo, con piezas de tabique o block manufacturados.	○	●	○			
	Sin refuerzo, con forjados de hormigón armado.		●	●	○		
	Reforzada o confinada.			○	●	●	
Hormigón armado (RC)	Pórticos sin diseño sismorresistente.	○	●	●	○		
	Pórticos con moderado nivel de diseño sismorresistente.		○	●	●	●	
	Pórticos con alto nivel de diseño sismorresistente.			○	●	●	●
	Muros sin diseño sismorresistente.		○	●	●		
	Muros con moderado nivel de diseño sismorresistente.			○	●	●	
	Muros con alto nivel de diseño sismorresistente.				○	●	●
Acero	Estructuras de acero.			○	●	●	●
Madera	Estructuras de madera.		○	●	●	●	

● Clase de vulnerabilidad más probable ● Rango probable ○ Rango menos probable o casos excepcionales

* La EMS-98 se publicó en el documento editado por Grünthal (1998), y en dicho texto se incluye una descripción más detallada de los tipos de estructuras consideradas por los autores de la escala de intensidad.

Para ubicar el nivel de vulnerabilidad que le corresponde a un edificio (desde el nivel A hasta el F), primero se debe identificar el tipo de estructura y posteriormente, se debe observar si el edificio tiene características particulares que puedan aumentar o disminuir su vulnerabilidad sísmica en forma significativa. Por ejemplo, si un edificio de pórticos de hormigón armado con moderado nivel de diseño sismorresistente, no tiene características particulares que permitan suponer un aumento o disminución significativos en su vulnerabilidad sísmica, entonces, se clasificaría como un edificio con vulnerabilidad sísmica clase D (Tabla 2-9). Pero si en cambio, en dicho edificio, se observan irregularidades geométricas significativas, entonces debería clasificarse como clase B (Tabla 2-9). En la EMS-98 se aclara que en la descripción de daños en edificios para diferentes intensidades sísmicas, no se incluyen todas las combinaciones posibles, debido a la complejidad que dicha acción significa. Señalan que por ello, en general, sólo se mencionan los dos grados de daño mayores para cada clase de vulnerabilidad de edificios. Indican también que los diferentes grupos de edificios responden y fallan de distintas maneras ante la ocurrencia de un sismo, y por ello, en dicha versión de la escala ilustran de forma separada los daños y fallas, que es posible esperar en los edificios de mampostería, y en los de hormigón armado (Tabla 2-10).

El movimiento sísmico


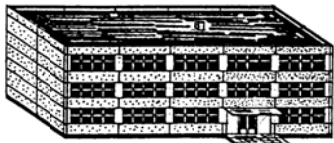

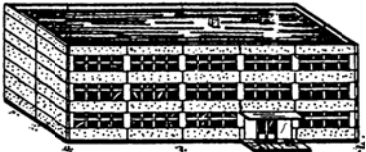

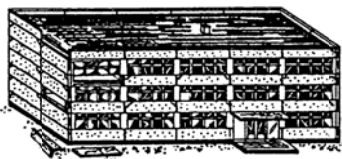




Los efectos del movimiento sísmico son caracterizados a través de doce grados (I-XII), de la escala de intensidad sísmica EMS-98. De cada grado de la escala se describen tres parámetros: a) efectos sobre los humanos; b) efectos sobre objetos y sobre la naturaleza y; c) daño de edificios. Por ejemplo:

Grado IX Destructivo

- a) Pánico general. Las personas pueden ser tiradas al suelo.
- b) Muchos monumentos y columnas se caen o son torcidas. Las ondas son sentidas sobre terreno suave.
- c) Muchos edificios de la clase A de vulnerabilidad tienen daño de grado 5.
Muchos edificios de la clase B de vulnerabilidad sufren daño de grado 4; unos pocos de grado 5.
Muchos edificios de la clase C de vulnerabilidad sufren daño de grado 3; unos pocos de grado 4.
Muchos edificios de la clase D de vulnerabilidad sufren daño de grado 2; unos pocos de grado 3.
Pocos edificios de la clase E de vulnerabilidad tienen daño de grado 2.

Las características de los grados de daño se indican en la Tabla 2-10 y las cantidades de muchos, pocos y la mayoría empleados en la definición de los grados de intensidad se delimitan mediante la Figura 2-14.

Tabla 2-10 Grados de daño en edificios, y descripción de las características particulares de dichos grados de daño en los edificios de mampostería y hormigón armado, según EMS-98 (Grünthal, 1998).

Clasificación de daño (EMS-98)		
Grados	Descripción complementaria	
	Edificios de mampostería	Edificios de hormigón armado
Grado 1: Daño insignificante a leve (sin daño estructural, daño no estructural leve).	<p>Grietas muy delgadas (<i>Hair-line</i>) en muy pocos muros. Únicamente, caída de pequeñas piezas de yeso o recubrimiento. En muy pocos casos caída de rocas sueltas de las partes altas de los edificios.</p> 	<p>Finas grietas en yeso sobre elementos de los pórticos o en la base de los muros. Finas grietas en muros divisorios y de relleno.</p> 
Grado 2: Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado).	<p>Grietas en muchos muros. Caída de piezas bastante grandes de yeso o recubrimiento. Colapso parcial de chimeneas.</p> 	<p>Grietas en columnas y vigas de pórticos, y en muros estructurales. Grietas en muros divisorios y de relleno; caída de revestimiento quebradizo y yeso. Caída de mortero de las juntas de los muros.</p> 
Grado 3: Daño significativo a grande (daño estructural moderado, daño no estructural significativo o considerable).	<p>Grietas grandes y extensas en la mayoría de los muros. Separación de tejas del techo. Fractura de chimeneas al nivel del techo; falla de elementos individuales no estructurales (divisorios, muros del hastial).</p> 	<p>Grietas en columnas y en la conexión viga columna de pórticos en la base, y en nudos de muros acoplados. Caída del recubrimiento del hormigón, pandeo de varillas reforzadas. Grandes grietas en muros divisorios y de relleno, falla de paneles de relleno individuales.</p> 
Grado 4: Daño muy grande (daño estructural grande, daño no estructural muy grande).	<p>Fallas graves de muros; fallas estructurales parciales de techos y pisos.</p> 	<p>Grandes grietas en elementos estructurales con fallas de compresión del hormigón, y fractura de varillas o barras de acero (<i>rebars</i>); falla en la unión de las barras de las vigas reforzadas; inclinación de columnas. Colapso de pocas columnas o de algún piso superior.</p> 
Grado 5: Destrucción (daño estructural muy grande).	<p>Colapso total o cercano al colapso total.</p> 	<p>Colapso del primer piso o partes de los edificios (por ejemplo, las alas).</p> 

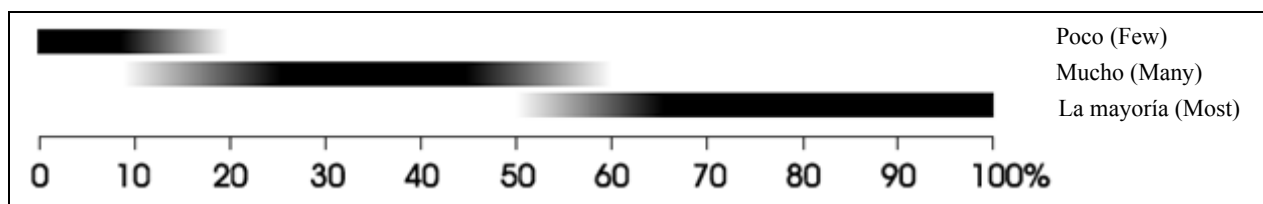


Figura 2-14. Definiciones de cantidad en la EMS-98 (Grünthal, 1998).

Estimación del daño

En la EMS-98 se reconoce que no se puede determinar con certeza, el número de edificios que se dañarán durante la ocurrencia de ciertos sismos. Dicha incertidumbre se considera en la EMS-98 mediante el empleo de intervalos. Por ejemplo, una intensidad sísmica de IX tiene asociada la generación de daño grado 2 en “Pocos” edificios de la clase de vulnerabilidad E, donde pocos se define como un valor entre 0 y 20% (Figura 2-14).

Por otra parte, si se usa la escala EMS-98 para estimar intensidades sísmicas, entonces el procedimiento consistirá primero en realizar una investigación que permita reunir datos diversos como por ejemplo, el número de edificios que sufrieron daños, y las características de dichos daños. Para, posteriormente, analizar todos los datos disponibles, y estimar el grado de intensidad sísmica que se presentó en el lugar estudiado, en función de los efectos y daños sísmicos observados. En cambio, si se usa la escala EMS-98 para estimar futuros daños, entonces, mediante un estudio se establece qué intensidad sísmica (dentro de los XII grados posibles), puede presentarse en una ciudad en un determinado tiempo, y en función de dicha intensidad, se estima cuáles y cuántos edificios del lugar de estudio sufrirían daños, y de qué características serían esos daños.

Enseguida se describen procedimientos que pueden emplearse para obtener matrices de probabilidad de daño, a partir de la escala EMS-98 y con el propósito de estimar daños futuros en edificaciones. Para ello, se empieza por considerar que es posible obtener matrices de daño incompletas como la de la Tabla 2-11, si se toma en cuenta la descripción referente a los daños esperados en edificios que pertenecen a la misma clase de vulnerabilidad.

Posteriormente, para sustituir la estimación cualitativa determinada por las palabras de “Pocos”, “Muchos” y “La mayoría” en la matriz incompleta de la Tabla 2-11, por una descripción cuantitativa, es posible emplear diferentes procedimientos y utilizar diversos criterios. Por ejemplo, se podría asignar un número aleatorio que estuviese contenido dentro del intervalo de los posibles valores indicados en la EMS-98 (Figura 2-14). Al hacerlo se podría obtener una nueva matriz de probabilidad de daño incompleta para edificios con vulnerabilidad clase A, como la mostrada en la Tabla 2-12.

Es importante destacar que para definir los intervalos asociados a las palabras “Pocos”, “Muchos” y “La mayoría” (Figura 2-14), los autores de la EMS-98 consideraron una importante cantidad de información relacionada con los daños sísmicos en edificios, que se han observado en diferentes partes del mundo. Por lo tanto, tales intervalos sí proporcionan una razonable aproximación de los daños en edificios, que se pueden presentar durante la ocurrencia de sismos con diferentes grados de intensidad macrosísmica EMS-98. Por otra parte, para fines de estimación de daño suele ser conveniente considerar también el grado de daño nulo, por ello, la Tabla 2-13 muestra una matriz de daño incompleta para la clase de vulnerabilidad E, en la que se incluye un grado de daño nulo.

Tabla 2-11. Matriz de Probabilidad de daño incompleta, definida mediante variables lingüísticas, para edificios con vulnerabilidad clase A según EMS-98.

Grado de daño	Grado de Intensidad					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
Insignificante a leve (1).	Pocos	Muchos				
Moderado (2).		Pocos				
Significativo a grande (3).			Muchos			
Muy grande (4).			Pocos	Muchos		
Destrucción (5).				Pocos	Muchos	La mayoría

Al sustituir las variables lingüísticas de la matriz indicada en la Tabla 2-13, por valores numéricos, es posible obtener una matriz como la de la Tabla 2-14. Por ejemplo, en este caso el criterio para elegir los valores que sustituyesen a las variables lingüísticas, fue considerar los valores medios de los intervalos asociados a cada una de dichas variables lingüísticas (Figura 2-14).

Tabla 2-12. Matriz de Probabilidad de daño incompleta, definida mediante porcentajes de daño, para edificios con vulnerabilidad clase A según EMS-98.

Grado de daño	Grado de Intensidad					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
Insignificante a leve (1).	12%	41%				
Moderado (2).		7%				
Significativo a grande (3).			35%			
Muy grande (4).			15%	29%		
Destrucción (5).				11%	42%	85%

Finalmente, se puede completar el resto de la matriz de la Tabla 2-14, hasta obtener una matriz completa como la de la Tabla 2-15, que corresponde a edificios con vulnerabilidad clase E. Para tal fin, es posible considerar que la distribución del daño se puede representar mediante una función de probabilidad. Específicamente, se recomienda usar funciones de distribución de probabilidad como la distribución binomial y la distribución beta, las cuales han sido consideradas adecuadas para describir distribuciones

de daño en edificios. Por ejemplo, la Tabla 2-15 corresponde a una matriz que se completó, considerando que el daño sísmico se puede representar mediante una distribución binomial. Por otra parte, es importante destacar que el uso de la escala EMS-98 está orientado al análisis de un grupo o conjunto de edificios, y no a un solo edificio.

Tabla 2-13. Matriz de probabilidad de daño incompleta, definida mediante variables lingüísticas, para edificios con vulnerabilidad clase E.

Grado de daño	Grado de Intensidad			
	IX	X	XI	XII
Nulo (0).				
Insignificante a leve (1).				
Moderado (2).	Pocos	Muchos		
Significativo a grande (3).		Pocos	Muchos	
Muy grande (4).			Pocos	
Destrucción (5).				La mayoría

Tabla 2-14. Matriz de probabilidad de daño incompleta, definida mediante valores numéricos que sustituyen a las variables lingüísticas, para edificios pertenecientes a la clase de vulnerabilidad E.

Grado de daño	Grado de Intensidad			
	IX	X	XI	XII
Nulo (0).				
Insignificante a leve (1).				
Moderado (2).	0.10	0.35		
Significativo a grande (3).		0.10	0.35	
Muy grande (4).			0.10	
Destrucción (5).				0.75

Tabla 2-15. Matriz de probabilidad de daño completa para edificios pertenecientes a la clase de vulnerabilidad E.

Grado de daño	Grado de Intensidad			
	IX	X	XI	XII
Nulo (0).	0.52	0.16	0.03	0.00
Insignificante a leve (1).	0.36	0.36	0.17	0.00
Moderado (2).	0.10	0.31	0.32	0.00
Significativo a grande (3).	0.02	0.14	0.30	0.03
Muy grande (4).	0.00	0.03	0.15	0.22
Destrucción (5).	0.00	0.00	0.03	0.75

LM1 de Risk-UE

En el proyecto de Risk-UE se adoptaron dos metodologías para estimar escenarios de riesgo sísmico en zonas urbanas europeas. Dichos métodos se denominaron LM1 y LM2, y sus principales características

fueron mencionadas en el capítulo 1 del presente documento. Sin embargo, debido a que en el presente trabajo se propone una versión modificada del método LM1, se incluye enseguida información adicional de este último método.

Método LM1

El método LM1 de Risk-UE ha sido también llamado método del índice de vulnerabilidad, o método macrosísmico, y fue desarrollado en gran medida por Giovinazzi (2005). Dicho método tuvo como referencia principal la escala EMS-98 (Grünthal, 1998), y por ello, los principales pasos realizados por Giovinazzi para desarrollar el método fueron los siguientes:

- A) Obtuvo matrices de probabilidad de daño completas a partir de las matrices parcialmente definidas en la EMS-98.
- B) Propuso definir las diferentes clases de vulnerabilidad propuestas en la escala EMS-98, mediante el uso de un índice de vulnerabilidad sísmica.
- C) Determinó una función de daño a partir de las matrices de probabilidad de daño estimadas previamente (paso A).
- D) Propuso un procedimiento para estimar el índice de vulnerabilidad total, el cual representa la vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado.

Enseguida se mencionan aspectos relevantes de cada uno de esos 4 pasos realizados para el desarrollo del método macrosísmico.

A) Obtención de matrices de probabilidad de daño a partir de matrices parcialmente definidas en la EMS-98, mediante el procedimiento indicado enseguida (apartados A.1 y A.2):

A.1 Consideró necesario completar el modelo EMS-98, proponiendo una adecuada distribución de probabilidad discreta del grado de daño. Una posible distribución que consideró para representar el daño en un edificio, fue la distribución binomial, la cual ha sido usada en forma exitosa en el análisis estadístico, de los datos obtenidos después del sismo de Irpinia en 1980 en Italia. La función de densidad de probabilidad binomial (PMF) usada por Giovinazzi está dada por a Ec. 2-19.

$$PMF : p_{D_k} = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5} \right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5} \right)^{5-k} \quad 2-19$$

donde p_{D_k} es la probabilidad de tener un grado de daño D_k ($k = 0 \div 5$) y el símbolo $!$ indica el operador factorial, mientras que μ_D es el grado de daño medio; μ_D representa el valor de daño medio de la

distribución de daño discreta definida en la Ec. 2-20, dicho daño medio varía entre 0 y 5, y se define como el daño promedio.

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 p_k k \quad 2-20$$

Al observar la Ec. 2-19 es posible identificar que la distribución de daño completa de cada clase de edificio y grado de intensidad, puede obtenerse únicamente con el valor de μ_D . Sin embargo, en este caso la función binomial no permite definir dispersiones diferentes alrededor del valor medio μ_D (Ec. 2-21).

$$\sigma_D = \sqrt{\mu_D \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)} \quad 2-21$$

Además, Giovinazzi (2005) consideró las observaciones de Sandi y Floricel (1995), en las que señalaron que la dispersión de la distribución binomial es demasiado alta, cuando se considera una clasificación detallada de edificios. Esto último puede llevar a sobreestimar el número de edificios que sufren daños serios, en el caso de los valores más bajos del grado de daño medio (Giovinazzi, 2005). Por lo tanto, Giovinazzi evaluó la posibilidad de emplear las funciones lognormal o beta, eligiendo finalmente la distribución beta, porque a diferencia de la distribución lognormal, no requiere ser truncada y re-normalizada al 100 por ciento del daño. Adicionalmente, tomó en cuenta el hecho de que la distribución beta ha sido considerada adecuada, para hacer representaciones razonables de distribuciones de daño sísmico en edificios. Particularmente, consideró los comentarios que al respecto estableció McGuire (2004).

Particularmente, Giovinazzi empleó las ecuaciones 2-22 y 2-23, que corresponden a la función de densidad de probabilidad beta y a la función de distribución acumulativa beta, respectivamente.

$$PDF : p(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x \leq b; t, r > 0 \quad 2-22$$

donde a, b, t y r son los parámetros de la distribución, y Γ la función gamma.

$$CDF : P(x) = \int_a^x p(y) dy \quad 2-23$$

En este caso, la media y la varianza de la distribución de probabilidad beta quedan definidos mediante las ecuaciones 2-24 y 2-25, respectivamente.

$$\mu_x = a + (b - a) \frac{r}{t} \quad 2-24$$

$$\sigma_x^2 = (b - a)^2 \frac{r(t - r)}{(t)^2(t + 1)} \quad 2-25$$

Debido a que la forma de la distribución beta depende de los parámetros t y r (o equivalentemente la media y la varianza), McGuire (2004) consideró que valores de t entre 3 y 6 pueden resultar en razonables distribuciones de daño en edificios.

Por otra parte, Giovinazzi identificó que para poder usar la distribución Beta, era necesario hacer referencia a los grados de daño D_k ($k = 0 \div 5$) definidos en la Tabla 2-10. Con esa finalidad propuso asignar el valor de 0 al parámetro a , y el de 6 al parámetro b de la función de distribución beta (2-22). Esta última consideración permite estimar la probabilidad asociada al grado de daño D_k como sigue:

$$p_{D_k} = \int_k^{k+1} p(y) dy = P(k+1) - P(k) \quad 2-26$$

En función de las definiciones anteriores, Giovinazzi, propuso correlacionar el grado de daño medio μ_D , valor medio de la distribución discreta (Ec. 2-20), y el grado medio de la distribución beta μ_x , mediante un polinomio de tercer grado (Ec. 2-27).

$$\mu_x = 0.042\mu_D^3 - 0.315\mu_D^2 + 1.725\mu_D \quad 2-27$$

En la Tabla 2-16 se muestran los valores que se obtienen de μ_x al evaluar la Ec. 2-27 con algunos valores de μ_D .

Tabla 2-16. Ejemplo de valores de μ_x obtenidos para diferentes valores de μ_D mediante la Ec. 2-27.

μ_D	0	1	2	3	4	5
μ_x	0	1.452	2.526	3.474	4.548	6

Posteriormente, empleó la Ec.2-24 y la Ec. 2-27, para correlacionar los dos parámetros de la distribución beta con el grado de daño medio, μ_D , y obtuvo la Ec. 2-28.

$$r = t(0.007\mu_D^3 - 0.0525\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad 2-28$$

Al emplear las ecuaciones 2-22, 2-26 y 2-28, y al considerar $t = 8$ y $\mu_D = 2$, es posible obtener distribuciones beta del daño como la que se muestra en la Figura 2-15.

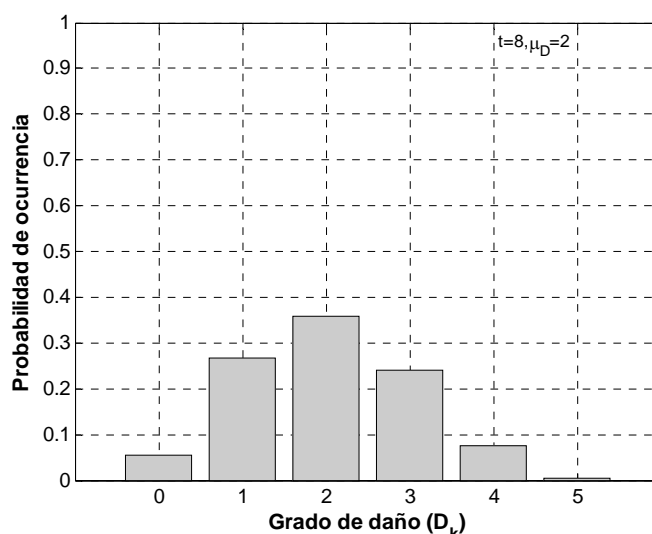


Figura 2-15. Probabilidades de ocurrencia de cada uno de los grados de daño sísmico (Tabla 2-10), asociados a un grado de daño sísmico medio, μ_D , igual a 2.

A.2. Por otra parte, empleó las definiciones de Pocos, Muchos y la Mayoría establecidas en la escala EMS-98 (Figura 2-14), y la teoría de conjuntos difusos, para proponer valores que sustituyesen a dichas variables lingüísticas en las matrices de daño incompletas de la EMS-98. De acuerdo con la teoría de conjuntos difusos empleada por Giovinazzi, los valores *plausibles* corresponden a los valores casi seguros o muy probables, y los valores *posibles* se refieren a valores raros o poco probables.

Giovinazzi propuso obtener 4 diferentes distribuciones de daño para cada clase de vulnerabilidad sísmica. Para ello consideró que los valores *plausibles* (muy probables) del parámetro μ_D , son aquellos para los cuales todas las definiciones de cantidades *más probables* de la EMS-98 (Tabla 2-17) son respetadas. Por ejemplo, de acuerdo con las matrices incompletas de la EMS-98, en el caso de la clase de vulnerabilidad B y para una intensidad macrosísmica de grado VI, muchos edificios sufrirán daño ligero D1 (Tabla 2-10), y pocos sufrirán daño moderado D2. Por lo que, los valores *plausibles* (muy probables), del parámetro μ_D , serán aquellos en los que el porcentaje de edificios con daño ligero D1 sea un valor entre 20 y 50%, y el de edificios con daño moderado D2 sea un valor menor que 10%.

De manera similar los valores menos probables del parámetro μ_D , serán aquellos para los cuales todas las definiciones de cantidades de la EMS-98 sean plausibles o posibles (Tabla 2-18), con al menos una que sea solo *posible* (poco probable). Por lo que para el caso de los edificios con vulnerabilidad B e intensidad VI, el porcentaje de edificios con daño ligero D1 será un valor entre 10 y 60%, y el porcentaje de edificios con daño moderado D2 un valor entre 0 y 20% (Tabla 2-19).

Tabla 2-17. Intervalos que sustituyen a las variables lingüísticas de cantidad EMS-98, en los que se incluyen únicamente a los valores plausibles (más probables).

Variable de cantidad en la EMS-98	Intervalo asociado a cada variable de cantidad en la EMS-98
Pocos	0-10
Muchos	20-50
La mayoría	60-100

Mediante el empleo de la función de distribución beta (Ec. 2-22), con sus respectivos parámetros de r (Ec. 2-28), y $t = 8$, es posible estimar los valores de μ_D que satisfacen los valores de control indicados en la Tabla 2-20. Estos valores de control se determinaron al elegir un valor único que sustituyese a cada uno de los intervalos de la Tabla 2-19. Para ello, en el caso de los intervalos superiores, se eligió al valor máximo del intervalo correspondiente, y para el caso de los intervalos inferiores, se eligió el valor mínimo del intervalo respectivo. Al aplicar el procedimiento descrito se obtuvieron los valores de μ_D indicados en la Tabla 2-21.

Tabla 2-18. Intervalos que sustituyen a las variables lingüísticas EMS-98, en los que se incluyen tanto los valores plausibles como los valores posibles.

Variable EMS-98	Intervalo asociado a cada variable EMS-98
Pocos	0-20
Muchos	10-60
La mayoría	50-100

Tabla 2-19. Intervalos de valores que sustituyen a las variables lingüísticas de poco y mucho en edificios clase B, sometidos a una intensidad de VI.

Nivel de daño	D1	D2	D3	D4	D5
Cantidad de edificios	Muchos	Pocos			
B+ Plausible superior		0-10			
B- Plausible inferior	20-50				
B+ + Posible superior		0-20			
B- - Posible inferior	10-60				

Tabla 2-20. Valores de control para completar la matriz de distribución de daño de los edificios clase B, sometidos a una intensidad de VI.

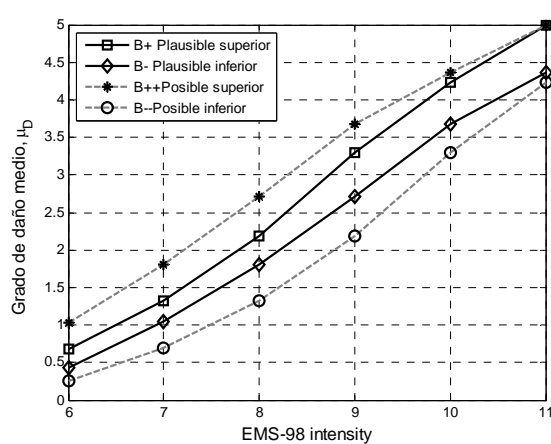
Nivel de daño	D1	D2	D3	D4	D5
Cantidad de edificios	Muchos	Pocos			
B+ Plausible superior		10			
B- Plausible inferior	20				
B+ + Posible superior		20			
B- - Posible inferior	10				

Tabla 2-21. Valores que completan la distribución de daño para los edificios clase B, sometidos a una intensidad de VI.

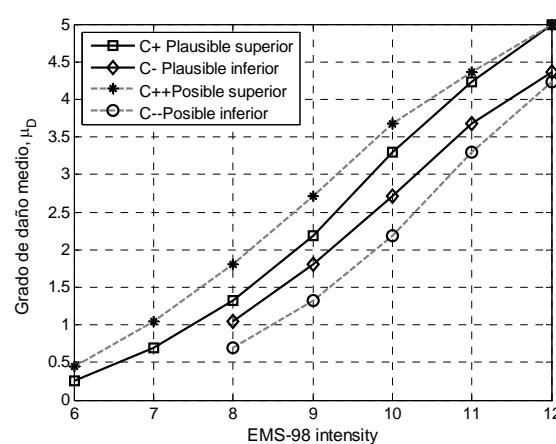
Nivel de daño	D1	D2	D3	D4	D5	μ_D
Cantidad de edificios	Muchos	Pocos				
B+ Plausible superior	32	10	1.87	0.15	0	0.684
B- Plausible inferior	20	4.34	0.6	0.04	0	0.435
B++ Posible superior	40.61	20	5.52	0.66	0	1.036
B- - Posible inferior	10	1.62	0.18	0	0	0.25

El procedimiento descrito anteriormente se repitió para el resto de las clases de vulnerabilidad, y se obtuvieron las curvas indicadas en la Figura 2-16. Particularmente, en la Figura 2-16 (a), es posible observar los valores del grado de daño que tienen mayor probabilidad de ocurrir en los edificios clase B, los cuales corresponden a aquellos valores delimitados por las curvas B plausible superior y B plausible inferior.

Al representar en el mismo gráfico las curvas de daño-intensidad plausibles y posibles para las clases de vulnerabilidad B y C, se obtiene la Figura 2-17, en la cual es posible observar, por ejemplo, que la curva plausible inferior de la clase B, coincide con la curva posible superior de la clase C, y que la curva posible inferior de la clase B coincide con la curva plausible superior C.



(a)



(b)

Figura 2-16. Curvas de daño sísmico-intensidad sísmica, plausibles y posibles para las clases de vulnerabilidad B (a), y para la clase de vulnerabilidad C (b).

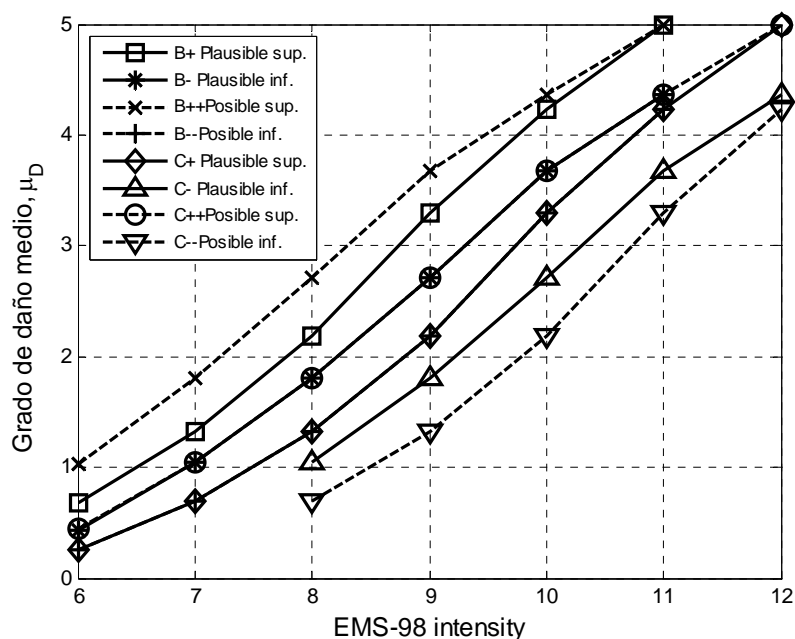


Figura 2-17. Curvas daño-intensidad plausibles y posibles para las clases de vulnerabilidad sísmica B y C.

B) Definición de las clases de vulnerabilidad propuestas en la escala EMS-98 mediante el uso de un índice de vulnerabilidad, el cual es un valor comprendido esencialmente entre 0 y 1. Para hacerlo, empleó la información contenida en la escala EMS-98 y la teoría de conjuntos difusos. Además, estableció que valores del índice de vulnerabilidad cercanos a cero significan baja vulnerabilidad, y valores cercanos a uno describen alta vulnerabilidad sísmica. Al realizar estas últimas consideraciones, Giovinazzi definió las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 en términos de índices de vulnerabilidad (Tabla 2-22).

Tabla 2-22. Definición de las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98, en términos de valores del índice de vulnerabilidad (Giovinazzi, 2005).

Clase de vulnerabilidad	V^{min}	V^-	V_0	V^+	V^{max}
A	0.78	0.86	0.90	0.94	1.02
B	0.62	0.70	0.74	0.78	0.86
C	0.46	0.54	0.58	0.62	0.70
D	0.30	0.38	0.42	0.46	0.54
E	0.14	0.22	0.26	0.30	0.38
F	-0.02	0.06	0.10	0.14	0.22

C) Determinación de la función de daño (Ec.1-2), a partir de las matrices de probabilidad de daño previamente estimadas. Dicha expresión analítica se obtuvo al interpolar curvas como las mostradas en la Figura 2-17, y con el propósito de facilitar la estimación del grado de daño medio.

La función obtenida depende principalmente del índice de vulnerabilidad total, y del grado de intensidad EMS-98. Adicionalmente, indicó el proceso para obtener la distribución de daño completa, a partir del grado de daño medio estimado, y mediante el empleo de una función de distribución de probabilidad tipo beta.

D) Estimación del índice de vulnerabilidad total que representa la vulnerabilidad sísmica de un edificio en particular.

Enseguida se describen las principales consideraciones y procedimientos que realizó Giovinazzi (2005), para poder definir la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, mediante el índice de vulnerabilidad total medio Ec. 1-1.

D.1) Determinó una tabla de índices de vulnerabilidad por tipología estructural, en la cual se incluye el valor más probable por tipología estructural (V_i^*). Dicho valor se emplea para estimar la vulnerabilidad total de cada edificio mediante la Ec. 1-1.

Los índices de vulnerabilidad total por tipología estructural los obtuvo principalmente a partir de la tabla de vulnerabilidad de la EMS-98 (Tabla 2-9), para diferentes tipos de edificios que se proponen en la escala EMS-98. Para hacerlo empleó nuevamente la teoría de conjuntos difusos, que le permitió obtener un valor estimado de V^- , V^+ , V^{\min} y V^{\max} para cada tipología estructural. Donde los valores de V^- y V^+ definen el intervalo de valores más probables o plausibles, y V^{\min} y V^{\max} amplían el intervalo de valores más probables, para considerar también los valores menos probables (Tabla 2-23).

D.2) Definió factores modificadores de la vulnerabilidad sísmica, y propuso las puntuaciones asociadas a los mismos. Dichas puntuaciones permiten estimar la suma de los modificadores de la vulnerabilidad sísmica ΔV_m , de cada edificio estudiado. El valor de ΔV_m se requiere en la Ec.1-1, para estimar el índice de vulnerabilidad total de cada edificio.

D.3) Definió el factor de vulnerabilidad regional, ΔV_R , e indicó un procedimiento para estimarlo. Dicho factor permite tomar en cuenta particularidades de las tipologías estructurales, y es parte de la expresión empleada para estimar la vulnerabilidad total de cada edificio estudiado (Ec.1-1).

D.4) Propuso incrementos de vulnerabilidad para considerar incertidumbres asociadas a la clasificación de los edificios, en determinada tipología estructural, y para tomar en cuenta las incertidumbres asociadas con la atribución de un comportamiento característico a cada clase de vulnerabilidad, o tipología del edificio.

Tabla 2-23. Valores del índice de vulnerabilidad para diferentes tipologías de edificios (Giovinnazzi, 2005).

Tipologías		Tipo de estructura	V^{\min}	Índices de vulnerabilidad			V^{\max}
				V^-	V_I^*	V^+	
Mampostería	M1	Cascotes, cantos rodados (Rubble stone)	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
	M2	Adobe -ladrillo de barro (Earth bricks)	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
	M3	Piedra simple (Simple stone)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M4	Piedra pesada y de gran tamaño (Massive stone)	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
	M5	Sin refuerzo -viejos tabique. (Unreinforced masonry -old bricks)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M6	Sin refuerzo- forjados de hormigón armado. (Unreinforced masonry – reinforced concrete -r.c- floors)	0.3	0.49	0.616	0.79	0.86
	M7	Reforzada/Confinada (Reinforced/confined masonry)	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
Hormigón Armado	RC1	Pórticos Sin Diseño Sismo Resistente [DSR] (Frame in r.c. without Earthquake Resistant Design-ERD)	0.3	0.49	0.644	0.8	1.02
	RC2	Pórticos con moderado DSR (Frame in r.c. - moderate E.R.D)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
	RC3	Pórticos con alto DSR (Frame in r.c.-high E.R.D)	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
	RC4	Muros de cortante sin DSR (Shear walls -without E.R.D.)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
	RC5	Muros de cortante con moderado DSR (Shear walls -moderate E.R.D.)	0.14	0.21	0.384	0.51	0.7
	RC6	Muros de cortante con alto DSR (Shear walls -high E.R.D.)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
Acero	S	Estructuras de acero (Steel structures)	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
Madera	W	Estructuras de Madera (Timber structures)	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Por lo tanto, de acuerdo con la propuesta desarrollada por Giovinnazzi (2005), el daño sísmico puede obtenerse mediante la aplicación del siguiente procedimiento simplificado: 1) elección de la acción sísmica expresada en términos de un grado EMS-98; 2) estimación del índice de vulnerabilidad total del edificio en estudio mediante la ecuación 1-1; 3) estimación del grado de daño sísmico medio del edificio, mediante la Ec.1-2, y a partir de la acción sísmica elegida en el paso 1, y del índice de vulnerabilidad total estimado en el paso 2. Por ejemplo, de acuerdo con la Ec.1-2, la coincidencia de un edificio con un índice de vulnerabilidad total igual a 0.742, es decir, un edificio con una alta vulnerabilidad sísmica, y la ocurrencia de un movimiento sísmico de intensidad 8 (VIII), generan un grado de daño medio en el edificio igual a 2; 4) Obtención de las probabilidades de daño de cada uno de los 5 grados de daño no nulo, y del grado de daño nulo. Para ello, se emplea el grado de daño sísmico medio estimado en el paso 3, y la función de distribución beta. Con la finalidad de simplificar los cálculos y emplear la función de distribución beta estándar, es posible obtener las expresiones 2-29 a la 2-34. Mediante estas últimas expresiones se pueden obtener las probabilidades de daño asociadas a cada uno de los estados de daño, definidos en la metodología propuesta por Giovinnazzi (2005).

La Ec. 2-29 corresponde a la función de densidad de probabilidad beta estándar, requerida para estimar la distribución del daño. Dicha ecuación coincide con la Ec. 2-22, sin embargo, se han hecho algunos cambios en la forma de representarla, con la finalidad de que la Ec. 2-29 coincida con la manera en que

con mayor frecuencia se representa a la función de densidad de probabilidad beta estándar, en herramientas de cómputo como el Matlab R2006a (The MathWorks, 2006), y con ello facilitar su aplicación en este tipo de herramientas de cómputo.

$$PDF : p_{D_k} \left(\frac{D_k + 1}{6}; p, q, 0, 1 \right) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} \left(\frac{D_k + 1}{6} \right)^{p-1} \left(1 - \frac{D_k + 1}{6} \right)^{q-1}; \quad 0 \leq \frac{D_k + 1}{6} \leq 1 \quad \mathbf{2-29}$$

donde Γ es la función gamma, D_k es el grado de daño y corresponde a un valor entre 0 y 5. Los valores de los parámetros p y q se obtienen mediante las ecuaciones 2-30 y 2-31.

$$p = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad \mathbf{2-30}$$

$$q = t - p \quad ; \quad t = 8 \quad \mathbf{2-31}$$

La Ec. 2-32 corresponde a la función de distribución acumulativa beta estándar, requerida para estimar la distribución acumulativa del daño.

$$CDF : P_{D_k} \left(\frac{D_k + 1}{6}; p, q, 0, 1 \right) = \int_0^{\frac{D_k + 1}{6}} p_{D_k} \left(\frac{D_k + 1}{6}; p, q, 0, 1 \right); \quad 0 \leq \frac{D_k + 1}{6} \leq 1 \quad \mathbf{2-32}$$

La función de densidad de probabilidad discreta beta, se calcula a partir de las probabilidades asociadas con los grados de daño D_k ($k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$), mediante la Ec. 2-33, para cuando $k = 0$, y la Ec. 2-34 para valores de $k = 1, 2, 3, 4$ ó 5 .

$$p_{D_k} = P_{D_k}(D_k = k) \quad \mathbf{2-33}$$

$$p_{D_k} = P_{D_k}(D_k = k) - P_{D_k}(D_k = k - 1) \quad \mathbf{2-34}$$

Por otra parte, las curvas de fragilidad que definen la probabilidad de alcanzar o exceder cierto estado de daño, se obtienen directamente de la función de distribución acumulativa beta, mediante la Ec. 2-35 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_{D_k}(D_k = k) \quad \mathbf{2-35}$$

Por ejemplo, para obtener la probabilidad de que se presente el grado de daño 3, dado un grado de daño medio de 2, es posible emplear las ecuaciones 2-30, 2-31, 2-32 y 2-34, hasta obtener el valor buscado (Ec. 2-36).

$$P_{D_{k=3}} = \int_0^{\frac{3+1}{6}} p_{D_k} \left(\frac{3+1}{6}; 0.423, 7.577, 0, 1 \right) - \int_0^{\frac{2+1}{6}} p_{D_k} \left(\frac{2+1}{6}; 0.423, 7.577, 0, 1 \right) = 0.2425 \quad 2-36$$

De manera similar, puede obtenerse la probabilidad asociada a cada uno de los diferentes estados de daño, hasta obtener una distribución discreta como la mostrada en la Figura 2-18, que corresponde a un grado de daño medio igual a 3.

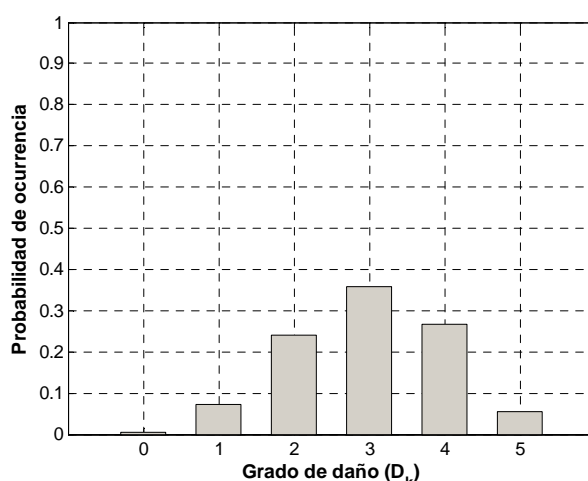


Figura 2-18. Probabilidades de ocurrencia para cada uno de los grados de daño D_k , definidos en la EMS-98 (Tabla 2-10), asociados a un grado de daño medio (μ_D) igual a 3.

HAZUS

Actualmente, el programa HAZUS (FEMA, 2009a; 2009b; 2009c; FEMA 433, 2004) integra diferentes metodologías, que permiten estimar diversos tipos de riesgo (sismos, inundaciones, huracanes), presentes en las zonas urbanas de Estados Unidos. Sin embargo, en el presente trabajo se harán principalmente referencias a las metodologías usadas en HAZUS para estimar riesgo sísmico.

Objetivo

Uno de los principales objetivos de la metodología HAZUS, es ofrecer una alternativa para estimar el riesgo sísmico de las zonas urbanas de Estados Unidos.

Metodología

En el proyecto de HAZUS establecieron la posibilidad de estimar el riesgo sísmico con diferentes niveles de detalle, en función de los datos y recursos destinados a la ejecución de la estimación del riesgo. Para que ello fuese posible, desde el inicio del proyecto establecieron una metodología basada en módulos, que permitiese la flexibilidad en el cálculo de los diferentes elementos que determinan el riesgo sísmico de una zona urbana. Por otra parte, la división en módulos facilita la incorporación de nuevos conocimientos

relacionados con la estimación del riesgo sísmico. Particularmente, en HAZUS consideran tres niveles de análisis. El de nivel 1 se basa en información básica sobre el peligro sísmico y sobre los edificios. El de nivel 2 incluye información más detallada sobre los edificios y sobre el peligro sísmico. Mientras que en el nivel 3 es necesario emplear información con alto nivel de detalle sobre el peligro sísmico y los edificios, y además el análisis de este nivel debe ser realizado por expertos en los modelos usados por HAZUS (FEMA, 2009a).

Acción sísmica

En la metodología HAZUS la acción sísmica básica se obtiene mediante escenarios sísmicos, o curvas de peligrosidad sísmica. Para el nivel 1 HAZUS propone emplear las curvas de peligrosidad sísmica, obtenidas por la USGS para Estados Unidos. Con la finalidad de estimar riesgo sísmico de edificios es necesario emplear la información de peligrosidad sísmica, para obtener curvas de demanda (espectros de demanda), con lo cual queda completamente determinada la acción sísmica. En HAZUS se establecen recomendaciones para obtener las curvas de demanda.

Vulnerabilidad sísmica

Para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios, HAZUS considera las curvas de capacidad que se han obtenido para determinadas tipologías estructurales. Por lo tanto, para estimar la vulnerabilidad sísmica de un edificio mediante la metodología HAZUS, es necesario clasificar a dicho edificio dentro de una de las tipologías estructurales definidas en HAZUS.

Funciones de daño

En HAZUS emplean curvas de fragilidad para estimar el daño sísmico. El proceso para obtener dichas curvas de fragilidad, es básicamente el procedimiento adoptado en el método LM2 de Risk-UE, el cual fue descrito en el capítulo 1 del presente trabajo. La metodología HAZUS predice el daño estructural y no estructural en términos de cuatro intervalos de daño no nulo o “estados de daño”: Ligero, Moderado, Extenso y Completo. En los documentos de HAZUS incluyen una descripción detallada de los cuatro estados de daño, asociados a 16 modelos básicos de edificios.

Riesgo sísmico

La intersección de las curvas de capacidad y demanda de cada tipo de edificio, determina un valor de desplazamiento espectral, el cual es empleado en la curva de fragilidad correspondiente al tipo de edificio, para obtener las probabilidades acumuladas de alcanzar o exceder un particular estado de daño. A partir de dichas probabilidades acumuladas, es posible determinar las probabilidades de que ocurra cada uno de los cinco estados de daño. Los costos de reparación y remplazo de un edificio que está en un estado de daño determinado, se estiman como el producto de la superficie del tipo de edificio, por la probabilidad

de que el edificio esté en dicho estado de daño, por el costo de reparación de cada pie cuadrado para el correspondiente tipo de edificio, y para el respectivo estado de daño.

En HAZUS incluyen estimaciones de las proporciones de las pérdidas económicas asociadas a los diferentes tipos de daño, y a los diferentes tipos de ocupación. Por ejemplo, consideran que en un edificio que tenga uso de vivienda unifamiliar, el 23.4% del costo total de reemplazo del edificio, corresponde a lo que costaría reponer los elementos estructurales de dicho edificio, si el mismo se dañase completamente (Estado de daño completo). Mientras que el restante 76.6% del costo total de reemplazo del edificio, corresponde a la reposición de los elementos no estructurales. Este tipo de consideraciones se requieren para estimar el riesgo sísmico en función de pérdidas económicas. El riesgo sísmico estimado mediante HAZUS se suele expresar en términos de pérdidas sísmicas anualizadas promedio. Para obtener dichas pérdidas económicas anualizadas proponen estimar pérdidas económicas asociadas a ocho escenarios sísmicos, los cuales a su vez están relacionados a ocho periodos de retorno (100, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000 y 2500 años). Para obtener las pérdidas sísmicas anualizadas promedio multiplican cada una de las pérdidas económicas asociadas a cada uno de los ocho escenarios sísmicos, por su respectiva probabilidad anual de ocurrencia, y finalmente suman dichos productos. Este procedimiento se empleó para obtener el mapa de pérdidas de la Figura 2-7.

2.5 Gestión del riesgo sísmico

Una vez que se conoce el riesgo sísmico de un edificio, los propietarios o administradores del riesgo pueden tomar diferentes decisiones. Las decisiones más comunes que ellos suelen tomar se indican en la lista siguiente (Krawinkler y Miranda, 2004): 1) vender el edificio; 2) demoler el edificio existente y construir uno nuevo; 3) aceptar enfrentar las pérdidas económicas, es decir, asumir la totalidad de los costos que pueden requerirse para reparar o reemplazar el edificio si se generan daños sísmicos en el edificio (retener el riesgo); 4) transferir una parte de las posibles pérdidas económicas a través de la adquisición de un seguro (transferir el riesgo); 5) reforzar el edificio para disminuir el nivel de las pérdidas (reducir el riesgo); 6) cualquier combinación de las opciones anteriores (Figura 2-19). Si las opciones de vender el edificio, demolerlo y construir otro, se descartan, entonces, las opciones para gestionar el riesgo se reducen a cualquier combinación entre retener el riesgo, transferir el riesgo y reducir el riesgo. Las principales combinaciones de estas tres opciones que idealmente se podrían elegir para gestionar el riesgo total de un edificio, se incluyen en la Figura 2-19. Sin embargo, las opciones 1 y 2 de la Figura 2-19 no son estrictamente factibles porque habitualmente las pólizas de seguros cubren sólo una parte de la totalidad del daño sísmico que puede ocurrir en un edificio y, porque a la fecha no es posible hacer una reducción del 100% del riesgo sísmico de un edificio (Liel, 2008).

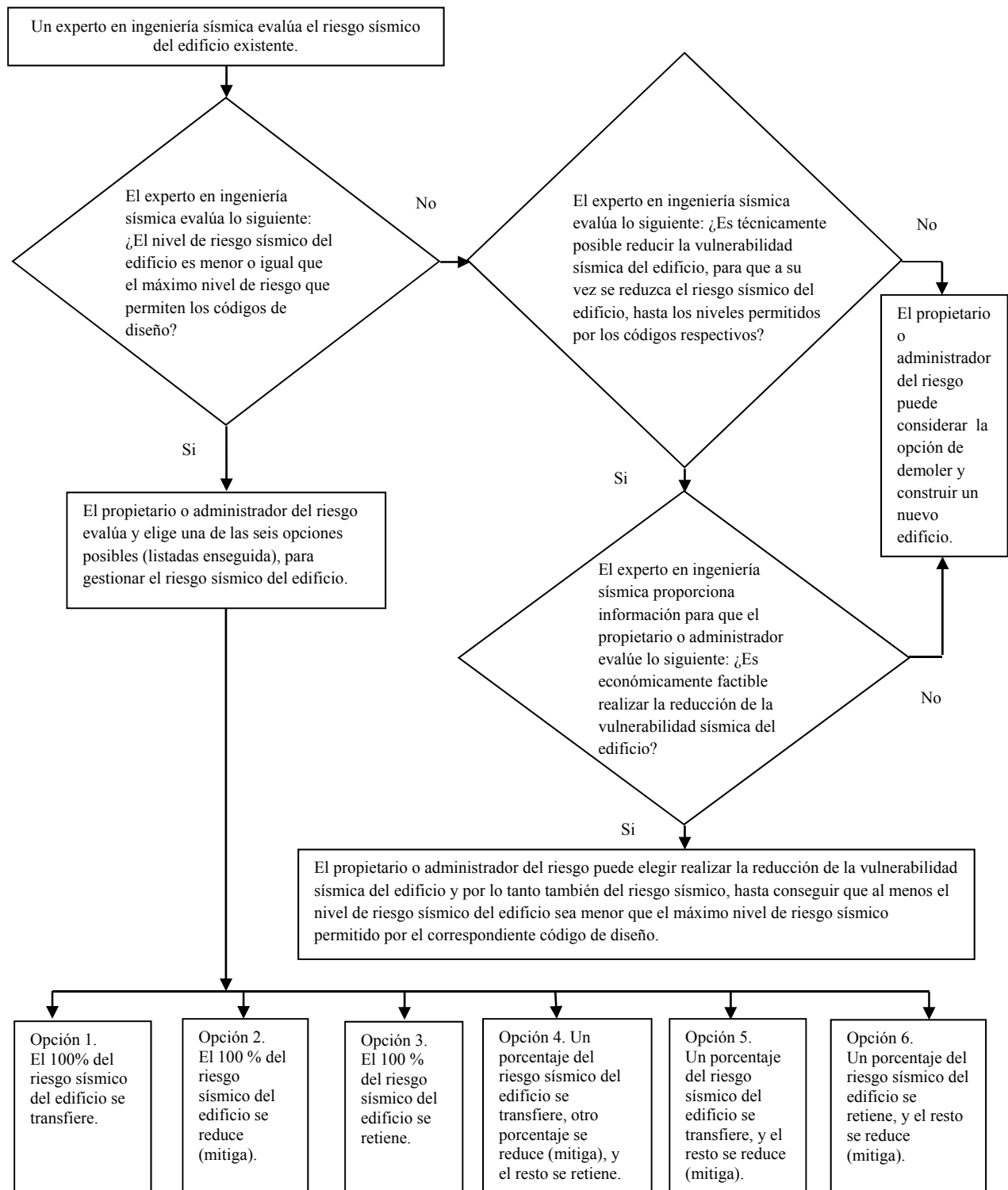


Figura 2-19. Pasos de un procedimiento que puede emplearse para gestionar el riesgo sísmico de un edificio existente (adaptado de Krawinkler y Miranda, 2004).

2.5.1 Criterios de aceptabilidad del riesgo

Cuando el riesgo es expresado en términos de frecuencia anual de ocurrencia o excedencia, es posible tomar decisiones asociadas a dicho riesgo. Por ejemplo, de acuerdo con McGuire (2004) “cuando la frecuencia anual de ocurrencia del riesgo es menor que 10^{-5} por año (como es el caso para el daño sísmico en muchas partes del mundo), dicho riesgo es frecuentemente considerado minúsculo en comparación con otros riesgos y puede ser ignorado (un evento que tiene una frecuencia anual de ocurrencia de 10^{-5} por año, es un evento que tiene un periodo de retorno promedio de 100 000 años). Para ejemplificar esta situación McGuire señala que el riesgo promedio de muerte individual debida a un fenómeno climático extremo (huracán, inundaciones, etc.), para la gente del centro y del este de Estados Unidos es cercana a 5×10^{-6} por año, y sin embargo, dicha gente continúa viviendo en áreas susceptibles de inundaciones y vientos.” McGuire (2004) agrega también que: “cuando la frecuencia anual del riesgo excede 10^{-2} (la frecuencia anual de muerte en países desarrollados para un ciudadano típico), se considera demasiado alto, y se realizan esfuerzos para reducirlo. Pero cuando los valores de la frecuencia anual están comprendidos entre 10^{-2} y 10^{-5} , se necesita realizar un cuidadoso análisis cualitativo, para evitar poner un porcentaje demasiado grande o demasiado pequeño, en los recursos destinados a la reducción del daño sísmico, en comparación con los destinados a la reducción de otros tipos de riesgos posibles”. Éstas mismas afirmaciones de McGuire (2004) se muestran en forma simplificada en la Figura 2-20.

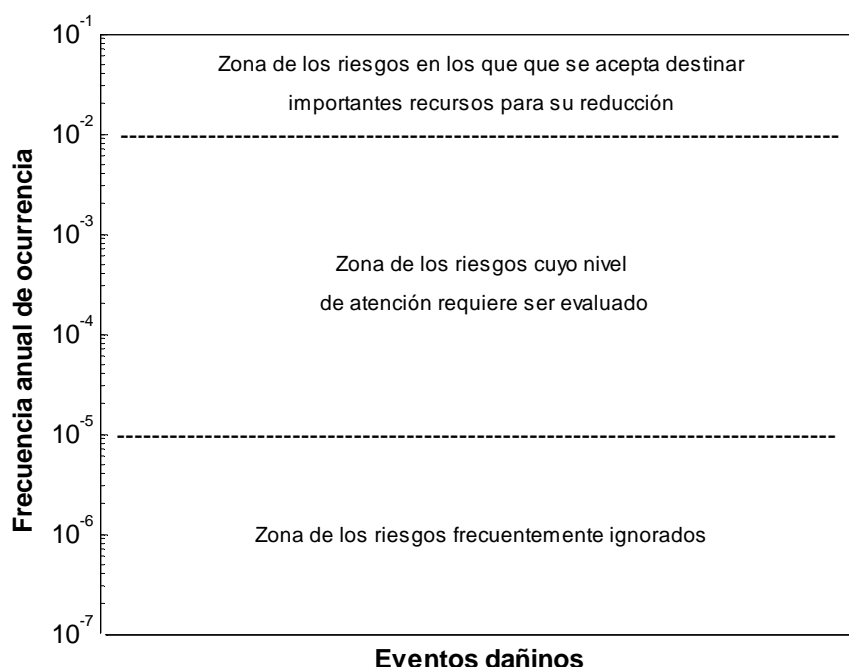


Figura 2-20. Nivel de atención que frecuentemente se destina a los riesgos, en función de su frecuencia anual de ocurrencia (McGuire, 2004).

Por otra parte, los códigos de diseño sísmico suelen establecer las condiciones mínimas que deben cumplir los edificios, para que tales edificios posean importantes probabilidades de tener un adecuado comportamiento durante la ocurrencia de sismos. Por lo tanto, cuando los creadores de los códigos de diseño sísmico eligen las condiciones mínimas que deben cumplir los edificios, están eligiendo en gran medida, los niveles aceptables de riesgo sísmico.

Dada la importancia del riesgo sísmico en edificios se han desarrollado importantes esfuerzos, orientados a conseguir una mejor estimación y comunicación del riesgo sísmico de edificios nuevos, y de edificios existentes, que contribuya a mejorar la toma de decisiones relacionadas con dicho riesgo (ATC-71, 2008; FEMA 389, 2004; ATC-58-1, 2002).

2.5.2 Mitigación del riesgo sísmico de edificios

En ocasiones es posible reducir el riesgo sísmico de un edificio, mediante la reducción de la vulnerabilidad sísmica de dicho edificio. Específicamente, a veces es posible, por ejemplo, realizar modificaciones en la estructura del edificio que contribuyan a mejorar su comportamiento sísmico, lo que equivale a reducir su vulnerabilidad sísmica. La reducción del riesgo sísmico puede realizarse en diferentes niveles, por ejemplo, es posible: a) conseguir la reducción de una parte del riesgo de que se presente daño estructural (FEMA P-420, 2009; FEMA 547, 2006; FEMA 356, 2000) (Tabla 2-24); b) reducir una parte del riesgo de que ocurra daño no estructural (ATC-69, 2008; FEMA 74, 1994) o; c) reducir una parte del riesgo de que se presenten ambos tipos de daño sísmico. Es importante destacar que en ocasiones es posible hacer reducciones significativas del riesgo, sin destinar grandes recursos económicos para tal fin (FEMA P-420, 2009; FEMA 74, 1994).

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los edificios existentes fueron diseñados con códigos sísmicos, que ya han sido sustituidos por otros códigos sísmicos, los cuales se han realizado con el objetivo de conseguir mejores comportamientos sísmicos de los edificios. De manera que en general, cuando se emplean los códigos de diseño sísmico actuales, se aumentan también, las probabilidades de que los edificios tengan un adecuado comportamiento sísmico. Sin embargo, como también se mencionó anteriormente, el asunto financiero constituye una limitante para incluir las nuevas recomendaciones de diseño sísmico en los edificios existentes. Por tal motivo, es necesario establecer diferente tipo de estrategias que permitan disminuir la vulnerabilidad sísmica de los edificios existentes.

Con la finalidad de ayudar en las tareas de mitigación se generan diferentes tipos de normas sísmicas, por ejemplo, hay códigos de diseño sísmico específicos para edificios existentes, y tales códigos pueden ser usados por los dueños interesados en reducir voluntariamente la vulnerabilidad sísmica de sus edificios. Sin embargo, también hay normas orientadas a solicitar a los dueños o usuarios de determinados edificios

que reduzcan la vulnerabilidad sísmica de sus edificios con acciones específicas. En la Tabla 2-24 se indican algunas de las normas específicas que tienen entre sus objetivos contribuir a reducir la vulnerabilidad sísmica de los edificios.

Tabla 2-24. Normas y documentos que tienen como uno de sus principales objetivos, contribuir a la adecuada reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes.

Normas y documentos	Objetivo general	Objetivos particulares
Decreto Piso Débil para la ciudad de Berkeley, California (City of Berkeley, 2005).	Reducir la vulnerabilidad sísmica de edificios con piso débil.	a) Identificar los edificios de pórticos de madera que tienen piso débil. b) Notificar a los usuarios, residentes y usuarios de tales edificios para que realicen un análisis sísmico de su edificio basándose en el Código Internacional de Edificios Existentes (IEBC, 2009).
NISTIR-6762, Normas de seguridad sísmica para edificios existentes que son propiedad Federal o que son alquilados por la Federación [<i>Standards of Seismic Safety for Existing Federally Owned and Leased Buildings</i>] (Cauffman y Lew, 2002).	Establecer los requerimientos mínimos de seguridad sísmica que deben cumplir los edificios de Estados Unidos que tienen uso Federal.	a) Indicar los niveles mínimos de desempeño sísmico que deben cumplir los edificios. b) Señalar los códigos y procedimientos que pueden emplearse para tener edificios, que cumplan con los niveles de desempeño sísmico requeridos.
FEMA 356, Pre-Norma y comentarios para la rehabilitación sísmica de edificios [<i>FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings</i>] (FEMA 356, 2000).	Promover la amplia aplicación de las Guías NEHRP para la Rehabilitación Sísmica de Edificios, (FEMA 273, 1997), mediante la conversión de las mismas a un lenguaje de obligatoriedad. Lo cual permitiría que profesionales y autoridades relacionadas con los edificios, pudiesen tener a su disposición una referencia más específica para aumentar la resistencia sísmica de los edificios existentes.	Indicar requerimientos técnicos para mejorar el desempeño sísmico, de los edificios existentes que sean rehabilitados de acuerdo con esta norma.
FEMA P-420, Directrices de ingeniería para la rehabilitación sísmica de edificios (FEMA P-420, 2009).	Promover el uso de la rehabilitación sísmica progresiva como una alternativa a la rehabilitación sísmica en una sola etapa, con la finalidad de que el costo inicial y las pérdidas de un edificio de uso normal, no sean usados como un obstáculo para invertir en rehabilitación sísmica.	Apoyar a los profesionales del diseño que están implementando o promoviendo el uso de rehabilitaciones sísmicas progresivas.
FEMA 547, Técnicas para la rehabilitación sísmica de edificios existentes (FEMA 547, 2006).	Proveer una selección de técnicas de rehabilitación sísmica que son prácticas y efectivas.	Facilitar a ingenieros, arquitectos y administradores de proyecto de la descripción de técnicas de rehabilitación comúnmente usadas para varios tipos de edificios.
ATC-71, Taller NEHRP para identificar los desafíos relacionados con los edificios existentes (ATC-71, 2008).	Establecer un diagnóstico sobre la problemática asociada a la rehabilitación sísmica de edificios existentes, porque se reconoce que dicha problemática aún no es atendida adecuadamente.	

2.6 Estudios previos del riesgo sísmico de Barcelona

En años recientes se han desarrollado importantes estudios relacionados con el riesgo sísmico de Barcelona, algunos de los cuales se indican en la Tabla 2-25.

Tabla 2-25. Estudios relacionados con la estimación del riesgo sísmico de Barcelona.

Nombre del estudio	Principales aportaciones relacionadas con el riesgo sísmico de edificios en Barcelona
Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona (Lantada, 2007; Barbat et al, 2006a; Barbat et al, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Se generó una valiosa base de datos con información de los edificios de Barcelona actualizada hasta el año 2002. - Se estimó el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona mediante las metodologías LM1 y LM2 de Risk-UE. Esto último significó que para la realización del estudio se emplearon resultados de investigaciones hechas específicamente para edificios de Barcelona, y que además se tuvo la asesoría de un destacado grupo de investigadores con valiosa experiencia en la estimación de la peligrosidad sísmica de Barcelona, y el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona. - Se emplearon sistemas de información geográfica para facilitar los procesos de estimación de la vulnerabilidad sísmica, y el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona.
Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona (Moreno, 2006.)	<ul style="list-style-type: none"> -Realizó análisis no lineal a tipologías estructurales representativas de Barcelona, considerando diferentes escenarios sísmicos. -Estimó curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para edificios de hormigón armado y de mampostería.
An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban system of Barcelona (Irizarry, 2004).	<ul style="list-style-type: none"> -Estudió la peligrosidad sísmica de Barcelona considerando efectos locales. -Estimó la vulnerabilidad sísmica de edificaciones que son parte del patrimonio cultural de Barcelona.
Risk-UE-WP08 Application to Barcelona (ICC/CIMNE, 2004).	-Obtuvieron escenarios de riesgo sísmico para Barcelona, los cuales se estimaron mediante los dos métodos propuestos por Risk-UE, el método de nivel I ó LM1 y el método LM2 o de nivel II.
Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios (Bonett, 2003).	-Realizó análisis no lineal a edificios tipo de Barcelona para obtener curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.
Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas (Mena, 2002; Pujades et al, 2000).	<ul style="list-style-type: none"> -Recopilaron datos básicos de los edificios de Barcelona estudiados, y los adaptaron para su manejo en un sistema de información geográfica. -Consideraron los datos de cada edificio para estimar el riesgo sísmico de Barcelona (año de construcción, materiales de construcción). -Utilizaron el método del índice de vulnerabilidad, para obtener un índice de vulnerabilidad sísmica para cada edificio estudiado a partir de 11 parámetros considerados. El índice de vulnerabilidad se representa con un número entre 0 y 100. -Obtuvieron mapas de vulnerabilidad sísmica por barrios y distritos de Barcelona. -Obtuvieron escenarios de daño sísmico medio para diferentes grados de intensidad MSK. Particularmente, para los grados VI, VII, VIII y IX. El daño sísmico se expresó en términos de un índice de daño el cual fue un valor entre 0 y 100. Además, consideraron los 6 estados de daño siguientes: Ninguno (0-2.5); Ligero (2.5-7.5); Moderado (7.5-15); Considerable (15-30); Fuerte (30-60); Severo (60-100).
Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación (Yépez, 1996; Barbat et al, 1998).	<ul style="list-style-type: none"> -Usaron el método del índice de vulnerabilidad, para estimar la vulnerabilidad sísmica de grupos de edificios localizados en el barrio del Eixample en Barcelona. -Obtuvieron mapas de vulnerabilidad de los edificios del sector estudiado. -Estimaron 4 escenarios de daño sísmico asociados a la ocurrencia de los grados VI, VII, VIII y IX de la escala MSK, respectivamente. El daño se expresó en términos de un índice de daño de 0 a 100. -Calcularon curvas de riesgo sísmico de tipologías estructurales representativas del Eixample, en términos de índice de daño versus frecuencia anual de ocurrencia.

Además de los estudios indicados en la Tabla 2-25, se han realizado trabajos en los cuales se abordaron diferentes aspectos del riesgo sísmico de Barcelona (Irizarry et al, 2010; Barbat et al, 2009; Barbat et al, 2006b; Irizarry et al, 2003a; Pujades et al, 2000). De manera que es posible concluir que son muy importantes los trabajos que se han realizado respecto al riesgo sísmico de Barcelona.

Por otra parte, debido a que en el estudio de Lantada (2007) estimó el riesgo sísmico de Barcelona mediante la metodología LM1 de Risk-UE, tal estudio es una referencia fundamental para el presente trabajo. De acuerdo con los resultados de dicho estudio, la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona no es homogénea en sus diferentes distritos, siendo en general, los distritos más vulnerables aquellos que tienen en promedio los edificios más antiguos. Además de estimar la vulnerabilidad sísmica, obtuvo los valores del grado de daño medio esperado (DS_m) mediante la Ec. 1-4, para cada distrito de Barcelona (Tabla 2-26). Dichos valores se obtuvieron al considerar los edificios residenciales de cada uno de los distritos de Barcelona y al tomar en cuenta dos escenarios sísmicos. El primer escenario sísmico corresponde al caso determinista y se caracteriza por tener una intensidad mínima del grado VI (EMS-98) y una intensidad macrosísmica máxima de VII-VIII. En este caso las intensidades superiores al grado VI surgen al considerar efectos de suelo. El segundo escenario sísmico corresponde al caso probabilista, el cual está asociado a un periodo de retorno de 475 años y se caracteriza por tener intensidades macrosísmicas que van desde VI-VII hasta un valor de VII (Lantada, 2007).

Tabla 2-26. Grados de daño medio esperado por distrito en Barcelona, obtenidos al aplicar la metodología LM1 de Risk-UE y al considerar dos escenarios sísmicos (Lantada et al, 2010).

No.	Distrito	Grado de daño medio esperado (DS_m)	
		Escenario sísmico	
		Determinista	Probabilista
01	Ciutat Vella	2.43	2.45
02	Eixample	2.00	2.03
03	Sants-Montjuïc	1.33	1.73
04	Les Corts	1.20	1.34
05	Sarrià-Sant Gervasi	1.37	1.37
06	Gràcia	1.61	1.61
07	Horta-Guinardó	1.31	1.16
08	Nou Barris	1.67	1.27
09	Sant Andreu	1.76	1.39
10	Sant Martí	1.73	1.70
Valores medios		1.64	1.61

De acuerdo con los resultados obtenidos por Lantada et al (2010) el grado de daño medio esperado para el distrito del Eixample, varía entre 2 y 2.03, según se considere el escenario sísmico determinista o el probabilista. Es decir, se estima que en el distrito del Eixample se presentará en promedio el daño moderado si ocurre el escenario sísmico que tiene un periodo de retorno de 475 años.

En función de los resultados de la Tabla 2-26, y de los obtenidos a diferentes escalas para los edificios de Barcelona por Lantada (2007), es posible señalar que existen niveles significativos de riesgo sísmico en ciertos edificios de la ciudad de Barcelona. Dichos niveles significativos de riesgo se deben, en general, a edificios que en promedio tienen una alta vulnerabilidad sísmica y que están localizados en una región de peligrosidad sísmica moderada (Irizarry et al, 2010; Lantada, 2007; Lantada et al, 2010).

2.7 Resumen y conclusión

En este capítulo se han descrito conceptos básicos relacionados con la estimación del riesgo sísmico de edificios. Se ha hecho especial énfasis en metodologías para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, particularmente, se han descrito las principales características de la metodología del ATC-13 (1985), de la metodología de HAZUS (FEMA 433, 2004; FEMA, 2009a), y de las metodologías LM1 y LM2 de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Por otra parte, se ha destacado que el proceso de gestión del riesgo sísmico de edificios involucra la toma de decisiones importantes, y las mismas se basan en gran medida en la información disponible sobre el riesgo sísmico de los edificios. De manera que los resultados de riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia de grados de daño, son información que puede contribuir a realizar una adecuada gestión del riesgo sísmico de los edificios.

Los estudios previos del riesgo sísmico de Barcelona que se mencionaron en el presente capítulo, son ejemplos, de la valiosa información que se dispone sobre la ciudad. Sin embargo, en general, los estudios recientes del riesgo sísmico de los edificios de Barcelona han tenido como objetivo estimar escenarios de riesgo sísmico para diversos escenarios. El escenario probabilista considerado corresponde al movimiento del suelo con un periodo de retorno de 475 años. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta la fecha siguen teniendo un enfoque determinista, en el sentido que deben entenderse como los valores medios esperados sin considerar las incertidumbres involucradas. Por lo tanto, una información que puede contribuir a complementar los valiosos resultados existentes es la obtención de curvas probabilistas del riesgo sísmico de los edificios de Barcelona.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA PROBABILISTA PARA ESTIMAR EL RIESGO SÍSMICO DE EDIFICIOS EN ZONAS URBANAS

3.1 Introducción

Una de las formas de describir el riesgo sísmico de edificios es mediante la llamada curva de excedencia del daño o de las pérdidas. Dicha curva establece las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de daño o de pérdidas (McGuire, 2004; ERN, 2009). Se propone aquí una extensión del método LM1 de Risk-UE (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006; Giovinazzi et al, 2006; Giovinazzi, 2005; Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Bernardini y Lagomarsino, 2008). Este método, al que llamaremos LM1_P incluye nuevos elementos que permiten hacer estimaciones del riesgo sísmico con un enfoque probabilista. Este capítulo se dedica a describir las principales características de este método que constituye la principal contribución de esta Tesis.

3.2 Modelo probabilista

En la metodología LM1_P el riesgo sísmico de cada edificio se estima al considerar los tres elementos siguientes:

1. La peligrosidad sísmica del sitio en el que se encuentra el edificio, la cual está expresada en términos de frecuencias anuales de excedencia de intensidades macrosísmicas. La peligrosidad sísmica puede representarse a través de una curva única o mediante un trío de curvas de las frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas (Figura 3-1, 1);
2. La vulnerabilidad sísmica del edificio, la cual está expresada en términos de probabilidades de ocurrencia del índice de vulnerabilidad V (Figura 3-1, 2);
3. La función de daño, la cual está representada en términos de funciones que describen la variación del daño sísmico en el edificio, en función de la intensidad macrosísmica y del índice de vulnerabilidad sísmica (Figura 3-1, 3).

Los tres elementos listados anteriormente se emplean en la Ec. 3-1, para obtener el riesgo sísmico de cada edificio en términos de frecuencias anuales de excedencia de estados de daño sísmico (Figura 3-1,4). La Ec. 3-1 se desarrolló al tomar en cuenta el teorema de la probabilidad total y al considerar que tanto el índice de vulnerabilidad (V) como la intensidad macrosísmica (I) son variables aleatorias independientes.

$$\nu[D] = \sum_I \sum_V P[D > D_k | V, I] P[V] \gamma'[I]$$

3-1

donde $\nu[D]$ es la frecuencia anual de excedencia del grado de daño D ; $\gamma'[I]$ es la frecuencia anual de ocurrencia de la intensidad macrosísmica I (McGuire, 2004); $P[V]$ es la probabilidad de que la vulnerabilidad sísmica del edificio sea igual a V ; $P[D > D_k | V, I]$ es la probabilidad de que se exceda el grado de daño D_k ($k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$), dado que un edificio con una vulnerabilidad sísmica V fue sometido a una intensidad macrosísmica I . El inverso de $\nu[D]$ es el periodo de retorno del grado de daño D .

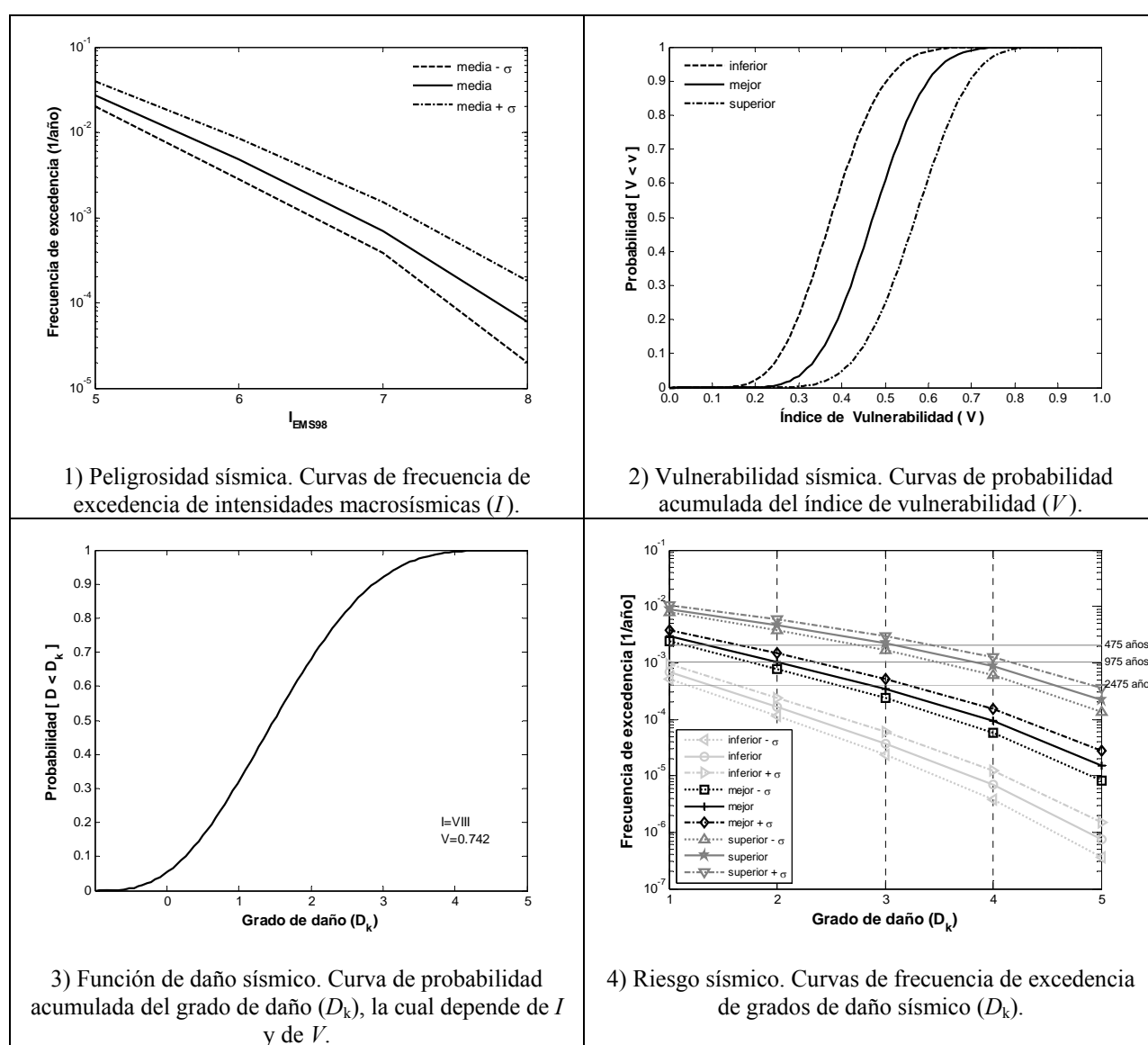


Figura 3-1. Elementos empleados en la metodología LM1_P para estimar el riesgo sísmico de edificios (1,2,3), y ejemplo de los resultados de riesgo sísmico que se obtienen al aplicar dicha metodología (4).

3.3 Estimación de la peligrosidad sísmica

Para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P se emplean resultados de peligrosidad sísmica, expresados en términos de frecuencias anuales de excedencia de las intensidades macrosísmicas (Figura 3-1, 1). Estos valores de la peligrosidad sísmica permiten estimar las frecuencias anuales de ocurrencia de las intensidades sísmicas $(\gamma'[I])$, requeridas para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la Ec. 3-1.

En la metodología LM1_P se estima la peligrosidad sísmica mediante el código para ordenador CRISIS (Ordaz et al, 2008; 2007; 2003; 1999), que incorpora y actualiza el método clásico de Cornell-Esteva (McGuire, 2008; Esteva, 1970; Cornell, 1968), el cual se puede representar mediante la Ec. 3-2 (Beauval, 2003). El código CRISIS se ha adoptado en la metodología LM1_P porque ha sido ampliamente validado (Irizarry et al, 2010; Villani et al, 2010; García, 2009; Secanell et al, 2008; Perea y Atakan, 2007; Faccioli, 2006; Beauval, 2003), y porque ha sido elegido en el proyecto de Risk-UE para estimar escenarios probabilistas de la peligrosidad sísmica (Faccioli et al, 2003). En el caso del CRISIS las integrales respecto a la magnitud y la distancia de la Ec. 3-2 se discretizan para obtener la Ec. 3-3.

$$\gamma(A^*) = \sum_{i=1}^N \lambda_{0_i} \int_{M_{\min_i}}^{M_{\max_i}} \int_R P[A > A^* | M, R] f_{M_i}(M) f_{R_i}(R) dM dR \quad 3-2$$

donde A es un parámetro indicativo de las características del movimiento sísmico (por ejemplo, aceleración máxima del terreno o intensidad macrosísmica), y A^* es un valor específico de A ; $\gamma(A^*)$ es la frecuencia anual con que A^* es excedida debido a los sismos de las fuentes sísmicas consideradas; λ_{0_i} es la tasa anual de excedencia de los sismos de interés en la fuente sísmica i , dicha tasa corresponde a los sismos de magnitud superior o igual a la magnitud mínima elegida para la fuente i (M_{\min_i}); $f_{M_i}(M)$ y $f_{R_i}(R)$ son las funciones de densidad de probabilidad de la magnitud y de la distancia de la fuente i , en las que se considera que la magnitud y la distancia son independientes; $P[A > A^* | M, R]$ es la probabilidad de que un sismo de magnitud M a la distancia R del sitio exceda el valor de A^* , dicha probabilidad se calcula mediante la ley de atenuación sísmica en función de la distancia R y de la magnitud M ; M_{\max_i} es la magnitud sísmica máxima considerada en la fuente sísmica i y N es el número de fuentes sísmicas.

$$\gamma(A^*) = \sum_{i=1}^N \lambda_{0_i} \sum_{M_{\min_i}}^{M_{\max_i}} \sum_R P[A > A^* | M, R] f_{M_i}(M) f_{R_i}(R) \Delta M \Delta R \quad 3-3$$

Las frecuencias de excedencia de A^* obtenidas mediante la Ec. 3-3 permiten generar curvas de peligrosidad sísmica como las de la Figura 2-11 y de la Figura 3-1,1.

3.3.1 Modelo de recurrencia sísmica

Cuando en el CRISIS se considera el modelo de sismicidad denominado de Poisson, entonces la tasa de excedencia de la magnitud sísmica está dada por la Ec. 3-4 (Ordaz et al, 2008; 2007).

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_{\max}}}{e^{-\beta M_{\min}} - e^{-\beta M_{\max}}} \quad 3-4$$

donde λ_0 es la tasa de excedencia de la magnitud M_{\min} , β es un parámetro equivalente al “valor- b ” de la relación Gutenberg-Richter (Ec. 3-5) para la fuente sísmica (excepto porque dicho parámetro está dado en términos del logaritmo natural), y M_{\max} es la máxima magnitud para la fuente sísmica.

$$\log_{10} N = a - bM \quad 3-5$$

donde N es el número de sismos con magnitud mayor o igual a M ; a es el número de sismos de magnitud mayor que M_{\min} ; b es la pendiente de la línea (llamado valor- b). La Ec. 3-5 puede formularse de la forma que se indica en la Ec. 3-6.

$$\lambda_M = e^{\alpha - \beta M} \quad 3-6$$

donde $\alpha = a \ln 10$ y $\beta = b \ln 10$. Por otra parte, debido a que suelen considerarse los sismos a partir de una magnitud mínima (M_{\min}), es más práctico expresar la tasa de excedencia de la magnitud de la forma que se indica en la Ec. 3-7.

$$\lambda_M = \lambda_0 e^{-\beta(M - M_{\min})} \quad 3-7$$

$$\text{donde } \lambda_0 = e^{\alpha - \beta M_{\min}}.$$

En relación al mismo caso en que se considera el modelo de sismicidad tipo Poisson, se tiene que la función de densidad de probabilidad de la magnitud sísmica está dada por la Ec. 3-8 (Ordaz et al, 2008; 2007).

$$f_{M_i}(M) = \beta \frac{e^{-\beta M}}{e^{-\beta M_{\min}} - e^{-\beta M_{\max}}}, M_{\min} \leq M \leq M_{\max} \quad 3-8$$

3.3.2 Modelo de atenuación sísmica

Las leyes de atenuación sísmica permiten estimar la probabilidad de que el valor de A^* se exceda en el sitio de interés, dado que ocurre un sismo de magnitud M a una distancia R del sitio. Si se considera que el parámetro de peligrosidad sísmica A tienen una distribución lognormal, dadas la magnitud y la distancia, entonces, la probabilidad $P[A > A^* | M, R]$ se calcula mediante la Ec. 3-9.

$$P[A > A^* | M, R] = 1 - \Phi \left[\frac{\ln A^* - \ln Am(M, R)}{\sigma_{\ln A}} \right] \quad 3-9$$

donde Φ es la distribución de probabilidad normal estándar acumulada; $Am(M, R)$ es el valor medio del parámetro de peligrosidad sísmica A (dada por la ley de atenuación correspondiente en función de la magnitud M y la distancia R); $\sigma_{\ln A}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de A (Ordaz et al, 2007). La probabilidad representada en la Ec. 3-9, para el caso en el que $M=M^*$ y $R=R^*$ corresponde a la superficie sombreada bajo la curva de la Figura 3-2.

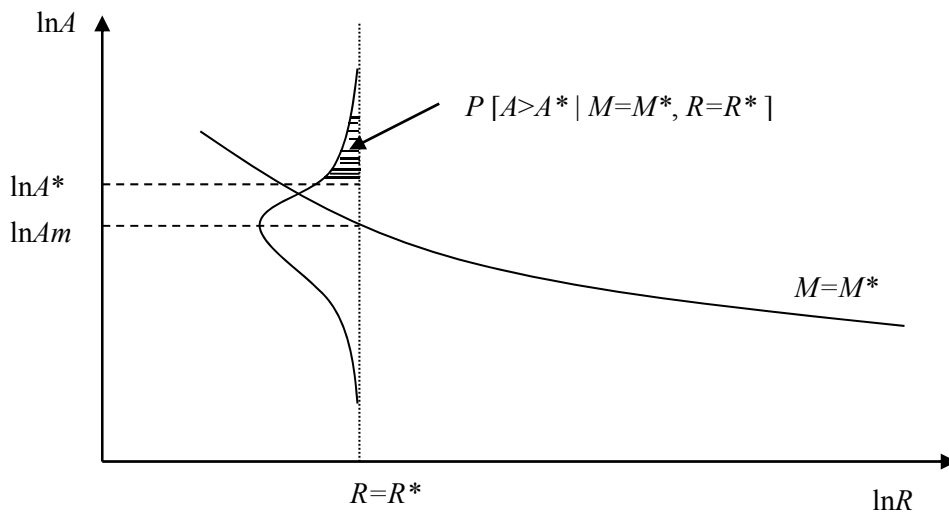


Figura 3-2. Estimación de la probabilidad de excedencia del parámetro de peligrosidad sísmica A^* , a partir de la ley de atenuación sísmica, para el caso en el que la magnitud M es igual a M^* y la distancia R es igual a R^* (adaptado de Beauval, 2003).

3.3.3 Frecuencias de excedencia del parámetro de peligrosidad sísmica A^*

Si se considera que el proceso de ocurrencia de los sismos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces, la probabilidad de que el parámetro de peligrosidad sísmica A^* ocurra al menos una vez en un lapso t se puede calcular mediante la Ec. 3-10 (McGuire, 2004).

$$P = 1 - e^{(-\gamma t)} \quad 3-10$$

donde P es la probabilidad de que ocurra el parámetro de peligrosidad sísmica A^* ; t es el tiempo de exposición; γ es la frecuencia de excedencia del parámetro de peligrosidad sísmica A^* .

La Ec. 3-10 puede describirse como la Ec. 3-11, y al aplicarla es posible estimar por ejemplo, que el valor de la frecuencia de excedencia para un sismo que tiene una probabilidad del 10% de excederse en 50 años, es igual a 0.0021. A esta frecuencia de excedencia le corresponde un periodo de retorno de 475 años (1/0.0021).

$$\gamma = -\frac{\ln(1-P)}{t} \quad 3-11$$

3.3.4 Resultados de peligrosidad sísmica para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P

La peligrosidad sísmica de un sitio requerida para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P, se puede representar mediante una curva de peligrosidad o mediante tres curvas de peligrosidad. Por ejemplo, en el caso de la estimación del riesgo sísmico de edificios en Barcelona la peligrosidad puede considerarse mediante la curva de la Figura 3-3, o por medio de las curvas de la Figura 3-4. La curva de la Figura 3-3 se obtuvo mediante el código CRISIS2008 y en el capítulo 5 se mencionan con detalle los datos y las consideraciones realizadas para su obtención. Mientras que las curvas de la Figura 3-4 se obtuvieron a partir de las curvas de peligrosidad sísmica estimadas por Secanell et al (2004). En el capítulo 5 se menciona también información adicional respecto a las curvas de peligrosidad de la Figura 3-4. Tanto la curva de peligrosidad de la Figura 3-3, como las curvas de peligrosidad de la Figura 3-4 son utilizadas en el presente apartado, para realizar un ejemplo de aplicación de la metodología LM1_P, en el que se estima el riesgo sísmico de dos edificios de Barcelona, cuyos datos se indican en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Datos de dos edificios en Barcelona.

Datos	Edificio BCN1	Edificio BCN2
1. Tipología estructural.	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado.	Pórticos de hormigón irregulares con muros de relleno de mampostería no reforzada.
2. Factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural.	8	5
3. Estado de conservación.	Malo	Bueno
4. Número de niveles.	6	3
5. Fecha de construcción.	1965	1975
6. Terreno.	Roca	Roca

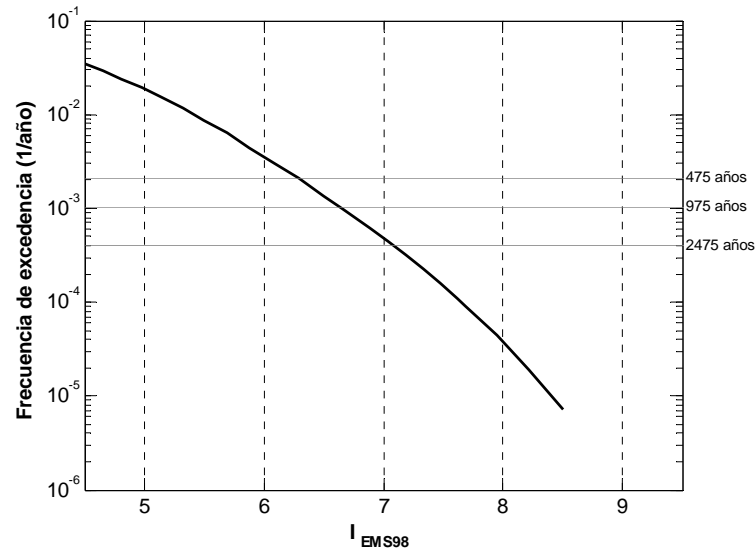


Figura 3-3. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas, obtenida mediante el CRISIS2008.

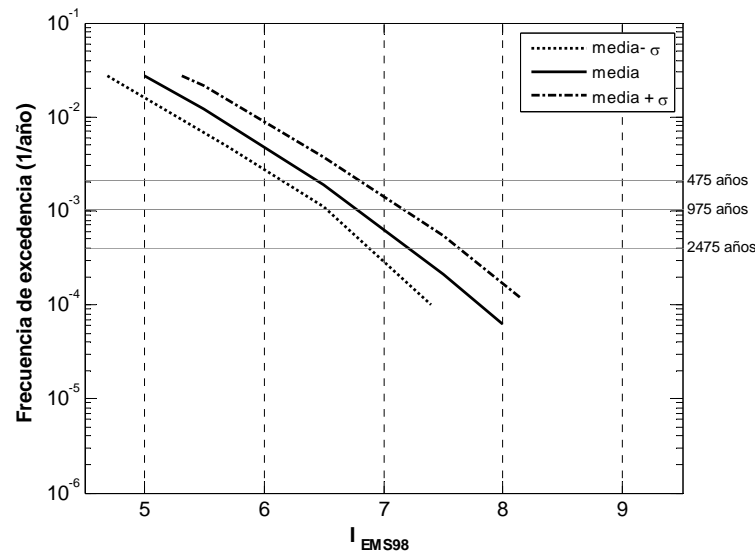


Figura 3-4. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas (adaptadas de Secanell et al, 2004).

Las frecuencias de ocurrencia de las intensidades macrosísmicas (γ') requeridas para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la Ec. 3-1, se obtienen de curvas como las de la Figura 3-3 y la Figura 3-4, que expresan la peligrosidad sísmica en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas (γ) (McGuire, 2004). En la Ec. 3-12 se muestra un ejemplo de la forma en que se obtiene la frecuencia de ocurrencia de un grado de intensidad macrosísmica, a partir de las frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas (McGuire, 2004).

$$\gamma'[I = VII] = \gamma[I > 6.5] - \gamma[I > 7.5]$$

3.4 Estimación de la vulnerabilidad sísmica

En el método LM1_P, la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, se representa mediante tres funciones de densidad de probabilidad tipo beta. Dichas funciones indican la probabilidad de que se presenten diferentes valores del índice de vulnerabilidad V (Figura 3-1, 2). En este método, al igual que en el método LM1 de Risk-UE los valores del índice de vulnerabilidad cercanos a 0 representan baja vulnerabilidad sísmica, mientras que los valores cercanos a 1 representan alta vulnerabilidad sísmica (Bernardini y Lagomarsino, 2008; Giovinazzi, 2005; Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Las funciones de probabilidad que representan a la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, permiten estimar las probabilidades de que se presenten los diferentes valores de V ($P[V]$). Estas últimas probabilidades se requieren para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la Ec. 3-1.

El empleo de las funciones de distribución de probabilidad tipo beta para representar la vulnerabilidad sísmica de edificios, se debe principalmente a las razones siguientes: a) la función de densidad beta puede tomar una significativa variedad de formas (incluyendo distribuciones con una disimetría importante), dependiendo de los valores de dos parámetros (α y β); b) la función de densidad de probabilidad beta facilita la representación de variables cuyos valores están restringidos a un intervalo, como en este caso en el que el índice de vulnerabilidad varía entre un intervalo determinado, por ejemplo, entre 0 y 1¹; c) la función de densidad beta ha sido empleada con buenos resultados, en el modelado de variables relacionadas con el riesgo sísmico de edificios (McGuire, 2004; ATC-13, 1985).

Para estimar las funciones de probabilidad beta que representan la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, se considera lo siguiente: 1) que se conoce un grupo de valores del índice de vulnerabilidad por cada tipología estructural. Específicamente, se dispone de 5 valores del índice de vulnerabilidad, por cada tipología estructural, que pueden emplearse para definir una función de probabilidad, que describa la variación del índice de vulnerabilidad, y que a su vez represente la vulnerabilidad sísmica promedio de los edificios que pertenecen a la misma tipología estructural. Los 5 valores del índice de vulnerabilidad se definieron en el método LM1 de Risk-UE como V_I^{\min} , V_I^- , V_I^* , V_I^+ , y V_I^{\max} (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). 2) que al tomar en cuenta los 5 valores del índice de vulnerabilidad por tipología estructural mencionados en el inciso anterior, y al considerar información adicional al dato de la tipología estructural de cada edificio, es posible obtener funciones de probabilidad que describan la variación del índice de vulnerabilidad y que representen la vulnerabilidad sísmica de cada edificio.

¹ Eventualmente, como se verá más adelante, los índices de vulnerabilidad pueden tomar valores menores que cero y mayores que la unidad. Los índices menores que cero corresponden a edificios de resistencia sísmica por encima de las mejores consideradas, mientras que valores mayores que la unidad corresponden a edificios con menor resistencia sísmica que los edificios cuyo índice de vulnerabilidad se supone igual a la unidad. Es importante mencionar que desde el método LM1 de Risk-UE se reconoce la posibilidad de que el índice de vulnerabilidad de los edificios sea menor que cero o mayor que uno (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Enseguida se describe el procedimiento empleado para estimar las tres funciones de probabilidad beta, que determinan la vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado. Específicamente, se obtienen funciones beta que determinan: 1) la curva de la mejor estimación de la vulnerabilidad; 2) la curva Superior de la vulnerabilidad y; 3) la curva Inferior de la vulnerabilidad. El empleo de las tres funciones de probabilidad beta en lugar de una sola función, facilita la representación de las importantes incertidumbres asociadas a la estimación de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, y permite obtener intervalos de riesgo sísmico en lugar de únicamente valores medios del riesgo sísmico. En la descripción del proceso requerido para estimar las curvas de la vulnerabilidad sísmica, se incluye la descripción del ejemplo de aplicación en el que se estima la vulnerabilidad sísmica de los dos edificios de Barcelona cuyos datos se indican en la Tabla 3-1.

3.4.1 Obtención de la curva de la mejor estimación de la vulnerabilidad sísmica

La función de probabilidad beta que se debe estimar para obtener la curva de la mejor estimación (Mejor) de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, se puede definir completamente al determinar los valores de los parámetros α_m y β_m , de la función beta (Ec. 3-13).

$$f(V; \alpha_m, \beta_m) = \frac{\Gamma(\alpha_m + \beta_m)}{\Gamma(\alpha_m)\Gamma(\beta_m)} \frac{(V - V_a)^{\alpha_m - 1} (V_b - V)^{\beta_m - 1}}{(V_b - V_a)^{\alpha_m + \beta_m - 1}} \quad V_a \leq V \leq V_b; \alpha_m, \beta_m > 0 \quad 3-13$$

donde V es el índice de vulnerabilidad sísmica, α_m y β_m son los parámetros de forma, V_a y V_b son los límites inferior y superior, respectivamente, de la distribución, y Γ es la función gamma.

Con la finalidad de facilitar los cálculos es posible expresar la forma general de la función de probabilidad beta (Ec. 3-13), en términos de la función de probabilidad beta estándar (Ec. 3-14).

$$f\left(\frac{V - V_a}{V_b - V_a}; \alpha_m, \beta_m\right) = \frac{\Gamma(\alpha_m + \beta_m)}{\Gamma(\alpha_m)\Gamma(\beta_m)} \left(\frac{V - V_a}{V_b - V_a}\right)^{\alpha_m - 1} \left(1 - \frac{V - V_a}{V_b - V_a}\right)^{\beta_m - 1} \quad V_a \leq V \leq V_b; \alpha_m, \beta_m > 0 \quad 3-14$$

Los valores de los parámetros α_m y β_m , que determinan la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica, se obtienen al considerar que dicha función cumple con las siguientes condiciones: 1) que el valor medio de la función es igual al índice medio de la vulnerabilidad sísmica (\bar{V}_I) en el caso en que $V_a=0$ y $V_b=1$ (Figura 3-5), e igual a $\frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a}$ en el caso en que $V_a \neq 0$ y/o $V_b \neq 1$ (Ec. 3-15), y; 2) que los valores de V_c y V_d (Figura 3-5), determinan un intervalo de confianza del 90% (Ec. 3-16).

$$\left(\frac{\overline{V}_I - V_a}{V_b - V_a} \right) = \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \beta_m} \quad 3-15$$

$$0.9 = \int_{y_1}^{y_2} f(y) dy = B_{y_2}(\alpha_m, \beta_m) - B_{y_1}(\alpha_m, \beta_m) \quad 3-16$$

donde y_1 y y_2 corresponden a los valores de V_c y V_d , respectivamente, $B_{y_2}(\alpha_m, \beta_m)$ y $B_{y_1}(\alpha_m, \beta_m)$ son las funciones Beta incompletas (función de distribución acumulativa beta), para los valores de y_2 y y_1 .

Por lo tanto, el procedimiento requerido para estimar la función de probabilidad beta que representa la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de un edificio, se resume en los tres pasos siguientes: 1) obtención de \overline{V}_I ; 2) determinación de los valores V_c y V_d ; 3) estimación de los valores α_m y β_m que definen la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica.

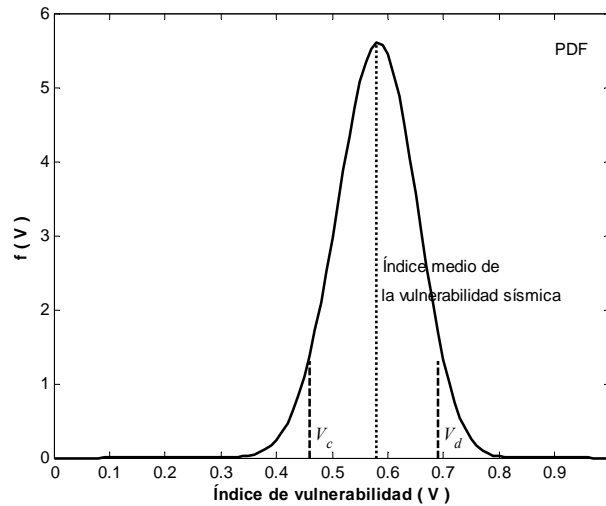


Figura 3-5. Función de densidad de probabilidad beta, en la que el índice medio de la vulnerabilidad sísmica corresponde al valor medio de la función beta, y los valores de V_c y V_d delimitan el intervalo de confianza del 90%.

Enseguida se describe cada uno de los tres pasos requeridos para obtener la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado.

1) Obtención de \overline{V}_I

Para obtener el valor de \overline{V}_I que le corresponde a cada edificio se emplea la Ec. 1-1 propuesta en el método LM1 de Risk-UE. Por lo tanto, es necesario determinar previamente el índice de vulnerabilidad más probable del edificio por su tipología (V_I^*), el factor de vulnerabilidad regional (ΔV_R), y la suma de las puntuaciones de todos los factores que modifican la vulnerabilidad del edificio (ΔV_m).

Índice de vulnerabilidad más probable del edificio por su tipología.

El valor de V_I^* para las principales tipologías estructurales de los edificios de Barcelona se indican en la Tabla 3-2. Mientras que los valores de V_I^* para otras tipologías estructurales se encuentran en la Tabla 2-23 y en el documento generado por Milutinovic y Trendafiloski (2003) como parte del proyecto Risk-UE. Por ejemplo, en función de los datos de la Tabla 3-2, es posible clasificar a los edificios BCN1 y BCN2 (Tabla 3-1), dentro de las tipologías M34 y RC32, respectivamente. Por lo tanto, los valores de V_I^* para los edificios BCN1 y BCN2, son 0.616 y 0.522, respectivamente.

Tabla 3-2. Tipologías estructurales y sus correspondientes valores representativos de la vulnerabilidad, en términos del índice de vulnerabilidad (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Grupo	Tipología	Descripción	Valores representativos de la vulnerabilidad**				
			V_I^{min}	V_I^-	V_I^*	V_I^+	V_I^{max}
Mampostería	M31	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera (<i>Unreinforced masonry bearing walls with wooden slabs</i>).	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M32	Muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería (<i>Unreinforced masonry bearing walls with masonry vaults</i>).	0.460	0.650	0.776	0.953	1.020
	M33	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería (<i>Unreinforced masonry bearing walls with composite steel and masonry slabs</i>).	0.460	0.527	0.704	0.830	1.020
	M34	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado (<i>Unreinforced masonry bearing walls with reinforced concrete slabs</i>).	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
Hormigón	RC32	Edificio de pórticos de hormigón irregulares con muros de relleno de mampostería no reforzada (<i>Irregular concrete frames with unreinforced masonry infill walls</i>).	0.060	0.127	0.522	0.880	1.020
Acero	S3	Edificios de pórticos de acero con muros de relleno de mampostería no reforzada (<i>Steel frames with unreinforced masonry infill walls</i>).	0.140	0.330	0.484	0.640	0.860
	S5	Sistema compuesto de acero y hormigón armado (<i>Steel and RC composite systems</i>).	-0.020	0.257	0.402	0.720	1.020
Madera	W	Estructuras de madera (<i>Wood</i>).	0.140	0.207	0.447	0.640	0.860

** V_I^* es el valor más probable del índice de vulnerabilidad para la correspondiente tipología. V_I^- y V_I^+ delimitan el intervalo de los valores probables del índice de vulnerabilidad para la correspondiente tipología. V_I^{min} y V_I^{max} amplían el intervalo de los valores probables del índice de vulnerabilidad para incluir los valores menos probables del índice de vulnerabilidad, para la misma tipología.

Factor de vulnerabilidad regional

El factor de vulnerabilidad regional, ΔV_R , es un valor que permite hacer consideraciones regionales con la finalidad de modificar los niveles de vulnerabilidad asociados a las tipologías estructurales. Por ejemplo,

este factor permite considerar las diferencias entre edificios que han sido clasificados en la misma tipología estructural, pero que fueron construidos con materiales y procedimientos diferentes, que se estima influyen en el valor de su vulnerabilidad sísmica. Para determinar el valor del factor de vulnerabilidad regional se recomienda tomar en cuenta la opinión de expertos.

En el caso del ejemplo de los edificios de Barcelona (Tabla 1-3), el factor de vulnerabilidad regional se toma de la propuesta realizada por Lantada (2007). En dicha propuesta estableció modificadores regionales de la vulnerabilidad para las principales tipologías existentes en Barcelona, en función del periodo de construcción (Tabla 3-3). Por lo tanto, a los edificios BCN1 y BCN2 les corresponden factores regionales iguales a +0.134 y -0.022, respectivamente (Tabla 3-3).

Tabla 3-3. Modificadores regionales de la vulnerabilidad sísmica de las principales tipologías estructurales existentes en Barcelona (Lantada, 2007).

Periodos	Periodo construcción	Normativas españolas	Obligación en Barcelona	Práctica constructiva con refuerzos laterales	Nivel de diseño sísmico	Modificador regional de la vulnerabilidad (ΔV_R)				
						M31	M32	M33	M34	RC32
I	<1940	-	-	Ausente	No	+0.198	+0.162	+0.234	-	-
II	1941-1962	-	-	Deficiente	No	+0.135	+0.099	+0.171	-	-
III	1963-1968	Recomendación MV-101 (1962)	No especificado	Deficiente	No	+0.073	+0.037	+0.109	+0.134	+0.228
IV	1969-1974	Normativa sísmica PGS-1 (1968)	Sí	Aceptable	Bajo	+0.010	-0.026	+0.046	+0.009	+0.103
V	1975-1994	Normativa sísmica PDS (1974)	Sí	Aceptable	Bajo	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022
VI	1995-2002	Normativa sísmica NCSE-94 (1995)	No	Aceptable	Bajo	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022
VII	2002-2010	Normativa sísmica NCSE-02 (2002)	Sí	Aceptable	Bajo	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022

Modificadores de la vulnerabilidad

En el presente trabajo la vulnerabilidad sísmica se obtiene al considerar tanto la vulnerabilidad intrínseca, como la vulnerabilidad extrínseca. La vulnerabilidad sísmica intrínseca depende principalmente de las características del edificio, y de sus contenidos. Por ejemplo, la presencia de un piso débil en un edificio,

es un factor que incrementa su vulnerabilidad sísmica intrínseca. Mientras que la vulnerabilidad extrínseca depende, principalmente, de la probable interacción entre el edificio estudiado y el medio que lo rodea. En este caso, la presencia de un edificio vecino que pueda golpear al edificio en estudio, durante la ocurrencia de un sismo, es un ejemplo de un factor que incrementa la vulnerabilidad extrínseca del edificio en estudio. Por lo tanto, en la presente metodología se consideran modificadores asociados tanto a la vulnerabilidad intrínseca como a la vulnerabilidad extrínseca.

Con la finalidad de estimar el valor de ΔV_m (Ec. 1-1) es necesario identificar los modificadores de la vulnerabilidad que están presentes en el edificio en estudio, para posteriormente determinar sus respectivas puntuaciones de acuerdo con lo establecido en el método LM1 de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). En dicho método propusieron modificadores y puntuaciones para edificios de mampostería no reforzada y de hormigón armado (Anexo A).

El número de modificadores que se consideran para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios depende en gran medida del número de datos disponibles de los edificios, y del número de modificadores de la vulnerabilidad sísmica que se han propuesto en la metodología LM1. Por ejemplo, para los edificios de mampostería se propusieron 14 modificadores y para los edificios de hormigón armado sólo 8 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Por otra parte, en el caso particular de los edificios BCN1 y BCN2 (Tabla 3-1) localizados en Barcelona se disponen únicamente datos de dos modificadores de la vulnerabilidad: el estado de conservación y el número de niveles del edificio. Por lo tanto, es posible emplear las puntuaciones que propuso Lantada (2007), para dichos modificadores (Tabla 3-4 y Tabla 3-5).

Tabla 3-4. Modificador de la vulnerabilidad en función del estado de conservación del edificio en Barcelona (Lantada, 2007).

Estado de conservación	Modificador por estado de conservación	Código
1. Requieren grandes reparaciones (Deficiente y ruinoso).	+0.04	D ó O
2. Intermedios (Regular).	0	R
3. No necesitan reformas (Normal).	-0.04	N

En la Tabla 3-6 se indican las puntuaciones que le corresponden a los modificadores de la vulnerabilidad de los edificios BCN1 y BCN2. Finalmente, al emplear la Ec. 1-1 se obtiene que el índice medio de la vulnerabilidad sísmica para los edificios BCN1 y BCN2 es igual a 0.83 y 0.42, respectivamente (Tabla 3-7).

Tabla 3-5. Modificador de la vulnerabilidad en función del número de niveles del edificio en Barcelona (Lantada, 2007).

Tipología	No. de niveles	Modificador por número de niveles	
		Edificios de 1940 o anteriores	Edificios posteriores a 1940
Mampostería	Bajo (1 a 2)	-0.02	-0.04
	Medio (3 a 5)	+0.02	0
	Alto (6 o más)	+0.06	+0.04
Hormigón (Nivel de diseño bajo)	Bajo (1 a 3)		-0.04
	Medio (4 a 7)		0
	Alto (8 o más)		0.08

Tabla 3-6. Modificadores de la vulnerabilidad y sus respectivas puntuaciones para los edificios BCN1 y BCN2.

Modificador de la vulnerabilidad	Edificio BCN1	Puntuaciones	Edificio BCN2	Puntuaciones
Estado de conservación	Malo	+0.04	Bueno	-0.04
Número de niveles	6	+0.04	3	-0.04
Fecha de construcción	1965		1975	
$\Delta V_m =$		+0.08		-0.08

Tabla 3-7. Resumen de los valores empleados para estimar el índice de vulnerabilidad medio de los edificios BCN1 y BCN2.

Edificio	V_I^*	ΔV_R	ΔV_m	\bar{V}_I
BCN1	0.616	0.134	0.08	0.83
BCN2	0.522	-0.022	-0.08	0.42

2) Determinación de los valores de V_c y V_d

Para determinar los valores de V_c y V_d (Figura 3-5), que definen el intervalo de confianza del 90% de la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, es posible considerar dos criterios:

I) En el primer caso se considera que los valores de V_I^{\min} y V_I^{\max} (Tabla 3-2), corresponden a los valores de V_c y V_d , respectivamente. Es decir, se considera que el intervalo de confianza del 90% de la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio está definido por los valores de V_I^{\min} y V_I^{\max} . En otras palabras, se considera que en el 90% de los casos el índice de vulnerabilidad sísmica de cada edificio estará comprendido entre V_I^{\min} y V_I^{\max} . De acuerdo con este criterio los valores de V_c y V_d que definen el intervalo de confianza del 90%, serán los mismos para todos los edificios que pertenecen a la misma tipología estructural. Este caso se representa mediante las ecuaciones 3-17 y 3-18.

$$V_c = V_I^{\min}$$

$$V_d = V_I^{\max} \quad 3-18$$

II) En el segundo caso se considera que los valores de V_I^{\min} y V_I^{\max} (Tabla 3-2), son referencias para obtener los valores de V_c y V_d , para cada edificio. En este caso, los valores de V_c y V_d se estimarán para cada edificio mediante las ecuaciones 3-19 y 3-20. De acuerdo con este criterio los valores de V_c y V_d que definen el intervalo de confianza del 90%, pueden ser diferentes para cada edificio, incluso para aquellos que pertenecen a la misma tipología estructural. Sin embargo, mediante estas ecuaciones se garantiza que la amplitud del intervalo ($V_d - V_c$) será igual en todos los edificios que pertenecen a la misma tipología estructural.

$$V_c = V_I^{\min} + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 3-19$$

$$V_d = V_I^{\max} + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 3-20$$

Por lo tanto, si se emplea el criterio I se obtiene que los pares de valores (V_c , V_d) para los edificios BCN1 y BCN2, son iguales a (0.3, 0.86), y (0.06, 1.02), respectivamente. Mientras que si se emplea el criterio II, entonces los pares de valores (V_c , V_d) obtenidos serán (0.514, 1.074), y (-0.042, 0.918), respectivamente. En el presente trabajo se ha optado por emplear el segundo criterio para obtener los valores de V_c y V_d , porque se considera razonable que al hacer estimaciones probabilistas los valores de V_c y V_d puedan ser diferentes a los valores de V_I^{\min} y V_I^{\max} , establecidos en el método LM1 de Risk-UE para cada tipología estructural.

3) Estimación de los valores de α_m y β_m

Para la obtención de los parámetros α_m y β_m , que determinan la función de probabilidad beta, que corresponde a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, se realizan los tres pasos siguientes:

A) Se propone un valor de β_m , y se emplean los valores de $\overline{V_I}$, V_a y V_b para calcular el valor de α_m mediante la Ec. 3-21. Para facilitar la comparación e interpretación de los resultados de vulnerabilidad sísmica entre los edificios estudiados, se recomienda que los valores de V_a y V_b sean los mismos para todos los edificios de la zona urbana en estudio. Para ello, es posible estimar los valores de V_c y V_d de todos los edificios y posteriormente, elegir un valor de V_a que sea menor que el menor valor de V_c obtenido de entre todos los edificios, y un valor de V_b que sea mayor que el valor de V_d más grande de todos los edificios evaluados. Por ejemplo, si los edificios BCN1 y BCN2 fuesen los únicos edificios de un estudio, entonces, se observaría que el menor valor de V_c de los dos edificios es -0.042 y que el mayor valor de V_d de los dos edificios es 1.074. De manera que en este caso los valores de V_a y de V_b , podrían ser igual a -1 y 2, respectivamente.

$$\alpha_m = \frac{-\beta_m \cdot \frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a}}{\left(\frac{\bar{V}_I - V_a}{V_b - V_a} - 1 \right)} \quad 3-21$$

B) Se calcula la probabilidad acumulada que existe en la función de distribución acumulativa beta (Ec. 3-16), definida por los parámetros de β_m y α_m , y por los valores de V_c y V_d , previamente estimados.

C) Se verifica si la probabilidad acumulada estimada es igual al 90%. Si esta condición no se cumple, entonces, se regresa al paso A y se propone un nuevo valor de β_m . Pero, si la condición se cumple entonces se tienen ya los valores de β_m y α_m , que definen la función de probabilidad beta, que a su vez determina la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica. Dicha función de probabilidad tiene asociada la desviación estándar indicada en la Ec. 3-22.

$$\sigma_{\bar{V}} = \sqrt{\frac{\alpha_m \beta_m}{(\alpha_m + \beta_m)^2 (\alpha_m + \beta_m + 1)}} \cdot (V_b - V_a)^2 \quad 3-22$$

Al aplicar el procedimiento descrito anteriormente, se obtiene que la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN1 y BCN2, queda definida por los pares de valores (α_m, β_m) , iguales a (39.43, 25.21) y (12.14, 13.51), respectivamente (Figura 3-6). Para la obtención de tales valores se consideró que V_a es igual a -1 y que V_b es igual a 2.

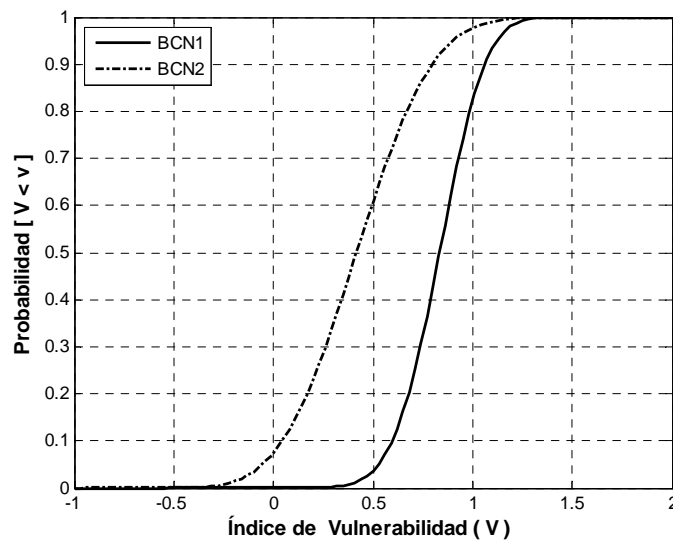


Figura 3-6. Funciones de distribución acumulativa tipo beta que representan a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN1 y BCN2.

De acuerdo con la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio BCN2 (Figura 3-6), existe un 39% de probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5. De manera similar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio BCN1 (Figura 3-6), indica que existe un 96% de probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5. De manera que es posible concluir que el edificio BCN1 es significativamente más vulnerable que el edificio BCN2.

3.4.2 Estimación de las curvas Inferior y Superior de la vulnerabilidad sísmica

Curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica

Para obtener las funciones de distribución beta que representan a las curvas Inferior y Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, es necesario realizar un procedimiento similar al que se emplea para obtener la función de distribución beta que representa a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica. Para ello, se considera que la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, es aquella que cumple con las dos condiciones representadas en las ecuaciones 3-23 y 3-24.

$$\frac{\overline{V_{I_L}} - V_a}{V_b - V_a} = \frac{\alpha_L}{\alpha_L + \beta_L} \quad 3-23$$

$$0.9 = \int_{y_1}^{y_2} f(y) dy = B_{y_2}(\alpha_L, \beta_L) - B_{y_1}(\alpha_L, \beta_L) \quad 3-24$$

donde $\overline{V_{I_L}}$ es el índice medio de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica, y_1 y y_2 corresponden a los valores de V_{c_L} y V_{d_L} , respectivamente, $B_{y_2}(\alpha_L, \beta_L)$ y $B_{y_1}(\alpha_L, \beta_L)$ son las funciones Beta incompletas, para los valores de y_2 y y_1 .

En resumen, los parámetros α_L y β_L , que determinan la función de probabilidad beta, que corresponde a la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, se determinan mediante la realización de los tres pasos siguientes:

A) Se propone un valor de β_L , y se calcula el valor de α_L a partir de las ecuaciones 3-25 y 3-26.

$$\alpha_L = \frac{-\beta_L \cdot \left(\frac{\overline{V_{I_L}} - V_a}{V_b - V_a} \right)}{\left[\frac{\overline{V_{I_L}} - V_a}{V_b - V_a} - 1 \right]} \quad 3-25$$

$$\overline{V_{I_L}} = \overline{V_I} - \frac{I_f - f}{I_f} \cdot \phi \cdot \sigma_{\overline{V}} \quad 3-26$$

donde I_f y ϕ son parámetros del modelo de fiabilidad que se calibran en cada estudio; f es el factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural del edificio estudiado; $\sigma_{\overline{V}}$ es la desviación estándar que se calcula mediante la Ec. 3-22. La Ec. 3-26 que permite estimar el valor de $\overline{V_{I_L}}$, se desarrolló al considerar que a medida que disminuya la fiabilidad en la asignación de la tipología estructural, aumentará la incertidumbre en la determinación del índice medio de la vulnerabilidad sísmica. En nuestro caso se determinó emplear factores de fiabilidad (f) entre 0 y 10, siendo el factor de 0 el que tiene asociado una fiabilidad nula y el factor de 10 el que tiene asociado una fiabilidad completa. Se consideró también que era apropiado que el valor de I_f fuese igual a 10 y el de ϕ igual a 1.96 (Ec. 3-27). Esto último se propuso al considerar que la máxima variación esperable del índice de vulnerabilidad medio (en el 95% de los casos), estará determinada por los valores que delimitan el intervalo de confianza del 95%.

$$\overline{V_{I_L}} = \overline{V_I} - \frac{10 - f}{10} \cdot 1.96 \cdot \sigma_{\overline{V}} \quad 3-27$$

B) Se calcula la probabilidad acumulada que existe en la función de distribución acumulativa beta (Ec. 3-24), definida por los parámetros de β_L y α_L , y por los valores de V_{c_L} y V_{d_L} . Estos últimos valores se determinan mediante las ecuaciones 3-28 y 3-29.

$$V_{c_L} = \left(V_I^{\min} - \frac{I_f - f}{I_f} \cdot \phi \cdot \sigma_{\overline{V}} \right) + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 3-28$$

$$V_{d_L} = \left(V_I^{\max} - \frac{I_f - f}{I_f} \cdot \phi \cdot \sigma_{\overline{V}} \right) + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 3-29$$

C) Se verifica si la probabilidad acumulada estimada es igual al 90%. Si esta condición no se cumple, entonces, se regresa al paso A y se propone un nuevo valor de β_L . Pero, si la condición se cumple entonces se tienen ya los valores de β_L y α_L , que definen la función de probabilidad beta, que a su vez determina la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica.

Curva Superior de la vulnerabilidad sísmica

De manera similar al caso de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica se considera que la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, es aquella que cumple con las condiciones representadas en las ecuaciones 3-30 y 3-31.

$$\frac{\overline{V_{I-U}} - V_a}{V_b - V_a} = \frac{\alpha_U}{\alpha_U + \beta_U} \quad 3-30$$

$$0.9 = \int_{y_1}^{y_2} f(y) dy = B_{y_2}(\alpha_U, \beta_U) - B_{y_1}(\alpha_U, \beta_U) \quad 3-31$$

donde $\overline{V_{I-U}}$ es el índice medio de la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica, y_1 y y_2 corresponden a los valores de V_{c-U} y V_{d-U} , respectivamente, $B_{y_2}(\alpha_U, \beta_U)$ y $B_{y_1}(\alpha_U, \beta_U)$ son las funciones Beta incompletas, para los valores de y_2 y y_1 .

Para la obtención de los parámetros α_U y β_U , que determinan la función de probabilidad beta, que corresponde a la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio, se realizan los tres pasos siguientes:

A) Se propone un valor de β_U , y se calcula el valor de α_U a partir de las ecuaciones 3-32 y 3-33.

$$\alpha_U = \frac{-\beta_U \cdot \left(\frac{\overline{V_{I-U}} - V_a}{V_b - V_a} \right)}{\left[\frac{\overline{V_{I-U}} - V_a}{V_b - V_a} - 1 \right]} \quad 3-32$$

$$\overline{V_{I-U}} = \overline{V_I} + \frac{I_f - f}{I_f} \cdot \phi \cdot \sigma_{\overline{V}} \quad 3-33$$

Al realizar las mismas consideraciones que en el caso de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica es posible reescribir la Ec. 3-33 y obtener la Ec. 3-34.

$$\overline{V_{I-U}} = \overline{V_I} + \frac{10 - f}{10} \cdot 1.96 \cdot \sigma_{\overline{V}} \quad 3-34$$

B) Se calcula la probabilidad acumulada que existe en la función de distribución acumulativa beta (Ec. 3-31), definida por los parámetros de β_U y α_U , y por los valores de V_{c-U} y V_{d-U} . Estos últimos valores se determinan mediante las ecuaciones 3-35 y 3-36, respectivamente.

$$V_{c-U} = \left(V_I^{\min} + \frac{I_f - f}{I_f} \cdot \phi \cdot \sigma_{\overline{V}} \right) + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 3-35$$

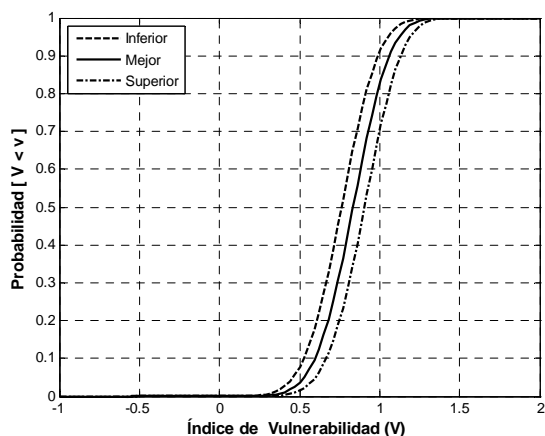
$$V_{d_U} = \left(V_I^{\max} + \frac{I_f - f}{I_f} \cdot \phi \cdot \sigma_{\bar{V}} \right) + \Delta V_R + \Delta V_m \quad 3-36$$

C) Se verifica si la probabilidad acumulada estimada es igual al 90%. Si esta condición no se cumple, entonces, se regresa al paso A y se propone un nuevo valor de β_U . Pero, si esta condición se cumple entonces se tienen ya los valores de β_U y α_U , que definen la función de probabilidad beta, que a su vez determina la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica.

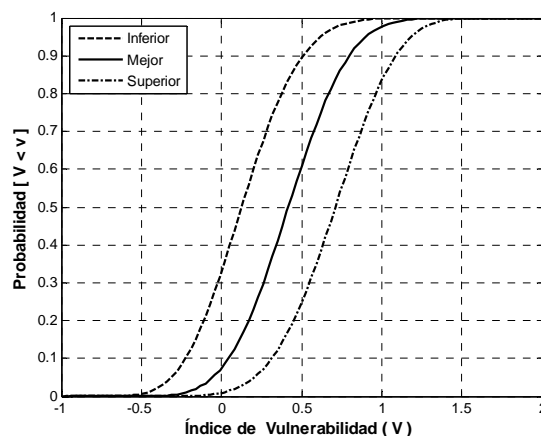
Una vez que se han obtenido las tres funciones de distribución beta, se tiene ya definida la vulnerabilidad sísmica del edificio estudiado. Dichas funciones permiten generar curvas de vulnerabilidad sísmica como las indicadas en la Figura 3-7, las cuales corresponden a las funciones de distribución acumulativa beta determinadas por los parámetros de la Tabla 3-8. Las curvas de la Figura 3-7 representan a la vulnerabilidad sísmica estimada para los edificios BCN1 y BCN2.

Tabla 3-8. Valores de los parámetros α y β que definen las funciones beta de la Figura 3-7.

Curva de vulnerabilidad sísmica	Edificio BCN1		Edificio BCN2	
	α	β	α	β
Inferior	38.72	27.31	9.63	15.81
Mejor	39.43	25.21	12.14	13.51
Superior	39.96	23.11	13.56	10.31



(a)



(b)

Figura 3-7. Funciones de distribución acumulativa beta, que representan la vulnerabilidad sísmica del edificio BCN1 (a) y del edificio BCN2 (b).

Si se consideran las tres curvas de la Figura 3-7 (a), entonces se puede identificar que la probabilidad de que en el edificio BCN1 el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5 varía entre el 92% y el 98%, con un valor medio del 96%. Mientras que la probabilidad de que en el edificio BCN2 el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5 varía entre el 11%, y el 75%, con un valor medio del 39%. Por otra

parte, es importante destacar que la separación que existe entre las tres curvas de vulnerabilidad de cada edificio depende del factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural del edificio (f). Por tal motivo, el edificio BCN1 al que le corresponde un valor de f igual a 8, tiene curvas de vulnerabilidad cuya separación entre sí, es menor que la que tienen las curvas de vulnerabilidad del edificio BCN2, al que le corresponde un valor de f igual a 5.

3.5 Función de daño

Para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P se emplea una función de daño. Dicha función permite estimar las probabilidades de que se excedan diferentes grados de daño sísmico en el edificio estudiado, dado que la vulnerabilidad sísmica del edificio está determinada por un valor del índice de vulnerabilidad sísmica (V), y dado que ha ocurrido una cierta intensidad macrosísmica (I). Estas últimas probabilidades se requieren para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la Ec. 3-1.

3.5.1 Función para estimar daño sísmico en edificios

En la metodología LM1_P la función de daño empleada depende de la intensidad macrosísmica (I) y del índice de vulnerabilidad (V). Específicamente, es posible emplear la función propuesta en la metodología LM1 de Risk-UE, la cual permite estimar un grado de daño medio a través de la Ec. 3-37 y posteriormente obtener la distribución completa del daño mediante una función de probabilidad beta (ecuaciones 2-28 a 2-30). La Ec. 3-37 difiere de la Ec. 1-2 en que la variable \bar{V}_I se reemplaza por la variable V . Porque a diferencia del método LM1 en el que el daño esperado de cada edificio se estima únicamente mediante el valor del índice de vulnerabilidad medio de cada edificio, en el método LM1_P el daño esperado de los edificios se estima considerando un intervalo de valores del índice de vulnerabilidad sísmica. La función de daño considerada en la metodología LM1 de Risk-UE se obtuvo, principalmente, al emplear la información de la escala EMS-98, y al considerar el daño que se presentó durante el sismo de Irpina en Italia (Giovinazzi, 2005).

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad 3-37$$

En la Figura 3-8 es posible observar los valores del daño medio que se obtienen mediante la Ec. 3-37, al considerar los valores del índice de vulnerabilidad sísmica iguales a 0.740, 0.704, 0.616 y 0.522, y las intensidades macrosísmicas desde V hasta XII. Mientras que en la Figura 3-9 se muestran las distribuciones completas del daño que se estiman mediante las ecuaciones 2-28 a 2-30, a partir de los

valores del grado de daño medio obtenidos para los valores del índice de vulnerabilidad sísmica iguales a 0.740, 0.704, 0.616 y 0.522, y para la intensidad macrosísmica igual a VIII.

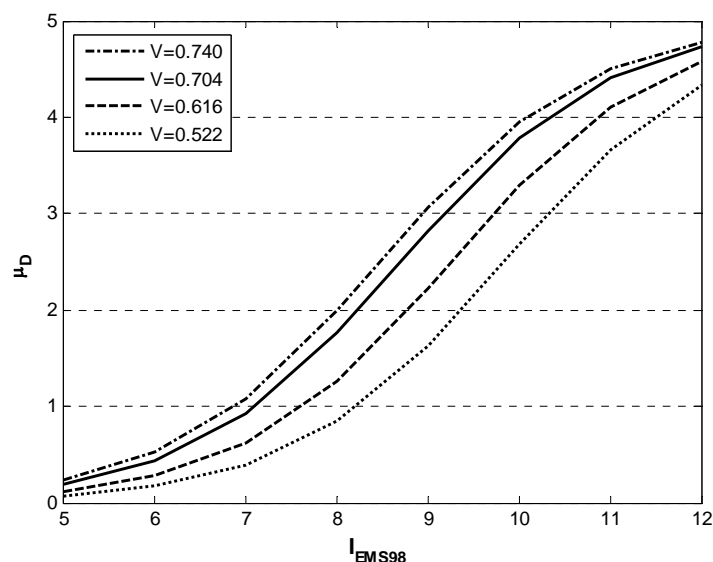


Figura 3-8. Curvas $I-\mu_D$ obtenidas al evaluar la función semi-empírica representada en la Ec. 3-37, mediante cuatro valores del índice de vulnerabilidad y diferentes intensidades macrosísmicas.

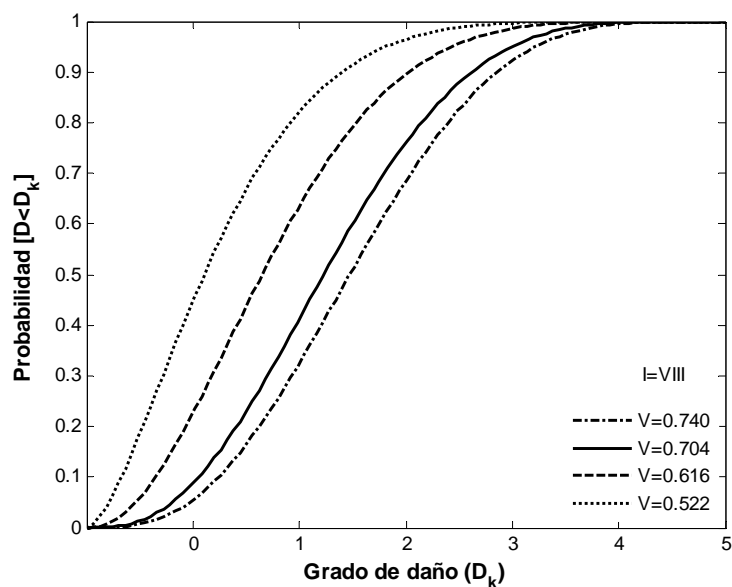


Figura 3-9. Curvas de probabilidad acumulada del grado de daño (D_k) para cuatro valores diferentes del índice de la vulnerabilidad y para la intensidad de VIII (Ec. 2-28 a Ec. 2-30).

3.6 Estimación del riesgo sísmico

El riesgo sísmico de cada edificio se estima al evaluar la Ec. 3-1 a partir de las curvas de peligrosidad sísmica del sitio donde se localiza el edificio, de las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio y de la

función de daño. Por ejemplo, en la Figura 3-10 y en la Figura 3-11, se muestran las curvas de riesgo sísmico que se obtienen para los edificios BCN1 y BCN2 del ejemplo (Tabla 3-1), al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 3-3).

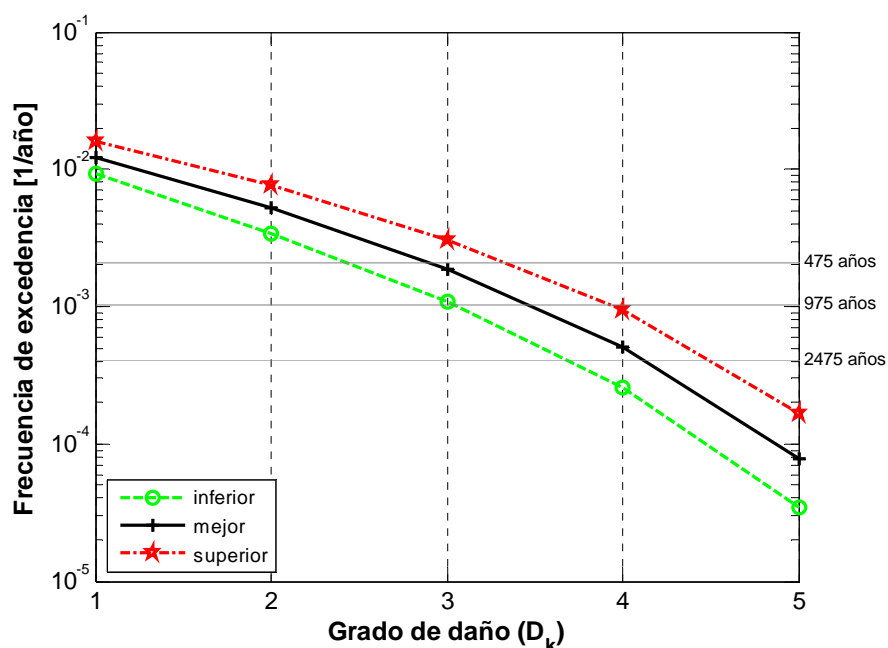


Figura 3-10. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica para Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 3-3).

De acuerdo con las curvas de riesgo de la Figura 3-10, el grado de daño moderado en el edificio BCN1 tiene un periodo de retorno que varía entre 132 y 294 años, con un valor medio de 193 años. Las diferencias entre estos tres valores del periodo de retorno del daño moderado, se deben a que los mismos se obtuvieron mediante tres curvas de vulnerabilidad sísmica diferentes, la Superior, la Inferior, y la Mejor (Figura 3-7, a). Por otra parte, también es posible emplear las curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 para identificar el daño que se estima puede ocurrir para periodos de retorno específicos. Por ejemplo, es posible observar que en el edificio BCN1 el grado de daño que tiene un periodo de retorno de 475 años, es un valor que varía entre 2.4 y 3.3, con un valor medio de 2.9. Mientras que el grado de daño que tiene un periodo de retorno de 975 años, es un valor que varía entre 3 y 3.9, con un valor medio de 3.5. De manera similar, de acuerdo con las curvas de riesgo de la Figura 3-11, el grado de daño moderado en el edificio BCN2 tiene un periodo de retorno que varía entre 217 y 6881 años, con un valor medio de 1039 años. En este caso es posible observar que las diferencias entre los periodos de retorno del daño moderado en el edificio BCN2 son muy grandes, comparadas con las diferencias existentes entre los periodos de retorno del daño moderado en el edificio BCN1. Las grandes diferencias en los periodos de

retorno del grado de daño moderado del edificio BCN2, se deben en gran medida a que para su obtención se emplearon curvas de vulnerabilidad con grandes diferencias entre sí (Figura 3-7, b).

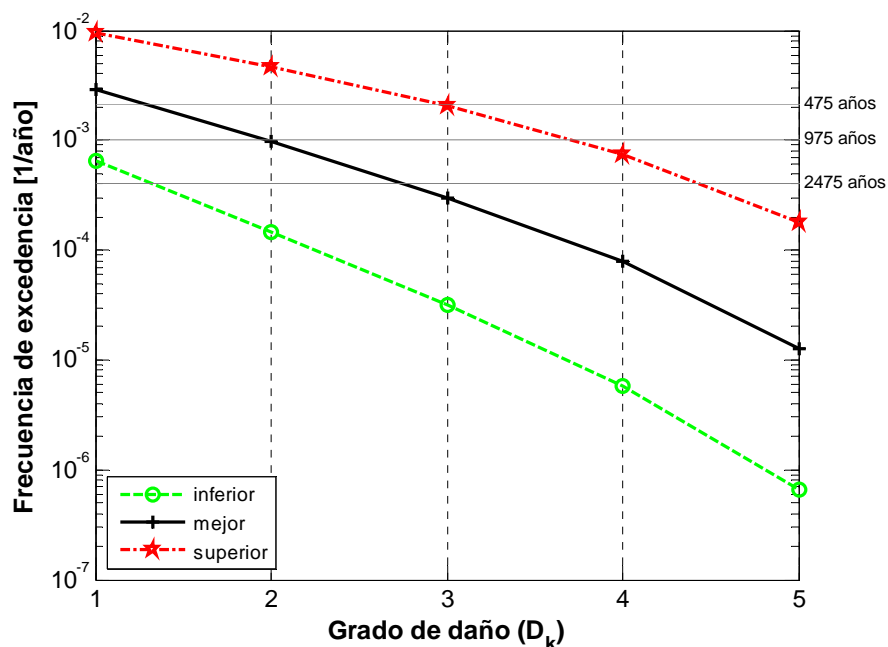


Figura 3-11. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica para Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 3-3).

Por otra parte, si se consideran las curvas de peligrosidad sísmica estimadas por Secanell et al (2004) (Figura 3-4), y los datos de los edificios BCN1 y BCN2 (Tabla 3-1), entonces, es posible obtener las curvas de riesgo sísmico de la Figura 3-12 y de la Figura 3-13, respectivamente. Siendo las curvas de riesgo sísmico denominadas Inferior, Mejor y Superior, aquellas que se obtienen al considerar las curvas de vulnerabilidad Inferior, Mejor y Superior (Figura 3-7, a), y la curva media de la peligrosidad sísmica (Figura 3-4). Mientras que el resto de curvas, surgen al considerar también las curvas de peligrosidad sísmica que contienen los valores medios menos una desviación estándar y más una desviación estándar, respectivamente (Figura 3-4).

De acuerdo con las estimaciones de riesgo (Figura 3-12) asociadas a la curva Mejor de vulnerabilidad (Mejor - σ , Mejor, Mejor + σ), el grado de daño moderado en el edificio BCN1 tiene un periodo de retorno que varía entre 135 y 234 años, con un valor medio de 180 años. Sin embargo, de acuerdo con las curvas de riesgo asociadas a la curva Superior de vulnerabilidad (Superior - σ , Superior, Superior + σ), el grado de daño moderado en el edificio BCN1 tiene un periodo de retorno que varía entre 99 y 159 años, con un valor medio de 127 años.

Por otra parte, si se consideran las curvas de riesgo asociadas a la curva Superior de vulnerabilidad (Figura 3-12), entonces, es posible señalar que en el edificio BCN1 el grado de daño que tiene un periodo de retorno de 475 años, es un valor que varía entre 3.1 y 3.8, con un valor medio de 3.4. Mientras que el grado de daño, que tiene un periodo de retorno de 2475 años, es un valor que varía entre 4.3 y 4.9, con un valor medio de 4.6. Por otra parte, si únicamente se consideran las curvas asociadas a la curva Mejor de la vulnerabilidad (Mejor - σ , Mejor, Mejor + σ), entonces, es posible señalar que, para este edificio BCN1, el grado de daño que tiene un periodo de retorno de 2475 años, es un valor que varía entre 3.9 y 4.5, con un valor medio de 4.3.

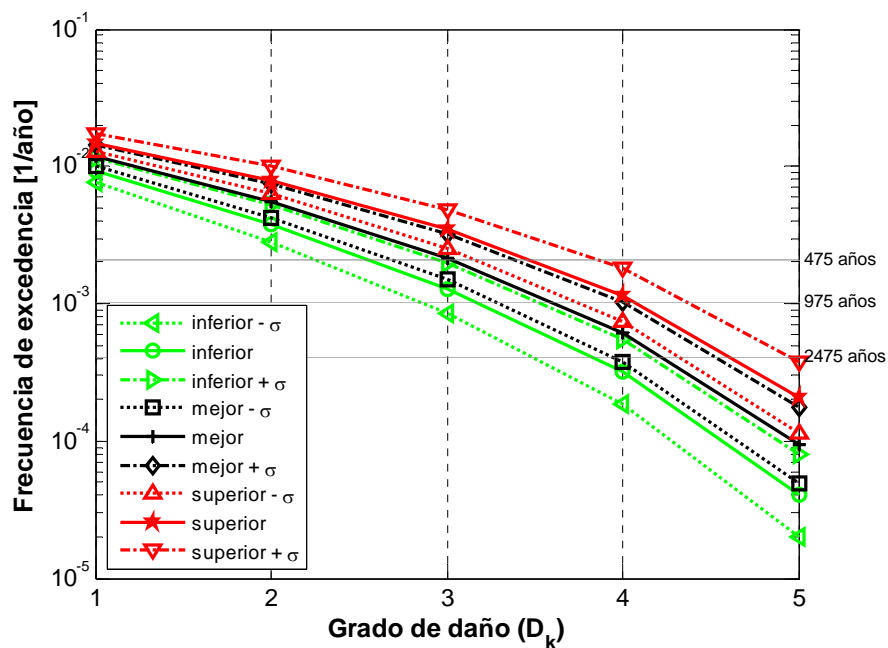


Figura 3-12. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN1 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad sísmica para Barcelona de la Figura 3-4.

De manera similar al tomar en cuenta la información correspondiente al edificio BCN2 se obtienen las curvas de riesgo sísmico de dicho edificio, las cuales se indican en la Figura 3-13. Al observar dicha figura, es posible identificar que de acuerdo con las curvas de riesgo sísmico asociadas a la curva Superior de vulnerabilidad (Superior - σ , Superior, Superior + σ), el grado de daño moderado en el edificio BCN2 tiene un periodo de retorno que varía entre 170 y 265 años, con un valor medio de 216 años. Mientras que de acuerdo con estas mismas curvas, es posible señalar que para este edificio BCN2, el grado de daño que tiene un periodo de retorno de 2475 años, es un valor que varía entre 4.3 y 4.9, con un valor medio de 4.6.

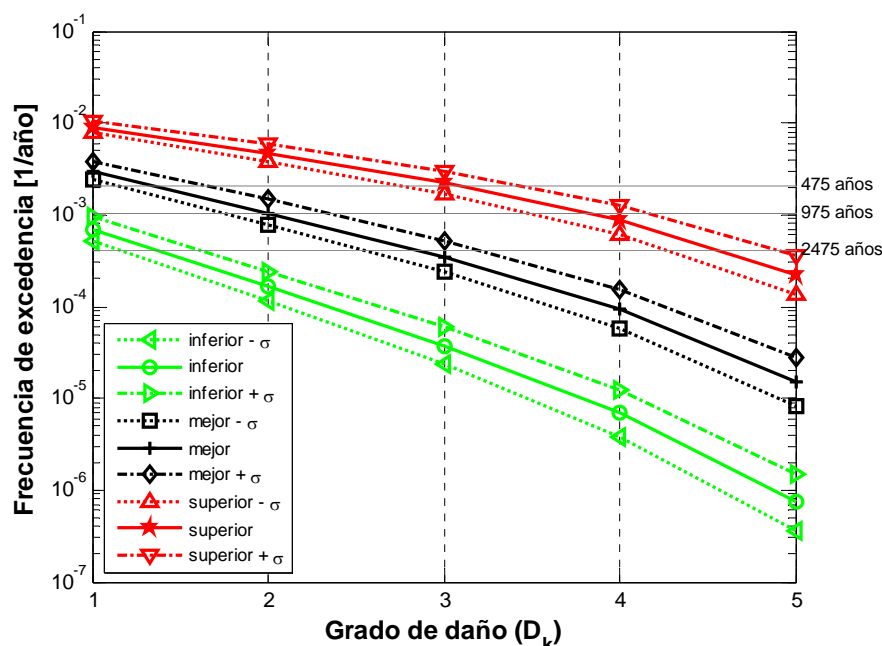


Figura 3-13. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN2 en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño, obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad sísmica para Barcelona de la Figura 3-4.

3.7 Resumen y discusión

En el presente capítulo se han descrito las principales características de la metodología LM1_P para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. Enseguida se realizan comentarios respecto a los principales elementos de la metodología probabilista LM1_P.

Estimación de la peligrosidad sísmica

Para estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P se ha propuesto el uso de curvas de peligrosidad sísmica obtenidas mediante un análisis probabilista. Para obtener las curvas de peligrosidad sísmica, se propone el uso del código CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008). Tal código actualiza el modelo probabilista propuesto por Cornell-Esteva para estimar la peligrosidad sísmica y versiones previas de dicho código fueron empleadas en el proyecto Risk-UE (Faccioli et al, 2003).

Estimación de la vulnerabilidad sísmica

En el método LM1_P la vulnerabilidad sísmica de cada edificio se representa mediante funciones de probabilidad, que describen la probabilidad de que un índice de vulnerabilidad tome diferentes valores. Particularmente, la vulnerabilidad sísmica de cada edificio se representa mediante funciones de probabilidad que se obtienen al considerar tanto la tipología estructural del edificio, como el factor de

fiabilidad asociado a la asignación de dicha tipología. También se tienen en cuenta modificadores de la vulnerabilidad sísmica.

La forma de considerar la vulnerabilidad sísmica de los edificios en el método LM1_P constituye una diferencia importante con respecto a la forma en que se considera la vulnerabilidad en el método LM1 de Risk-UE. La principal diferencia se debe a que en el presente método la vulnerabilidad sísmica de cada edificio se representa mediante funciones de probabilidad, y no mediante un escalar como se hace en el método LM1 de Risk-UE.

Estimación de la distribución del grado de daño

En el método LM1_P se emplea la función de daño que fue propuesta en el método LM1 de Risk-UE, la cual se caracteriza por ser una función semi-empírica que permite estimar la distribución del daño a partir de un valor determinado de la intensidad macrosísmica, y de un valor específico del índice de vulnerabilidad. De manera que en la fase actual de desarrollo del método LM1_P las funciones de daño se mantienen deterministas.

Como línea de trabajo futuro se apunta la conveniencia de considerar el error asociado a la calibración de la función de daño. Se indican a continuación algunas sugerencias. Uno de los caminos posibles podría basarse en ecuaciones como las 3-38 y 3-41, mediante las cuales se obtendrían valores del grado de daño medio menos un error y más un error, respectivamente. Es decir, los parámetros involucrados en la ecuación de daño se modifican, mediante las ecuaciones 3-39 y 3-40, en función de las incertidumbres involucradas. Así, el valor de γ en estas ecuaciones 3-39 y 3-40, se puede obtener mediante un proceso de calibración. Por ejemplo, es posible considerar a 0.44 como el valor máximo del error en la estimación del daño medio. Dicho valor corresponde a la diferencia máxima que se presenta entre el valor de daño medio que se obtiene mediante la Ec. 3-37, y el valor de daño medio que se obtiene al aplicar la Ec. 3-42 (Bernardini et al, 2007a; 2007b), para un mismo valor del índice de vulnerabilidad y de la intensidad macrosísmica, y al considerar todos los valores del índice de vulnerabilidad V comprendidos entre 0 y 1, y los valores de la intensidad macrosísmica desde V hasta XII. El valor de γ igual a 0.013 en las ecuaciones 3-38 y 3-41, permite cumplir con el criterio de que en ningún caso los valores del grado de daño medio con error difieran del valor del grado daño medio en más de 0.44. En la Figura 3-14 se muestran las curvas del grado de daño medio que se obtienen al evaluar las ecuaciones 3-37 y 3-42 para dos valores del índice de vulnerabilidad y para ocho valores de la intensidad macrosísmica.

$$\mu_{D-error} = 2.5 \cdot F_{(-)} \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 \cdot F_{(-)} \cdot V - 13.1 \cdot F_{(+)}}{2.3 \cdot F_{(-)}} \right) \right] \quad 3-38$$

$$F_{(-)} = 1 - \gamma \quad 3-39$$

$$F_{(+)} = 1 + \gamma \quad 3-40$$

$$\mu_{D+error} = 2.5 \cdot F_{(+)} \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 \cdot F_{(+)} \cdot V - 13.1 \cdot F_{(-)}}{2.3 \cdot F_{(+)}} \right) \right] \quad 3-41$$

$$\mu_D = \left[2.5 + 3 \tanh \left(\frac{I + 6.25V - 12.7}{3} \right) \right] \cdot f(V, I) \quad ; 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad 3-42$$

donde $f(V, I)$ es una función que depende del índice de vulnerabilidad y la intensidad I . El valor de esta última función se determina mediante la Ec. 3-43.

$$f(V, I) = \begin{cases} e^{\frac{V}{2}(I-7)} & I \leq 7 \\ 1 & I > 7 \end{cases} \quad 3-43$$

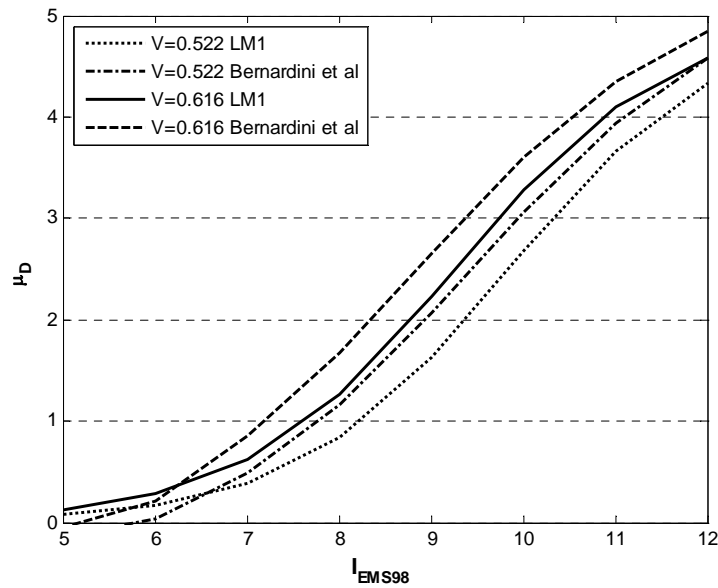


Figura 3-14. Comparación de las curvas del grado de daño medio que se obtienen para los índices de vulnerabilidad iguales a 0.522 y 0.616, cuando se emplean la función de daño del método LM1 (Ec. 3-37) y la función de daño propuesta por Bernardini et al (2007a) (Ec. 3-42).

Por otra parte, en la Figura 3-15 se observan las curvas de daño que se obtienen al emplear las ecuaciones 3-37, 3-38 y 3-41, para un valor de V igual a 0.522 y para 5 valores de la intensidad macrosísmica. Los diferentes valores que se obtienen al aplicar las ecuaciones 3-37 y 3-42, indican un orden de la magnitud

del error que es posible esperar en la estimación del grado de daño medio a través de dichas ecuaciones. La forma ideal de llevar a término esta calibración es a partir del uso de datos de daños ocurridos en terremotos. En el presente trabajo no se consideró el error en la estimación del grado de daño medio para estimar el riesgo sísmico de los edificios, debido a que no se dispuso de datos para realizar una adecuada calibración de la magnitud del error en la estimación del grado de daño medio. De manera que es conveniente que en estudios futuros se realicen trabajos que permitan estimar el error en la estimación del grado de daño medio, para obtener curvas como las de la Figura 3-16.

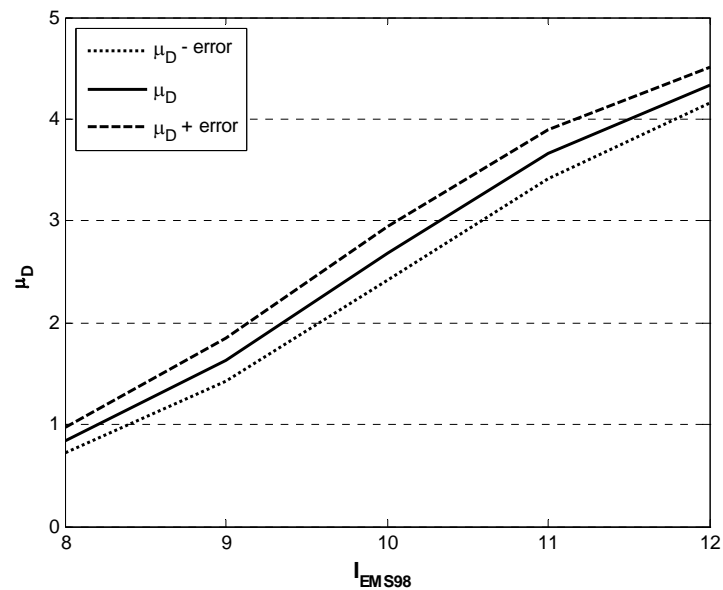


Figura 3-15. Curvas del grado de daño medio para $V=0.522$, obtenidas mediante la ecuación 3-37, y mediante las ecuaciones 3-38 y 3-41, para un valor de $\gamma = 0.013$.

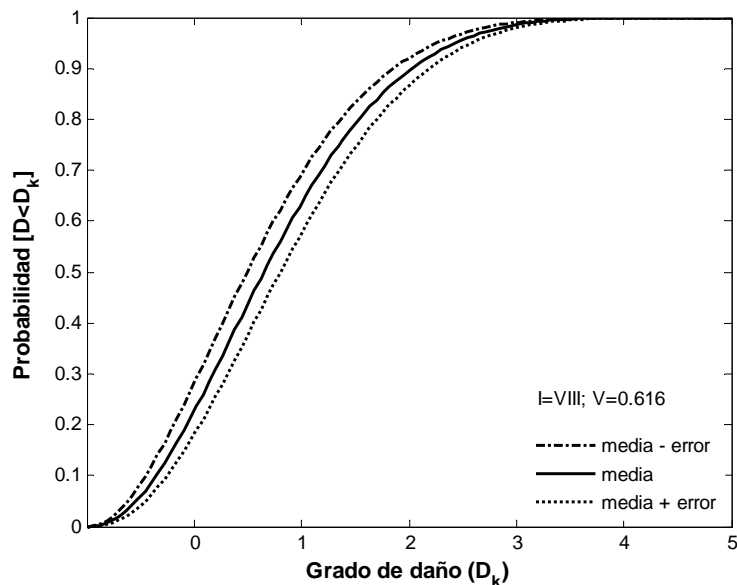


Figura 3-16. Curvas de probabilidad acumulada del grado de daño (D_k) para $I=VIII$ y $V=0.616$.

Estimación del riesgo sísmico

La metodología LM1_P permite hacer estimaciones probabilistas del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas. Al aplicar dicha metodología se obtienen para cada edificio curvas de riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia del grado de daño. Dichas curvas muestran estimaciones del daño asociadas a diferentes periodos de retorno. Por lo tanto, tal información suele ser de gran utilidad en la gestión del riesgo sísmico de los edificios de las zonas urbanas.

Debido a que la metodología LM1_P tiene como objetivo principal estimar el riesgo sísmico de los edificios en zonas urbanas, se ha considerado oportuno generar un código de ordenador que contribuyese a facilitar la aplicación de dicha metodología. Las principales características de dicho código se incluyen en el capítulo siguiente. Por otra parte, para identificar las ventajas y las limitaciones de la metodología LM1_P, se ha empleado dicha metodología para estimar el riesgo sísmico de los edificios residenciales de la ciudad de Barcelona. La aplicación a Barcelona se describe a partir del capítulo 5.

CAPÍTULO 4: CÓDIGO DE CÓMPUTO USERISK 2011

4.1 Introducción

La estimación del riesgo sísmico mediante la metodología LM1_P, puede realizarse mediante el empleo de los códigos CRISIS2008 y USERISK 2011 (Figura 4-1). El código CRISIS2008 y versiones anteriores del mismo (CRISIS2007, CRISIS2003, CRISIS99) son programas específicos para el análisis de la peligrosidad sísmica, que han sido desarrollados, principalmente, en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Ordaz et al, 2008; 2007; 2003; 1999), y se han convertido en una referencia internacional y un estándar de análisis probabilista del peligro sísmico. Versiones anteriores al CRISIS2008 fueron tomadas por el proyecto Risk-UE como modelo para el análisis del peligro sísmico (Faccioli et al, 2003). Por otra parte, el programa USERISK 2011 implementa el método LM1_P y es una contribución de esta tesis. USERISK 2011 puede emplear los resultados de peligrosidad sísmica generados mediante el código CRISIS2008 para estimar el riesgo sísmico de edificios. En este estudio, la peligrosidad sísmica obtenida mediante el CRISIS2008, está expresada en términos de tasas de excedencia de intensidades sísmicas. Este capítulo se dedica a describir las principales características de USERISK 2011, y en el anexo C se proporciona información adicional referente al uso del mismo.

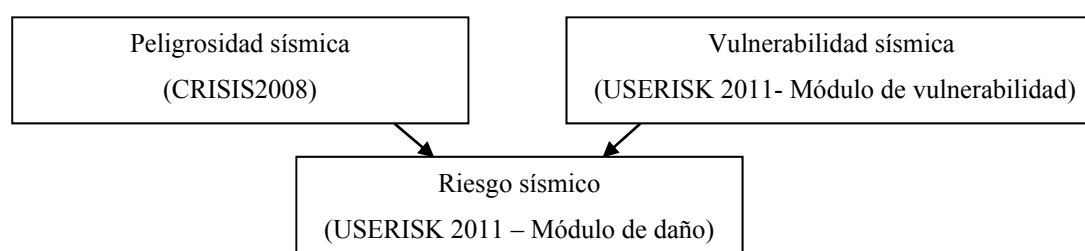


Figura 4-1. Módulos para la estimación del riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, mediante la metodología LM1_P.

4.2 Visión general

El nombre de USERISK corresponde a un acrónimo de *Urban Seismic Risk*. El código USERISK requiere para su ejecución el sistema operativo *Windows*®. La Figura 4-2 muestra la pantalla principal de la aplicación. Esta pantalla es la interfaz que permite la interacción del usuario con el programa. Pueden observarse en ella las pestañas correspondientes a los principales módulos del programa. El código

USERISK puede emplearse para estimar el riesgo sísmico de los edificios de cualquier zona urbana, sin embargo, debido a que en el presente trabajo se estima el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona, los ejemplos de uso de USERISK en el presente capítulo están referidos a edificios de dicha ciudad. En el anexo C se menciona el procedimiento para el uso de USERISK, en la estimación del riesgo sísmico de edificios en cualquier zona urbana. Para facilitar el uso de los potenciales usuarios de USERISK en dicho código se usa el idioma inglés, el cual también es el idioma usado en el CRISIS2008.



Figura 4-2. Pantalla principal del código USERISK 2011.

4.2.1 Principales módulos

Los principales módulos de USERISK son: 1) **Archivo (File)**; 2) **Datos (Data)**; 3) **Ejecutar (Run)**; 4) **Herramientas (Tools)** y; 5) **Ayuda (Help)**. El módulo **Archivo** permite gestionar información sobre el estudio por realizar, y finalizar la ejecución de USERISK. Por otra parte, a través del módulo **Datos** es posible observar y asignar información requerida por USERISK, para estimar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios. Mientras que el módulo **Ejecutar** permite iniciar el cálculo de la vulnerabilidad sísmica y del riesgo sísmico de los edificios. Por otra parte, el módulo **Herramientas** facilita el acceso a gráficas de resultados de vulnerabilidad y riesgo sísmico. Finalmente, el módulo **Ayuda** ofrece información relacionada con el uso de USERISK, e información sobre la versión de dicho código.

4.2.2 Datos

USERISK emplea diferentes tipos de datos para realizar la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios. Particularmente, necesita datos sobre la peligrosidad sísmica de la región de estudio, e información sobre los edificios. Respecto a la peligrosidad sísmica, USERISK requiere la

información que define a las curvas que representan la peligrosidad sísmica de la región en estudio. Tal como se indicó en el capítulo anterior las curvas de peligrosidad sísmica empleadas en el método LM1_P, se definen mediante tasas anuales de excedencia de intensidades macrosísmicas. Más adelante se dan detalles sobre los datos específicos que requiere USERISK, para definir las curvas de peligrosidad sísmica. Por otra parte, USERISK requiere datos específicos de los edificios, siendo el dato de la tipología estructural uno de los más importantes. Más adelante se indican con detalle la totalidad de los datos requeridos por cada edificio.

En resumen, los datos principales requeridos por USERISK están asociados a la peligrosidad sísmica de la región de estudio, y a los datos de cada edificio por estudiar. Por tal razón, la información más relevante requerida por USERISK, se asigna mediante los dos archivos siguientes:

- 1) Archivo de datos de los edificios. Este archivo contiene los datos de cada edificio por estudiar y;
- 2) Archivo de las curvas de peligrosidad sísmica. Este archivo contiene la información que define a las curvas de peligrosidad sísmica, que se emplearán en la estimación del riesgo sísmico de los edificios.

4.2.3 Resultados

El principal objetivo de USERISK es estimar el riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1_P descrita en el capítulo 3. Por ello, los principales resultados que se pueden obtener mediante dicho código son las curvas de vulnerabilidad sísmica, y las curvas de riesgo sísmico de los edificios. Particularmente, USERISK calcula las curvas de vulnerabilidad Inferior, Mejor y Superior de cada edificio. De manera que USERISK obtiene los valores de los parámetros α y β correspondientes a la función de probabilidad beta, que define cada curva de vulnerabilidad sísmica. Cada una de estas curvas describe la probabilidad acumulada de que el índice de vulnerabilidad del edificio no sobrepase cualquier valor del intervalo definido por el límite inferior V_a y por el límite superior V_b (valores que por defecto USERISK considera como -1 y 2, respectivamente). Por otra parte, USERISK adopta los estados de daño definidos en la escala macrosísmica europea y, en consecuencia, estima, para cada edificio, las frecuencias anuales de excedencia de cinco estados de daño no nulos, mediante las cuales se determinan las curvas de riesgo sísmico de cada edificio.

USERISK ofrece la posibilidad de estimar también escenarios de riesgo sísmico mediante la metodología LM1 de Risk-UE. Esto último puede facilitar la comparación entre los resultados obtenidos mediante la metodología LM1 de carácter determinista, con los resultados generados mediante la metodología LM1_P de enfoque probabilista. Los resultados generados por USERISK se almacenan en archivos de texto.

Específicamente, USERISK genera archivos con los resultados de vulnerabilidad sísmica y con los resultados de riesgo sísmico.

4.2.4 Salidas gráficas

El código USERISK permite observar en una de sus pantallas las curvas de vulnerabilidad sísmica, y las curvas de riesgo sísmico obtenidas para cada edificio estudiado. Particularmente, es posible observar las curvas de vulnerabilidad Inferior, Mejor y Superior de cada edificio, junto con los parámetros α y β correspondientes a la función de probabilidad beta, que define cada una de dichas curvas. Por otra parte, USERISK dispone también de una pantalla en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico estimadas para cada edificio. En este caso pueden observarse tanto las curvas de riesgo sísmico en términos de tasas de excedencia de los estados de daño, como las curvas de riesgo sísmico en términos de los periodos de retorno de los estados de daño.

4.2.5 Vinculaciones con otros programas o plataformas

En la metodología LM1_P se recomienda el uso del código CRISIS2008, para la obtención de las curvas de peligrosidad sísmica, requeridas para estimar el riesgo sísmico de los edificios. Dicho código genera diversos archivos de resultados de la peligrosidad sísmica, siendo uno de ellos el que tiene la extensión “.gra” (Ordaz et al, 2008). De este último archivo puede tomarse la información requerida, para realizar el archivo de peligrosidad sísmica que necesita USERISK para estimar el riesgo sísmico de edificios, mediante la metodología LM1_P.

Por otra parte, USERISK genera archivos de resultados en formato de texto, que facilitan la representación de los resultados de vulnerabilidad y de riesgo sísmico en herramientas SIG. A manera de ejemplo, en los capítulos 6 y 7 del presente trabajo se incluyen mapas realizados en herramientas SIG, a partir de los archivos de resultados generados por USERISK.

4.3 Módulos del programa

En el presente apartado se detallan las principales funciones de cada módulo de USERISK.

4.3.1 Archivo (File)

En la Tabla 4-1 se indican las opciones disponibles en el módulo **Archivo** y sus principales funciones. Por ejemplo, mediante la opción **Nuevo (New)**, se inicia el procedimiento para generar un nuevo proyecto, siendo el primer paso del procedimiento la asignación de datos generales sobre el nuevo

proyecto. Más adelante se indica un ejemplo con los principales pasos requeridos para estimar la vulnerabilidad, y el riesgo sísmico de edificios mediante USERISK.

Tabla 4-1. Opciones del módulo Archivo (File) de USERISK 2011.

Archivo (File):

- **Nuevo (New).** Opción para iniciar un nuevo proyecto para calcular la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios. Al ejecutar esta opción se muestra una ventana en la que se ofrece la posibilidad de guardar en un archivo con extensión “.data” la información del proyecto existente en USERISK. Posteriormente, se muestra la pantalla en la que se deben asignar los primeros datos del nuevo proyecto (Figura 4-3).
- **Abrir (Open).** Opción para abrir un archivo correspondiente a un proyecto ya existente. El archivo del proyecto tiene extensión “.data” y contiene información general sobre el proyecto. En el anexo C se indica con detalle la información que contiene el archivo con extensión “.data”.
- **Guardar como (Save as).** Opción para guardar en un archivo con extensión “.data” los datos generales del proyecto. Este archivo contiene datos y metadatos².
- **Salir (Exit).** Opción para finalizar la ejecución del código USERISK.

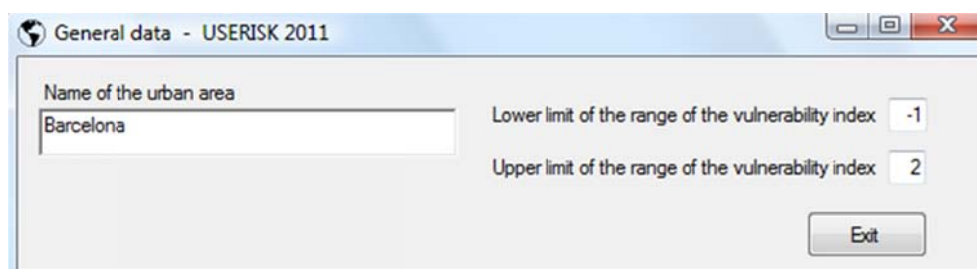


Figura 4-3. Pantalla de USERISK en la que se asignan o muestran el nombre de la ciudad o zona de estudio, y los límites del índice de vulnerabilidad sísmica.

4.3.2 Datos (Data)

El módulo **Datos** contiene opciones (Tabla 4-2) que permiten asignar la información sobre los edificios y sobre la peligrosidad sísmica, requerida por USERISK para estimar tanto la vulnerabilidad sísmica como el riesgo sísmico de edificios. La información sobre los edificios se asigna principalmente, mediante un archivo de texto con extensión “.cvs”, que debe contener la información indicada en la Tabla 4-3. Mientras que la información sobre la peligrosidad sísmica se asigna mediante un archivo de texto con extensión “.hz”, que debe incluir los datos indicados en la Tabla 4-4. En el anexo C se indica el formato que deben cumplir dichos archivos.

² Metadatos. Datos que describen o indican información sobre otros datos.

Tabla 4-2. Opciones del módulo datos (Data) de USERISK 2011.

Datos (Data):

- **Generales (General).** Muestra la pantalla (Figura 4-3) donde se debe indicar el nombre de la ciudad o zona urbana que se estudiará, y los valores (V_a y V_b de la Ec. 3-13), que delimitan el intervalo de valores válido para el índice de vulnerabilidad.
- **Edificios (Buildings).** Muestra la pantalla (Figura 4-5) donde se debe indicar el número de edificios que se estudiarán y la ubicación del archivo de texto con extensión “.csv” (Tabla 4-3), que contiene los datos de cada uno de los edificios de los que se quiere estimar su vulnerabilidad y riesgo sísmico. En el anexo C se indican detalles sobre la creación del archivo con extensión “.csv”.
- **Peligrosidad Sísmica (Seismic hazard).** Muestra la pantalla (Figura 4-4) donde se debe indicar la ubicación del archivo de texto con extensión “.hz” (Tabla 4-4), que contiene los datos de las curvas de peligrosidad sísmica que se usarán para estimar el riesgo sísmico de los edificios. En el anexo C se indican detalles sobre la creación del archivo con extensión “.hz”.
- **Establecer archivos de resultados (Set output files).** Muestra la pantalla donde es posible indicar los archivos de resultados opcionales que se requiere genere USERISK.

Tabla 4-3. Descripción de los datos que debe contener el archivo de texto con extensión “.csv”, mediante el cual se proporcionan los datos de los edificios de Barcelona, de los cuales se requiere estimar su vulnerabilidad y riesgo sísmico.

No.	Descripción	Ejemplo	
		Edificio E-1	Edificio E-2
1	Número de orden del edificio dentro de la base de datos.	1	2
2	Código de identificación del edificio.	111	211
3	Código de la parcela.	11	21
4	Código de la manzana.	1	2
5	Código de la zona ZRP.	1	2
6	Código del barrio.	1	2
7	Código del distrito.	1	2
8	Área del edificio (m ²).	228.44	194.01
9	Perímetro del edificio (m).	88.46	83.83
10	Número de niveles.	9	10
11	Código de la tipología estructural.	M33	RC32
12	Factor de fiabilidad de la tipología estructural.	7	9
13	Año de construcción.	1931	1975
14	Zona sísmica (Tabla 5-6).	R	II
15	Código del estado de conservación (Tabla 3-4).	R	N
16	Código de la posición del edificio en la manzana (Tabla 6-11).	1	0
17	Código de la diferencia de la altura del edificio con respecto a la de los edificios adyacentes (Tabla 6-12).	0	1

Tabla 4-4. Datos que debe contener el archivo de peligrosidad sísmica con extensión “.hz”, mediante el cual se define la peligrosidad sísmica que se usará para estimar el riesgo sísmico de edificios.

No.	Descripción	Ejemplo para Barcelona (Adaptadas de Secanell et al, 2004)				
1	Número de puntos que definen a la curva 1 de peligrosidad sísmica (Curva media - σ).	4				
2	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva 1 de peligrosidad sísmica (Curva media - σ).	4.69	5.69	6.5	7.4	
3	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva 1 de peligrosidad sísmica (Curva media - σ).	2.70E-02	4.90E-03	1.10E-03	1.00E-04	
4	Número de puntos que definen a la curva 2 de peligrosidad sísmica (Curva media).	5				
5	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva 2 de peligrosidad sísmica (Curva media).	5	5.5	6.5	7.5	8
6	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva 2 de peligrosidad sísmica (Curva media).	2.70E-02	1.20E-02	1.90E-03	2.10E-04	6.20E-05
7	Número de puntos que definen a la curva 3 de peligrosidad sísmica (Curva media + σ).	5				
8	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva 3 de peligrosidad sísmica (Curva media + σ).	5.31	5.5	6.5	7.5	8.15
9	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva 3 de peligrosidad sísmica (Curva media + σ).	2.70E-02	2.13E-02	3.78E-03	5.50E-04	1.20E-04

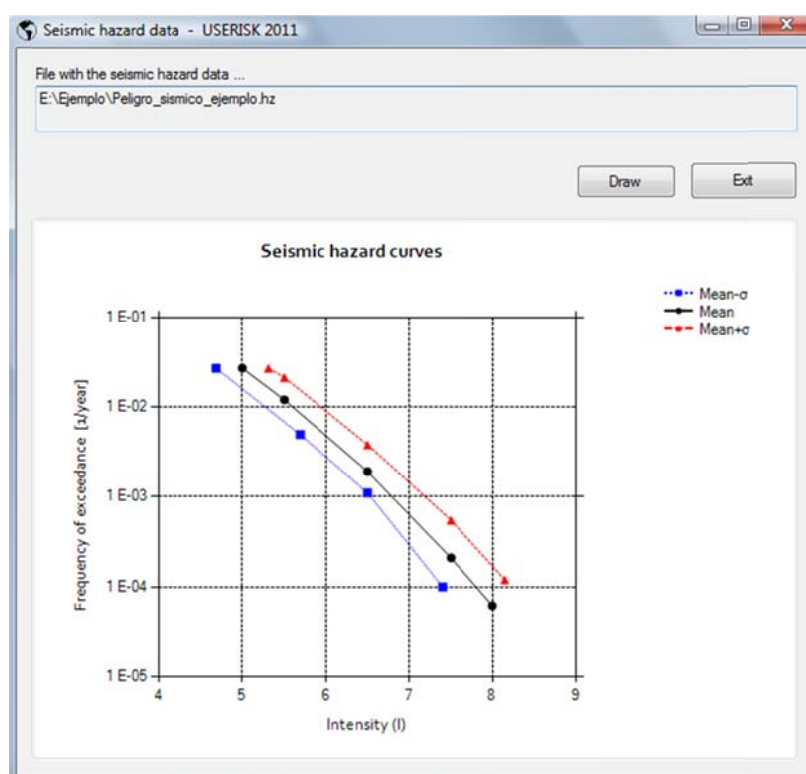


Figura 4-4. Pantalla de USERISK 2011 en la que se asigna el archivo con extensión “.hz”, que contiene la información que define a las curvas de peligrosidad sísmica. Las curvas de peligrosidad sísmica mostradas en la presente figura se adaptaron para fines del ejemplo, a partir de las curvas que fueron estimadas para Barcelona por Secanell et al (2004).

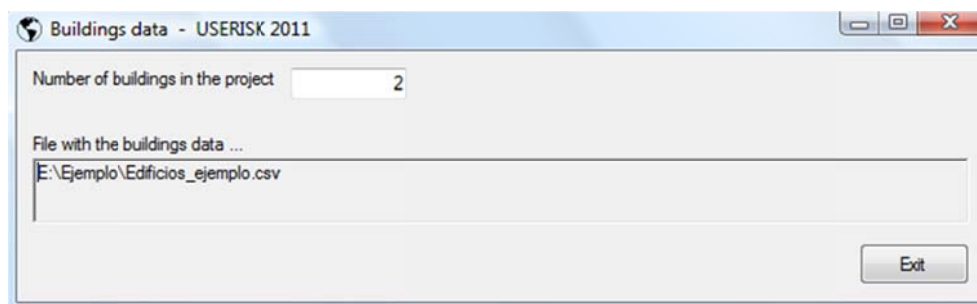


Figura 4-5. Pantalla de USERISK 2011 en la que es posible proporcionar información sobre los edificios por estudiar.

4.3.3 Ejecutar (Run)

Mediante el módulo **Ejecutar** (Tabla 4-5) es posible iniciar la estimación de la vulnerabilidad sísmica y del riesgo sísmico, mediante el método LM1_P. Adicionalmente, es posible iniciar la estimación de escenarios de riesgo sísmico mediante el método LM1 de Risk-UE. Por ejemplo, cuando se elige la opción **Método LM1_P** del menú de **Vulnerabilidad sísmica**, USERISK realizará la estimación de la vulnerabilidad sísmica y generará por defecto el archivo de resultados con extensión “.vuln1”, cuyo contenido se indica en la Tabla 4-6. De manera similar, cuando se elige la opción **Método LM1_P** del menú de **Riesgo Sísmico**, USERISK realizará la estimación del riesgo sísmico y generará por defecto el archivo de resultados con extensión “.dam1”, cuyo contenido se indica en la Tabla 4-7. En el anexo C se incluye más información sobre los archivos de resultados que pueden ser generados por USERISK.

Tabla 4-5. Opciones del módulo Ejecutar (Run) de USERISK 2011.

Ejecutar (Run):

- **Vulnerabilidad sísmica (Seismic vulnerability):**
 - **Método LM1_P (LM1_P method).** Opción para iniciar el cálculo de la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante el método LM1_P. Mediante esta opción se calculan las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio.
 - **Método LM1 (LM1 method).** Opción para iniciar el cálculo de la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante el método LM1 de Risk-UE. Mediante esta opción se calcula el índice de vulnerabilidad total de cada edificio.
- **Riesgo sísmico (Seismic risk):**
 - **Método LM1_P (LM1_P method).** Opción para iniciar el cálculo de las curvas de riesgo sísmico de los edificios mediante el método LM1_P. Mediante esta opción se calculan para cada edificio, las curvas que expresan el riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia de los estados de daño.
 - **Método LM1 (LM1 method).** Opción para iniciar el cálculo del riesgo sísmico mediante el método LM1 de Risk-UE. Mediante esta opción se calculan escenarios de riesgo sísmico de cada edificio.

Tabla 4-6. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.vuln1”, el cual es generado por USERISK, para concentrar los resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos al aplicar la metodología LM1_P.

Tipo de información	Descripción	Ejemplo Edificio	
		E-1	E-2
Datos	1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos.	1	2
	2. Código de identificación del edificio.	111	211
	3. Código de la parcela.	11	21
	4. Código de la manzana.	1	2
	5. Código de la zona censal ZRP.	1	2
	6. Código del barrio.	1	2
	7. Código del distrito.	1	2
	8. Número de niveles.	9	10
	9. Código de la tipología estructural.	M33	RC32
	10. Factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural.	7	9
	11. Año de construcción.	1931	1975
	12. (V_a) = Límite inferior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	-1	-1
	13. (V_b) = Límite superior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	2	2
Resultados	14. Parámetro α_L de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	37.43	12.86
	15. Parámetro β_L de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	21.51	12.81
	16. Valor medio $\left(\overline{V_{I-L}}\right)$ de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.905	0.503
	17. Desviación estándar σ_L de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.187	0.290
	18. Parámetro α_m de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	35.57	13.34
	19. Parámetro β_m de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	17.31	12.31
	20. Valor medio $\left(\overline{V_I}\right)$ de la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	1.018	0.560
	21. Desviación estándar $\sigma_{\overline{V}}$ de la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.192	0.290
	22. Parámetro α_U de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	34.83	13.81
	23. Parámetro β_U de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	14.21	11.81
	24. Valor medio $\left(\overline{V_{I-U}}\right)$ de la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	1.131	0.617
	25. Desviación estándar σ_U de la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.192	0.290

Tabla 4-7. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.dam1”, el cual es generado por USERISK 2011, para concentrar resultados de riesgo sísmico obtenidos al aplicar la metodología LM1_P.

Tipo de información	Descripción
Datos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos. 2. Código de identificación del edificio. 3. Código de la parcela. 4. Código de la manzana. 5. Código de la zona censal ZRP. 6. Código del barrio. 7. Código del distrito. 8. Número de niveles. 9. Código de la tipología estructural. 10. Factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural. 11. Año de construcción. 12. Zona sísmica
Resultados	<ol style="list-style-type: none"> 13. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño [$v(D1)$, $v(D2)$, $(D3)$, $v(D4)$, $v(D5)$], que definen a la curva de riesgo sísmico Inferior - σ. Curva que se obtiene al considerar la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media - σ de la peligrosidad sísmica. 14. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Inferior. Curva que se obtiene al considerar la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media de la peligrosidad sísmica. 15. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Inferior + σ. Curva que se obtiene al considerar la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media + σ de la peligrosidad sísmica. 16. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Mejor - σ. Curva que se obtiene al considerar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica y la curva media - σ de la peligrosidad sísmica. 17. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Mejor. Curva que se obtiene al considerar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica y la curva media de la peligrosidad sísmica. 18. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Mejor + σ. Curva que se obtiene al considerar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica y la curva media + σ de la peligrosidad sísmica. 19. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Superior - σ. Curva que se obtiene al considerar la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media - σ de la peligrosidad sísmica. 20. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Superior. Curva que se obtiene al considerar la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media de la peligrosidad sísmica. 21. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Superior + σ. Curva que se obtiene al considerar la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media + σ de la peligrosidad sísmica.

4.3.4 Herramientas (Tools)

Mediante el módulo **Herramientas** (Tabla 4-8) es posible observar en pantallas de USERISK las curvas de vulnerabilidad sísmica, y las curvas de riesgo sísmico estimadas para cada edificio.

Tabla 4-8. Opciones del módulo Herramientas (Tools) de USERISK 2011.

Herramientas (Tools):

- **Curvas de vulnerabilidad sísmica (Seismic vulnerability curves).** Opción para abrir la pantalla donde es posible observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio, obtenidas mediante el método LM1_P.
- **Curvas de riesgo sísmico (Seismic risk curves).** Opción para abrir la pantalla donde es posible observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio, obtenidas mediante el método LM1_P.

4.3.5 Ayuda (Help)

Finalmente, a través del módulo Ayuda (Tabla 4-9), es posible acceder a información sobre el uso de USERISK y respecto a la versión de dicho código (Figura 4-6).

Tabla 4-9. Opciones del módulo Ayuda (Help) de USERISK 2011.

Ayuda (Help):

- **Índice (Index).** Opción que muestra la ayuda de USERISK.
- **Acerca de (About).** Opción que muestra la pantalla que contiene información sobre la versión del código USERISK.



Figura 4-6. Pantalla de USERISK con información general de dicho código.

4.4 Caso de aplicación (ejemplo)

4.4.1 Objetivo

Para mostrar los principales resultados que se pueden obtener mediante USERISK, se describe enseguida un ejemplo de aplicación en el que se estima el riesgo sísmico de 2 edificios de Barcelona, identificados como E-1 y E-2, respectivamente. En este ejemplo sólo se usan 2 edificios para facilitar la descripción del

uso de USERISK, sin embargo, es importante destacar nuevamente que el objetivo principal de la metodología LM1_P implementada en USERISK, es la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de un gran número de edificios que en las zonas urbanas modernas pueden ser de hasta varios cientos o miles de edificios.

En el presente trabajo se realiza también la aplicación a una zona urbana, específicamente, se estima la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios residenciales de Barcelona. Dicha aplicación se describe en los capítulos 5, 6 y 7.

4.4.2 Preparación del material: datos

Datos de los edificios

Para estimar el riesgo sísmico de los edificios E-1 y E-2, se requirió preparar un archivo, que en el presente ejemplo se denominó *Edificios_ejemplo.csv*, que contiene los datos indicados en la Tabla 4-3. En dicha tabla se incluyen los datos correspondientes a los edificios E-1 y E-2. Particularmente, los datos del No. 1 al No. 7 proporcionan información de identificación de cada edificio dentro de la zona urbana. En este caso se emplean las divisiones administrativas utilizadas en Barcelona, desde la unidad básica denominada parcela hasta el distrito, que corresponde a la primera subdivisión administrativa que se hace de la superficie total de la ciudad. En el capítulo 6 se describe con detalle cada una de las divisiones administrativas de Barcelona. Los datos No. 8 y No. 9 corresponden al área y al perímetro del edificio, respectivamente. Mientras que el dato No. 10 es el número de niveles del edificio. El dato No. 11 es uno de los datos más importantes porque corresponde a la tipología estructural del edificio. En este caso USERISK requiere que se asigne la tipología estructural mediante los códigos definidos en Risk-UE, que en el caso de Barcelona se resumen en las tipologías de la Tabla 3-2. Enseguida es necesario establecer el factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural (dato No. 12), que corresponde a un número entre 0 y 10, y cuyo significado se describió en el capítulo 3. Adicionalmente, se requiere de cada edificio el año de su construcción (dato No. 13), y la zona sísmica en la que se localiza (dato No. 14). En el caso de Barcelona se debe asignar para cada edificio, el código que representa a su correspondiente zona sísmica (Tabla 5-6). Finalmente, es posible asignar tres valores que indiquen, el estado de conservación del edificio (dato No. 15), la posición del edificio en la manzana (dato No. 16) y la diferencia de la altura del edificio en estudio con respecto a la de los edificios adyacentes (dato No. 17). En la Tabla 3-4 se indican los posibles valores del código de conservación, y en la Tabla 6-11 y en la Tabla 6-12, se muestran las opciones posibles de los códigos empleados para representar la posición del edificio y la diferencia de alturas entre edificios, respectivamente. De manera que en este ejemplo el edificio E-1 corresponde a un edificio de mampostería (M33) de 9 niveles, y el edificio E-2 corresponde a

un edificio de hormigón (RC32) de 10 niveles. Los datos adicionales de cada uno de dichos edificios se indican en la Tabla 4-3.

Datos de la peligrosidad sísmica

En el presente ejemplo la peligrosidad sísmica se representa mediante las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, estimadas por Secanell et al (2004) (Figura 4-4). Para ello, se generó un archivo de datos que en el presente ejemplo se denominó *Peligro_sismico_ejemplo.hz*, que contiene la información indicada en la Tabla 4-4, en el formato descrito en el anexo C.

4.4.3 Ejecución del programa

Después de que se ha generado el archivo con los datos de los edificios (*Edificios_ejemplo.csv*), y el archivo con los datos de la peligrosidad sísmica (*Peligro_sismico_ejemplo.hz*), es posible emplear el código USERISK para obtener resultados de vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios. Para ello, una vez que se ha ejecutado el código USERISK y que se muestra la pantalla principal de dicho código (Figura 4-2), es necesario realizar los pasos siguientes:

Datos

1. Elegir la opción **General** del módulo **Datos**, y asignar en la pantalla que se mostrará (Figura 4-3), el nombre de la ciudad o zona urbana por estudiar. En el caso del presente ejemplo la ciudad es Barcelona. Adicionalmente, en la misma pantalla es posible modificar los límites de vulnerabilidad que considerará USERISK, para estimar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio. Por defecto USERISK considera el valor de -1 para el límite inferior del intervalo de valores del índice de vulnerabilidad (V_a), y de 2 para el límite superior del intervalo de valores del índice de vulnerabilidad (V_b). En el presente ejemplo, se adoptan los valores considerados por defecto por USERISK.
2. Elegir la opción **Edificios** del módulo **Datos**. Al hacerlo se mostrará la pantalla (Figura 4-5) en la que se debe proporcionar el número de edificios por estudiar, y en la que se debe asignar la ubicación del archivo que contiene los datos de los edificios (*Edificios_ejemplo.csv*).
3. Elegir la opción **Peligrosidad sísmica** del módulo **Datos**. Al hacerlo se mostrará una pantalla (Figura 4-4) en la que se debe indicar la ubicación del archivo “.hz”. En la misma pantalla es posible observar las curvas de peligrosidad sísmica generadas a partir de la información del archivo “.hz”.

Ejecución

4. Elegir la opción **Método LM1_P** del menú **Vulnerabilidad** del módulo **Ejecutar**, para iniciar la estimación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios. Una vez concluidos los cálculos se mostrará una pantalla que indicará el nombre y la ubicación del archivo o los archivos generados, que

contienen los resultados de vulnerabilidad. En dicha pantalla se ofrece la posibilidad de ver las curvas de vulnerabilidad sísmica estimadas.

5. Elegir la opción **Método LM1_P** del menú **Riesgo sísmico** del módulo **Ejecutar**, para iniciar la estimación del riesgo sísmico de los edificios. USERISK mostrará una pantalla para indicar la conclusión de los cálculos del riesgo sísmico. En la misma pantalla se indica el nombre y ubicación de los archivos de resultados generados, y dónde se pueden ver los resultados generados.

Herramientas

6. Dentro del propio USERISK es posible emplear la opción **Curvas de vulnerabilidad sísmica** del módulo de **Herramientas**, para ver las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio obtenidas por USERISK. Por ejemplo, en la Figura 4-7 y en la Figura 4-8, se muestran las curvas de vulnerabilidad sísmica que USERISK obtuvo para los edificios E-1 y E-2, respectivamente. De manera similar es posible emplear la opción **Curvas de riesgo sísmico** del mismo módulo, para ver las curvas de riesgo sísmico de cada edificio obtenidas por USERISK. Por ejemplo, en la Figura 4-9 y en la Figura 4-10, se muestran las curvas de riesgo sísmico de los edificios E-1 y E-2, respectivamente, en términos de las frecuencias de excedencia de los estados de daño. Mientras que en la Figura 4-11 y en la Figura 4-12, se muestran las curvas de riesgo sísmico en términos de los periodos de retorno de los estados de daño.

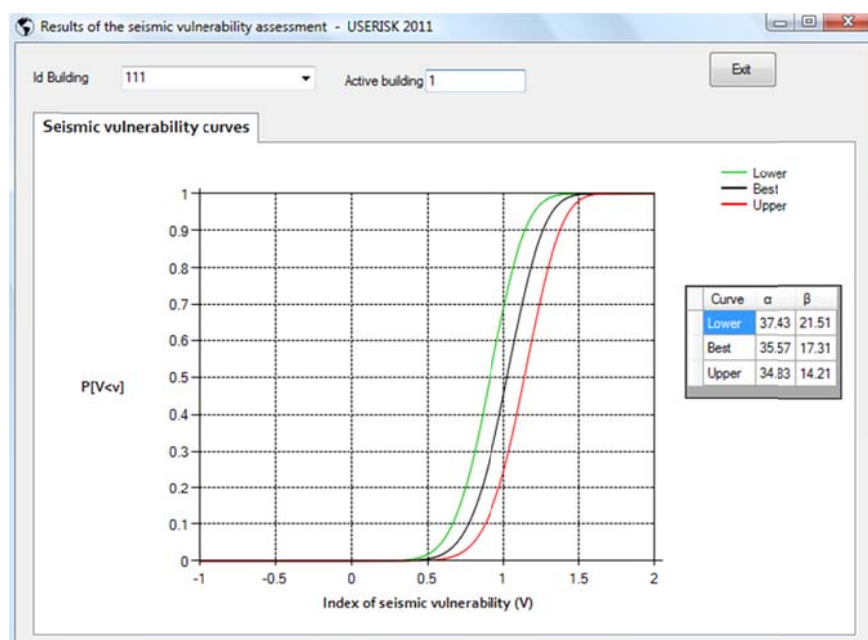


Figura 4-7. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado; en este caso se muestran las curvas y los respectivos parámetros α y β que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica (Inferior, Mejor y Superior) del edificio E-1.

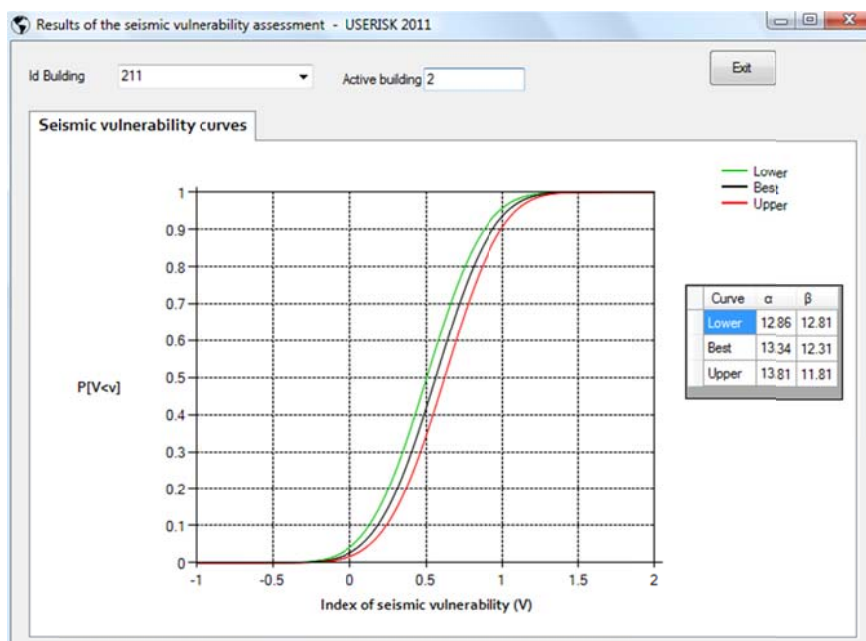


Figura 4-8. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado; en este caso se muestran las curvas y los respectivos parámetros α y β que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica (Inferior, Mejor y Superior) del edificio E-2.

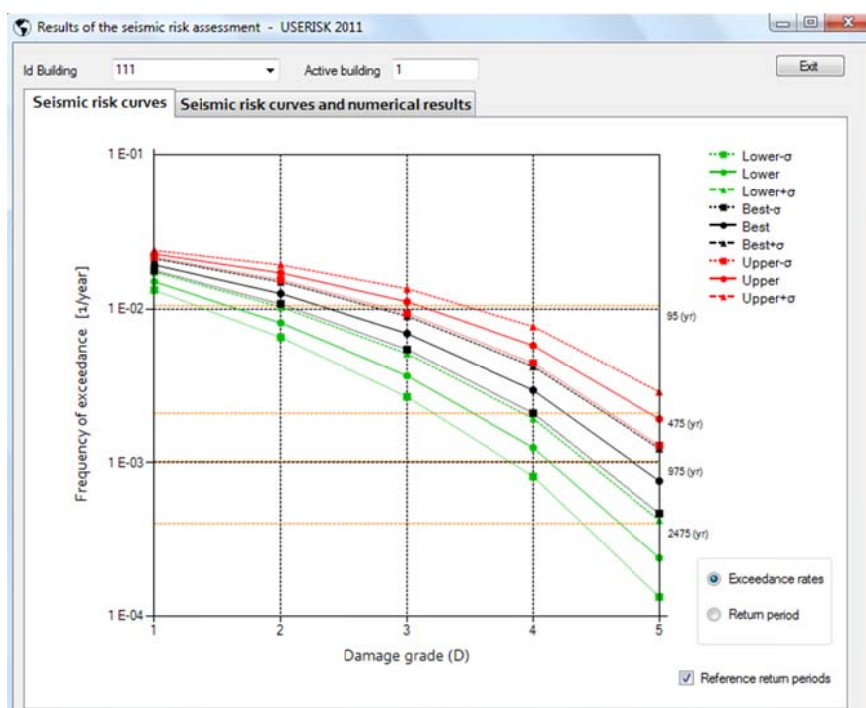


Figura 4-9. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-1, en términos de frecuencias anuales de excedencia del grado de daño.

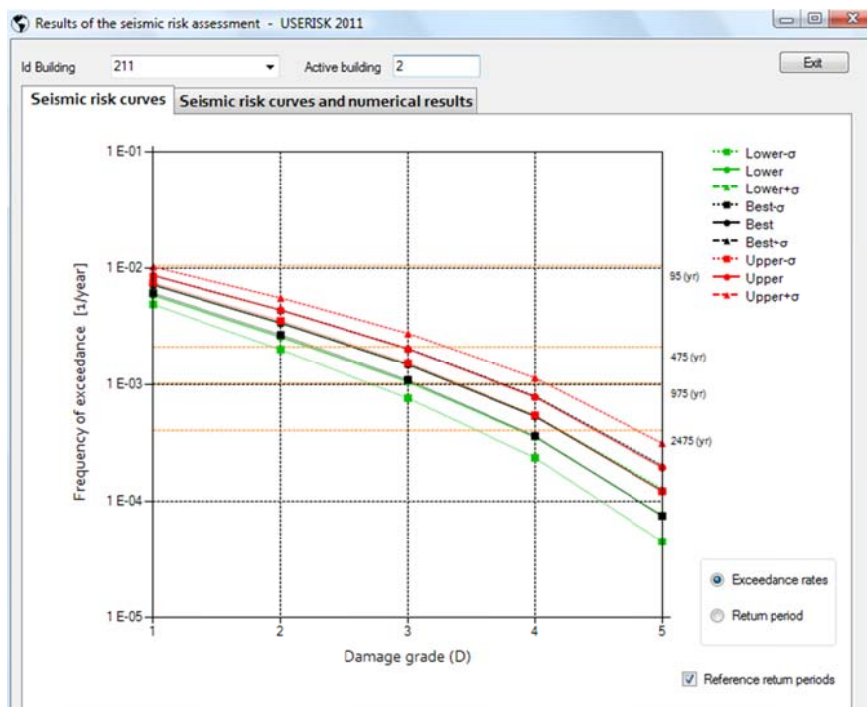


Figura 4-10. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-2, en términos de frecuencias anuales de excedencia del grado de daño.

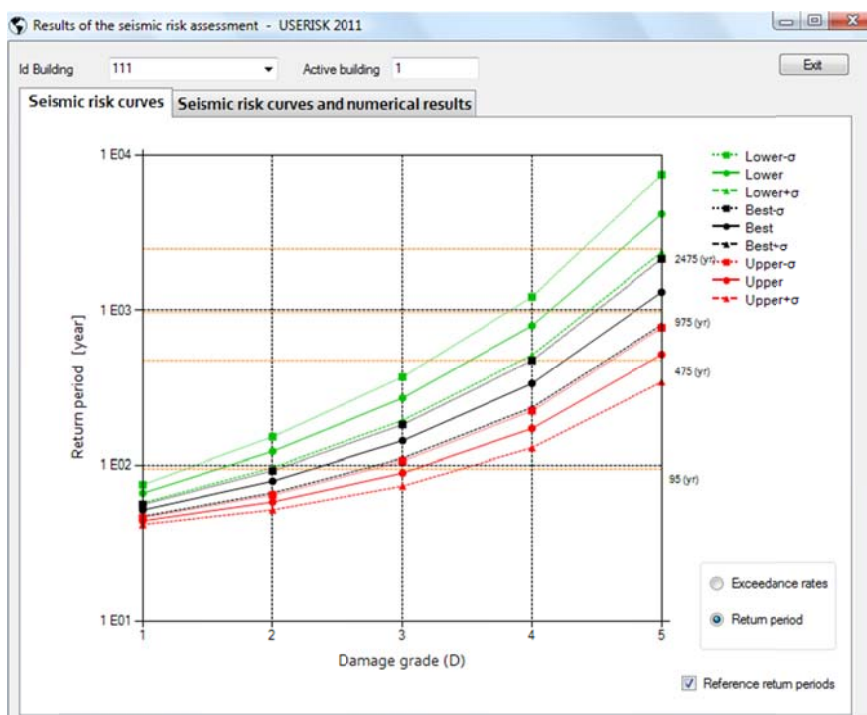


Figura 4-11. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-1, en términos de los periodos de retorno del grado de daño.

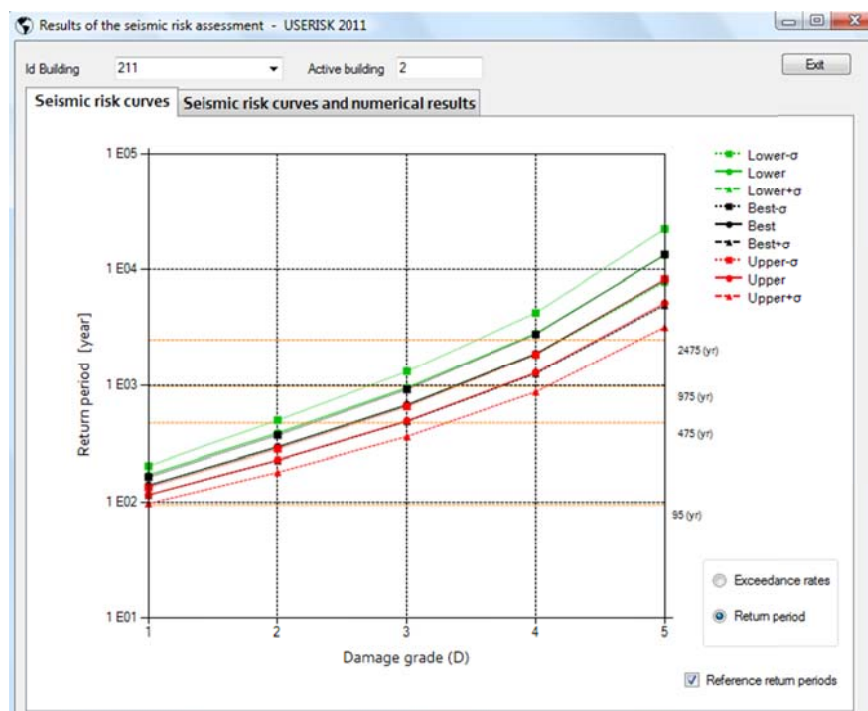


Figura 4-12. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio E-2, en términos de los periodos de retorno del grado de daño.

4.4.4 Análisis de resultados

Vulnerabilidad sísmica

A partir del archivo de resultados con extensión “.vuln1” generado por USERISK, que contiene la información descrita en la Tabla 4-6, es posible realizar la Tabla 4-10 y la Tabla 4-11. En la Tabla 4-10 se indican los principales parámetros que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica de los edificios E-1 y E-2. Por otra parte, los resultados de la Tabla 4-11 indican que en el edificio E-1 la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8, es un valor que varía entre el 71.73% y el 94.99%, con un valor medio del 86.87%. De manera similar, los resultados de la Tabla 4-11 muestran que en el edificio E-2 la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 es un valor que varía entre el 15.79% y el 27.11%, con un valor medio del 21%. Por lo tanto, a partir de estos resultados y al analizar las curvas de vulnerabilidad sísmica de la Figura 4-7 y de la Figura 4-8, es posible concluir que la vulnerabilidad sísmica del edificio E-1 es significativamente mayor que la vulnerabilidad sísmica del edificio E-2.

Tabla 4-10. Parámetros que definen a las curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios E-1 y E-2 de Barcelona.

Edificio	Curva Inferior				Curva Mejor				Curva Superior			
	α_L	β_L	$\overline{V_{I-L}}$	σ_L	α_m	β_m	$\overline{V_I}$	$\sigma_{\overline{V}}$	α_U	β_U	$\overline{V_{I-U}}$	σ_U
E-1	37.43	21.51	0.905	0.187	35.57	17.31	1.018	0.192	34.83	14.21	1.131	0.192
E-2	12.86	12.81	0.503	0.290	13.34	12.31	0.560	0.290	13.81	11.81	0.617	0.290

Tabla 4-11. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.1, en los edificios E-1 y E-2 de Barcelona.

Edificio	P($V > 0.5$)			P($V > 0.8$)			P($V > 1.1$)		
	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior
E-1	98.22	99.47	99.87	71.73	86.87	94.99	14.94	34.67	57.95
E-2	50.42	58.16	65.59	15.79	21.00	27.11	1.85	2.97	4.60

Riesgo sísmico

A partir del archivo de resultados con extensión “.dam1” generado por USERISK que contiene la información descrita en la Tabla 4-7, es posible realizar la Tabla 4-12, la Tabla 4-13 y la Tabla 4-14. De acuerdo con los resultados indicados en dichas tablas en el edificio E-1 la frecuencia anual de excedencia del grado de daño moderado (D2), es un valor que varía entre 6.54×10^{-3} y 1.92×10^{-2} , con un valor medio de 1.26×10^{-2} (Tabla 4-12). De manera similar en el edificio E-1 la frecuencia anual de excedencia del grado de daño 4 (a partir del cual se pueden presentar colapsos), es un valor que varía entre 8.17×10^{-4} y 7.70×10^{-3} , con un valor medio de 2.96×10^{-3} . En el caso del edificio E-2, la frecuencia anual de excedencia del grado de daño moderado (D2) es un valor que varía entre 2.0×10^{-3} y 5.55×10^{-3} , con un valor medio de 3.38×10^{-3} (Tabla 4-13). De manera similar en el edificio E-2 la frecuencia anual de excedencia del grado de daño 4, es un valor que varía entre 2.36×10^{-4} y 1.14×10^{-3} , con un valor medio de 5.31×10^{-4} .

Tabla 4-12. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño, en el edificio E-1 de Barcelona.

	Inferior - σ	Inferior	Inferior + σ	Mejor - σ	Mejor	Mejor + σ	Superior - σ	Superior	Superior + σ
v(D1)	1.32E-02	1.50E-02	1.73E-02	1.77E-02	1.93E-02	2.11E-02	2.15E-02	2.26E-02	2.39E-02
v(D2)	6.54E-03	8.12E-03	1.03E-02	1.08E-02	1.26E-02	1.49E-02	1.54E-02	1.71E-02	1.92E-02
v(D3)	2.69E-03	3.68E-03	5.13E-03	5.46E-03	6.93E-03	8.98E-03	9.37E-03	1.11E-02	1.35E-02
v(D4)	8.17E-04	1.25E-03	1.94E-03	2.11E-03	2.96E-03	4.24E-03	4.45E-03	5.79E-03	7.70E-03
v(D5)	1.34E-04	2.40E-04	4.24E-04	4.69E-04	7.63E-04	1.24E-03	1.29E-03	1.93E-03	2.89E-03

Por otra parte, si se analizan los resultados en términos de periodos de retorno, entonces, es posible identificar que en el edificio E-1 el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía desde 52 años hasta 153 años, con un valor medio de 80 años (Tabla 4-14). Mientras que en el edificio E-2 el

grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía desde 180 años hasta 500 años, con un valor medio de 296 años (Tabla 4-14). Por lo tanto, es posible concluir que el riesgo sísmico del edificio E-1, es significativamente mayor al riesgo sísmico del edificio E-2.

Tabla 4-13. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño, en el edificio E-2 de Barcelona.

	Inferior - σ	Inferior	Inferior + σ	Mejor - σ	Mejor	Mejor + σ	Superior - σ	Superior	Superior + σ
v(D1)	4.89E-03	5.85E-03	7.18E-03	6.09E-03	7.17E-03	8.66E-03	7.46E-03	8.65E-03	1.03E-02
v(D2)	2.00E-03	2.57E-03	3.40E-03	2.68E-03	3.38E-03	4.38E-03	3.52E-03	4.36E-03	5.55E-03
v(D3)	7.61E-04	1.05E-03	1.49E-03	1.09E-03	1.47E-03	2.05E-03	1.53E-03	2.03E-03	2.76E-03
v(D4)	2.36E-04	3.54E-04	5.42E-04	3.62E-04	5.31E-04	7.94E-04	5.42E-04	7.78E-04	1.14E-03
v(D5)	4.51E-05	7.59E-05	1.28E-04	7.48E-05	1.23E-04	2.02E-04	1.22E-04	1.95E-04	3.13E-04

Tabla 4-14. Periodos de retorno en años del estado de daño moderado (D2), en el edificio E-1 y en el E-2 de Barcelona.

Edificio	Inferior - σ	Inferior	Inferior + σ	Mejor - σ	Mejor	Mejor + σ	Superior - σ	Superior	Superior + σ
E-1	153	123	97	93	80	67	65	59	52
E-2	500	389	294	373	296	228	284	229	180

4.5 Resumen y conclusiones

El código USERISK 2011 facilita el empleo de la metodología LM1_P, para obtener curvas de riesgo sísmico de edificios en términos de frecuencias anuales de excedencia versus estados de daño. Además, mediante USERISK 2011 es posible calcular escenarios de riesgo sísmico de edificios mediante la metodología LM1 de Risk-UE.

La existencia de USERISK 2011 puede contribuir a que se realicen estudios de riesgo sísmico, en las zonas del mundo en las que no se han realizado recientemente este tipo de estudios. Además, USERISK 2011 constituye una herramienta que puede permitir que en las ciudades o zonas urbanas en las que se han estimado escenarios de riesgo sísmico mediante la metodología LM1 de Risk-UE, se calculen también las curvas de riesgo sísmico mediante la metodología LM1_P con enfoque probabilista. Por otra parte, USERISK 2011 es una herramienta que puede contribuir a que el riesgo sísmico de las zonas urbanas se estime en forma periódica.

En los siguientes capítulos se describirá un ejemplo completo de aplicación de la metodología LM1_P, para estimar el riesgo sísmico de los edificios residenciales de Barcelona. En dichos capítulos se mostrarán otros de los análisis que se pueden hacer con los resultados de vulnerabilidad y riesgo sísmico generados mediante USERISK 2011.

CAPÍTULO 5: PELIGROSIDAD SÍSMICA DE BARCELONA

5.1 Introducción

En el método LM1_P se recomienda estimar la peligrosidad sísmica por medio de la metodología probabilista indicada en el capítulo 3, mediante la cual es posible obtener curvas de frecuencias de excedencia de intensidades macrosísmicas. Por tal motivo, en el presente capítulo se describen los principales pasos requeridos para estimar mediante dicha metodología probabilista, las curvas de peligrosidad sísmica para Barcelona. Para tal fin, se analizan dos procedimientos: en el primero las curvas de tasas de excedencia de intensidades macrosísmicas se obtienen directamente, es decir, la sismicidad de las fuentes sísmicas se define en términos de intensidades macrosísmicas y se emplea una ley de atenuación de intensidades macrosísmicas. Mientras que en el segundo procedimiento las curvas de peligrosidad sísmicas en términos de intensidades macrosísmicas, se obtienen al transformar curvas de tasas de excedencia de la aceleración máxima del terreno (PGA). El primer procedimiento es el más recomendable para estimar la peligrosidad sísmica, requerida en el método LM1_P para estimar el riesgo sísmico de edificios. Sin embargo, el segundo procedimiento se considera en el presente trabajo para fines de comparación, y porque este procedimiento incluye consideraciones que pueden tomarse en cuenta en las regiones en las que los estudios de peligrosidad sísmica disponibles, están en términos de PGA.

La ciudad de Barcelona está situada en el noreste de la península Ibérica que suele considerarse como una microplaca que forma parte de la placa euroasiática, actuando de rótula en la interacción entre las placas Euroasiática y la Africana (Casas-Sainz y De Vicente, 2009; Rosenbaum et al, 2002; Jabaloy et al, 2002). Por otra parte, la distancia más cercana desde Barcelona a los bordes de la placa Euroasiática con la placa Africana, es de más de 500 kilómetros. De manera que la sismicidad que tiene mayor efecto sobre Barcelona, no es la que se produce en los límites de dichas placas tectónicas, sino la que se genera en el interior de la placa Euroasiática. Es importante destacar que se ha estimado que en el Cretácico temprano – Hauteriviano (hace aproximadamente 135 millones de años), la península Ibérica constituía una sola placa tectónica (Casas-Sainz y De Vicente, 2009; Jabaloy et al, 2002).

En la Figura 5-1 se muestran los epicentros de sismos de intensidades mayores o iguales a V, ocurridos entre los años 1152 y 1998, en la región de Catalunya y zonas aledañas. Tales sismos son relevantes

porque se considera que a partir del grado de intensidad V, se empieza a generar daño en edificaciones (Grünthal, 1998). En dicha figura puede observarse cómo la peligrosidad sísmica de la ciudad está bajo la influencia de las zonas costeras del mar Mediterráneo y, más al norte del Prepirineo y Pirineo.

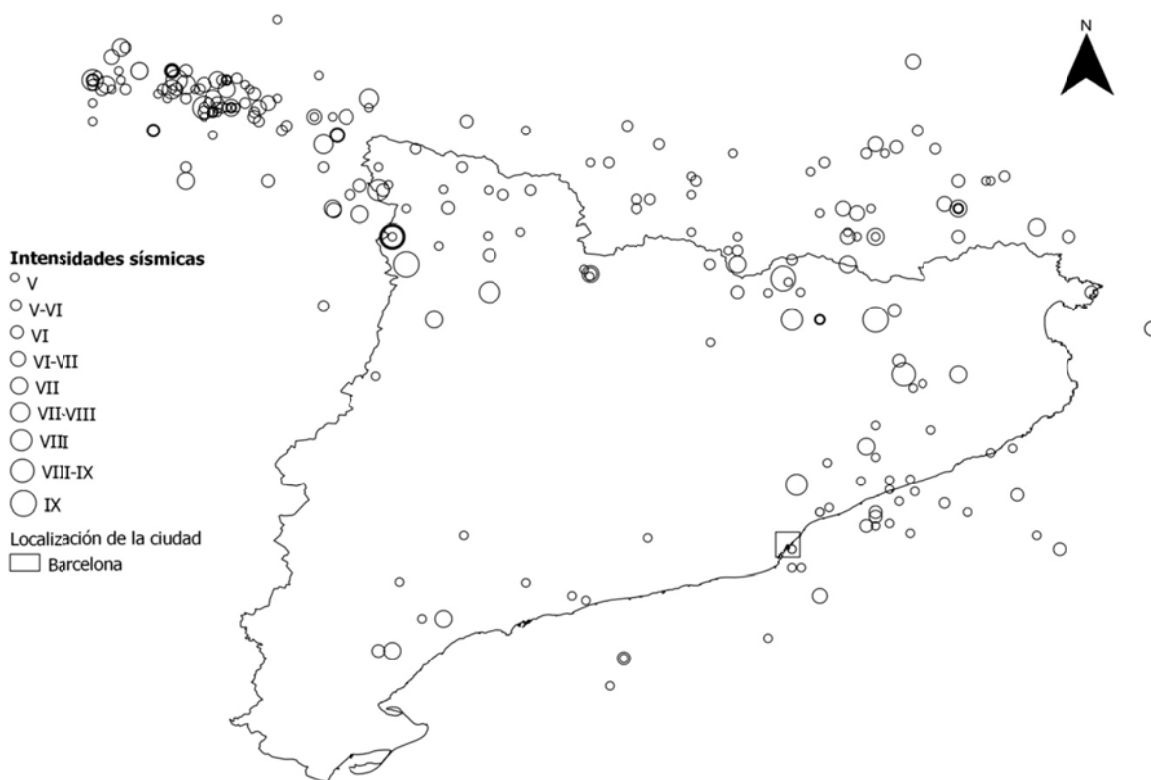


Figura 5-1. Ubicación de los principales epicentros de sismos con intensidades mayores o iguales a V, ocurridos entre los años 1152 y 1998 en la región de Cataluña y zonas aledañas (Susagna y Goula, 1999).

Al observar la Figura 5-1, es posible identificar que en Barcelona y en la región que rodea a dicha ciudad, han ocurrido sismos importantes. De manera que es posible afirmar que Barcelona ha estado sometida a significativos niveles de intensidad sísmica. Por ejemplo, la Tabla 5-1 muestra algunas de las intensidades sísmicas que se estima se han presentado en Barcelona.

Tabla 5-1. Grados de intensidad sísmica EMS-98 estimados en la ciudad de Barcelona, debidos a la ocurrencia de importantes sismos en los siglos XIV y XV (Olivera et al, 2006).

Fecha	Intensidad en la región de la ciudad de Barcelona
3-Marzo-1373	V-VI
2-Febrero-1428	VI-VII
25-Mayo-1448	V-VI

La información descrita anteriormente confirma la importancia de estimar, tanto la peligrosidad sísmica de Barcelona, como el riesgo sísmico asociado a dicha peligrosidad. Aunque la peligrosidad sísmica en la ciudad puede considerarse entre moderada y baja, el valor expuesto en Barcelona y el área metropolitana de influencia, tanto en población, como en infraestructuras y actividad económica, es muy importante, lo que hace que el riesgo sísmico no se pueda ignorar. Por tal motivo, se han desarrollado numerosas investigaciones relacionadas con la peligrosidad sísmica de Barcelona. Algunas de ellas corresponden a estudios específicos de la peligrosidad sísmica de Barcelona y Cataluña (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2004; Irizarry et al 2003b; Goula et al, 1997; Secanell, 1999), y otras corresponden a diferentes aspectos de la peligrosidad sísmica de Barcelona y de Cataluña (Secanell et al, 2008; Perea y Atakan, 2007; Ojeda et al, 2002; Jimenez et al, 2001; Secanell et al, 1999).

En el trabajo realizado por Secanell et al (1999), propusieron un mapa de zonas sísmicas de Cataluña, en términos de las intensidades MSK definidas por Medvedev, Sponheuer y Karnik (Musson y Cecic, 2002), asociadas a un periodo de retorno de 500 años. Específicamente, propusieron 5 zonas sísmicas para toda Cataluña, y ubicaron a Barcelona en la zona 2. A esta última zona le corresponde una intensidad sísmica entre VI y VII (MSK), para un suelo duro, y para un periodo de retorno de 500 años. Este último tipo de suelo se caracteriza por ser un material compacto, granular, con una velocidad de onda de cizalla entre 400 y 800 m/s, y con características mecánicas de buenas a muy buenas (Fleta et al, 1998).

A pesar de los diversos estudios de peligrosidad sísmica que se han hecho para Barcelona, en el presente trabajo se ha considerado conveniente realizar una nueva estimación de la peligrosidad sísmica de dicha ciudad, con la finalidad de:

1. Ilustrar el enfoque probabilista planteado en la metodología LM1_P, para estimar la peligrosidad sísmica,
2. Obtener resultados específicos de peligrosidad sísmica en términos completamente probabilistas, requeridos para estimar el riesgo sísmico mediante la metodología LM1_P y,
3. Incorporar a los análisis de peligrosidad las actualizaciones realizadas en los códigos de cómputo CRISIS2007 (Ordaz et al, 2007) y CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008).

En relación al código CRISIS2008, es importante señalar que se tuvo acceso al mismo durante la etapa final del desarrollo del presente trabajo, y mediante dicho código es posible hacer estimaciones de la peligrosidad que mediante el CRISIS2007 no era posible realizar. Esta es la razón principal por la que en el presente documento se incluyen cálculos realizados mediante el CRISIS2007 y el CRISIS2008, de los cuales se destacan sus diferencias. A continuación se describen los principales pasos considerados en el análisis de peligrosidad sísmica de Barcelona.

5.2 Geología

Los límites físicos de la actual ciudad de Barcelona han sido establecidos con la ayuda de 4 elementos naturales: el mar Mediterráneo, la sierra de Collserola, el río Besòs y el río Llobregat (Figura 5-2). La mayor parte de la ciudad está situada sobre un llano, el cual tiene una suave inclinación hacia el mar. Por otra parte, desde el punto de vista geomorfológico es posible distinguir dos unidades: a) los relieves montañosos que constituyen el substrato de la ciudad y, b) el llano. En el caso de los relieves montañosos, es posible encontrar materiales Paleozoicos y Terciarios, mientras que el llano de Barcelona se puede dividir en otras dos unidades geomorfológicas: 1) la zona central de la ciudad, compuesta de materiales de edad Pleistocena (2.5 Millones de años), y 2) los depósitos deltaicos de los ríos Besòs y Llobregat, los cuales están compuestos por materiales de edad Holocena (0.012 Millones de años).



Figura 5-2. Imagen satelital de la ciudad de Barcelona (ICC, 2010).

Una área significativa de la ciudad de Barcelona, está asentada en sitios que tienen alguno de los cuatro perfiles geológicos, que están esquemáticamente representados en la Figura 5-3, en orden de calidad de los suelos creciente. Los materiales Paleozoicos de Barcelona, están principalmente compuestos de materiales de origen sedimentario, afectados por diferentes grados de metamorfismo y por materiales plutónicos. Particularmente, se encuentran calizas, pizarras y granitos. Los materiales terciarios corresponden al Mioceno que forma el bloque de Montjuïc, y el Plioceno, más reciente, que constituye el substrato del Cuaternario en la zona central del distrito del Eixample y parte baja de la ciudad. El

Mioceno está formado por series marinas potentes de aguas poco profundas, con capas alternadas de bancos de margas azuladas, fosilíferas, areniscas rojo-grisáceas, y algún nivel de conglomerados. Mientras que el Plioceno está constituido por una capa inferior de margas azul-verdosas, con numerosos fósiles, y una capa superior con margas arenosas y arenas pardo-amarillentas.

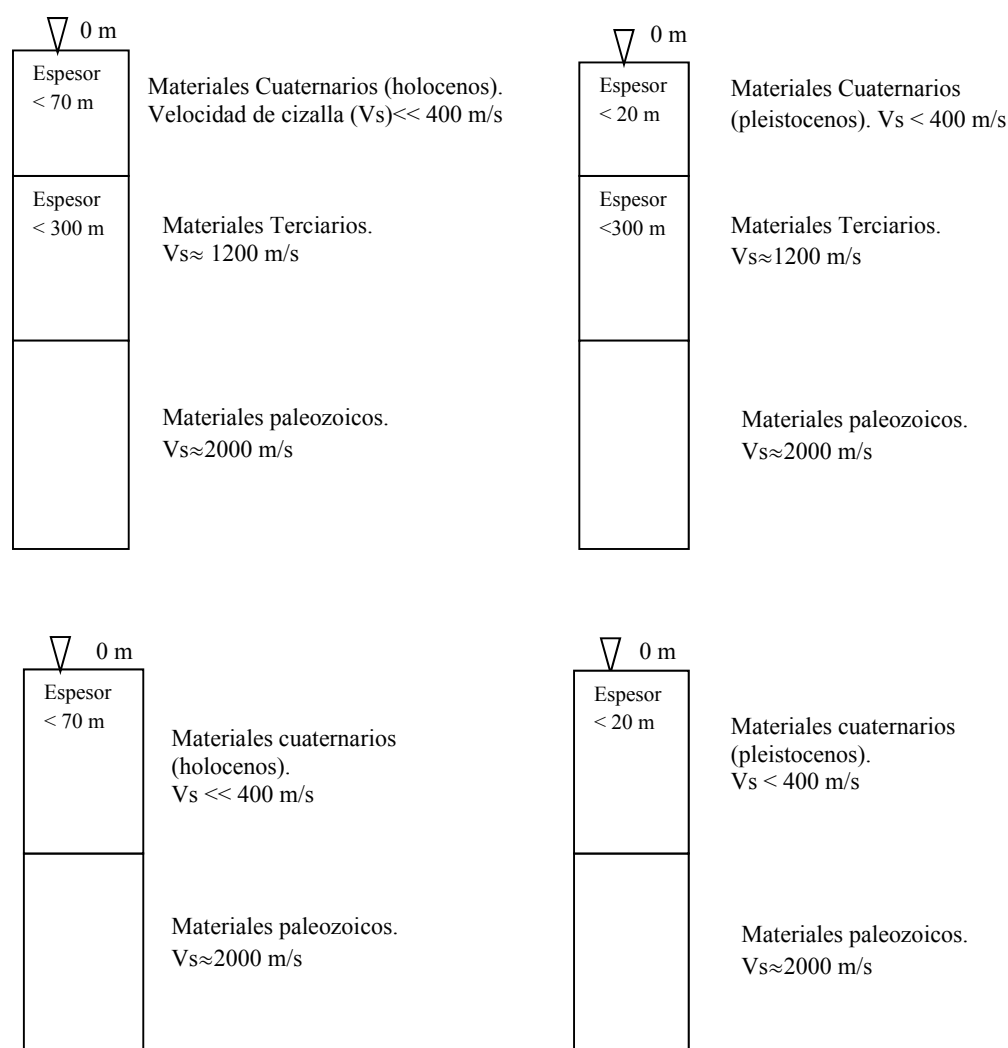


Figura 5-3. Principales perfiles geológicos simplificados de la ciudad de Barcelona (Cid et al, 2001; 1999).

Por otra parte, los materiales cuaternarios pueden diferenciarse por su edad en Pleistoceno u Holoceno. Los materiales del Pleistoceno están básicamente formados por arcillas compactas rojas, limos amarillentos de origen eólico y costra calcárea. Mientras que los materiales Holocenos son depósitos deltaicos de los ríos Besos y Llobregat, formados por arena gruesa y grava, limos y arcillas intermedias, arena fina o gruesa, limos plásticos color marrón y suelo humus (Cid et al, 2001). La Figura 5-4 muestra un mapa con la situación geológica en superficie de Barcelona (Cid et al, 1999).

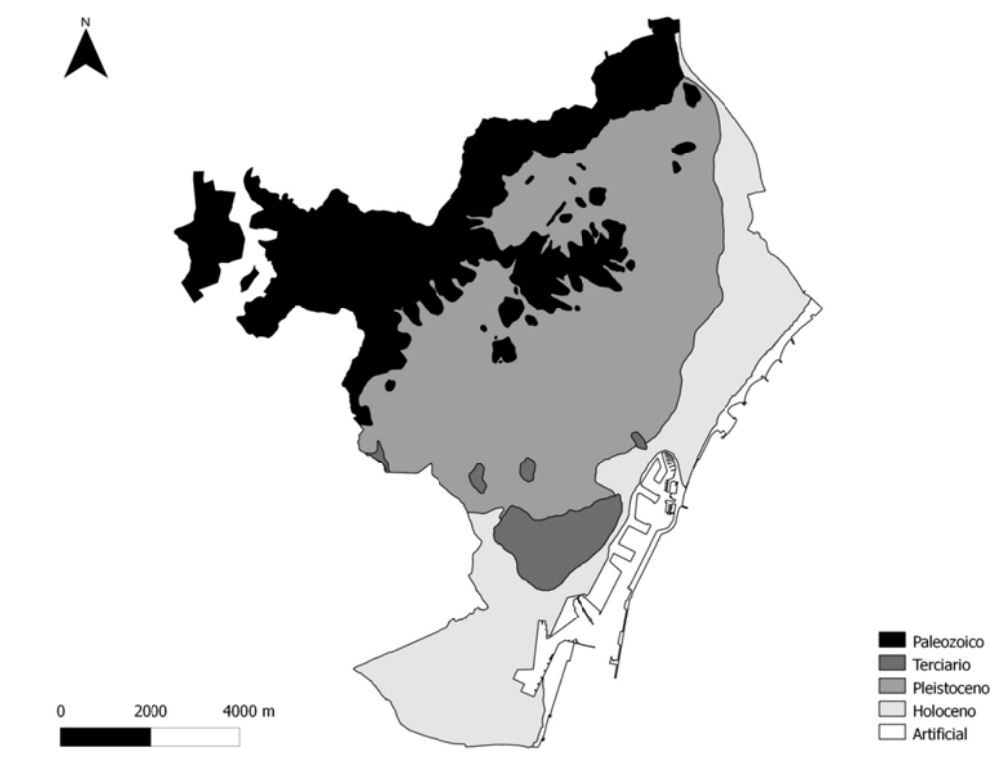


Figura 5-4. Situación geológica, en superficie, de la ciudad de Barcelona (Cid et al, 1999).

5.3 Fuentes sismogénicas

5.3.1 Geometría de las fuentes sísmicas

En el presente trabajo se consideraron las zonas sismotectónicas indicadas en la Figura 5-5 (Secanell et al, 2004). Dichas zonas coinciden con las empleadas por Secanell et al (2004) y con pequeñas modificaciones coinciden también con las que fueron propuestas originalmente por Goula et al (1997), las cuales a su vez tienen como referencia la propuesta de zonación sismotectónica de Cataluña realizada por Fleta et al (1996). Por otra parte las zonas sismotectónicas empleadas en el presente trabajo, han sido utilizadas en diversos estudios de peligrosidad sísmica de Barcelona y de Cataluña (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2004; Irizarry et al, 2003a).

La Figura 5-6 muestra las mismas fuentes sísmicas de la Figura 5-5, pero en una de las pantallas del programa CRISIS2007. Es importante destacar que las diferencias que se observan en la representación de las fuentes sísmicas en la Figura 5-5 y en la Figura 5-6, se deben a diferencias en las escalas usadas en los ejes de la latitud y la longitud.

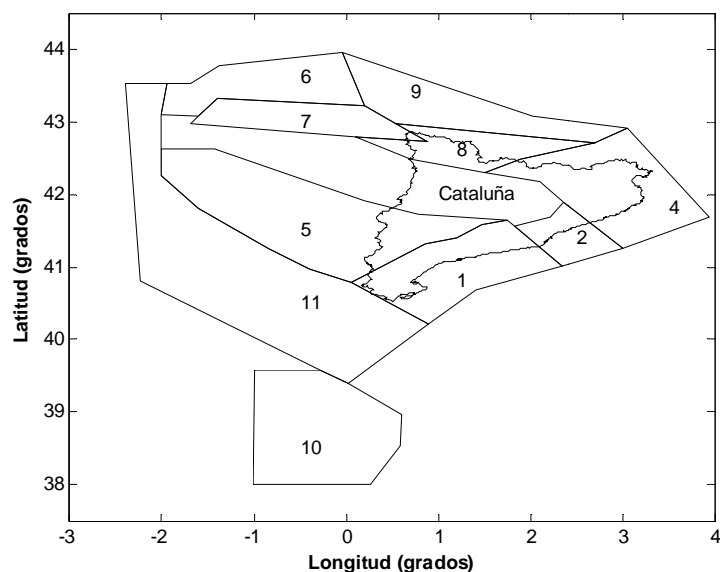


Figura 5-5. Representación geométrica de las fuentes sísmicas empleadas para estimar el peligro sísmico de Barcelona.

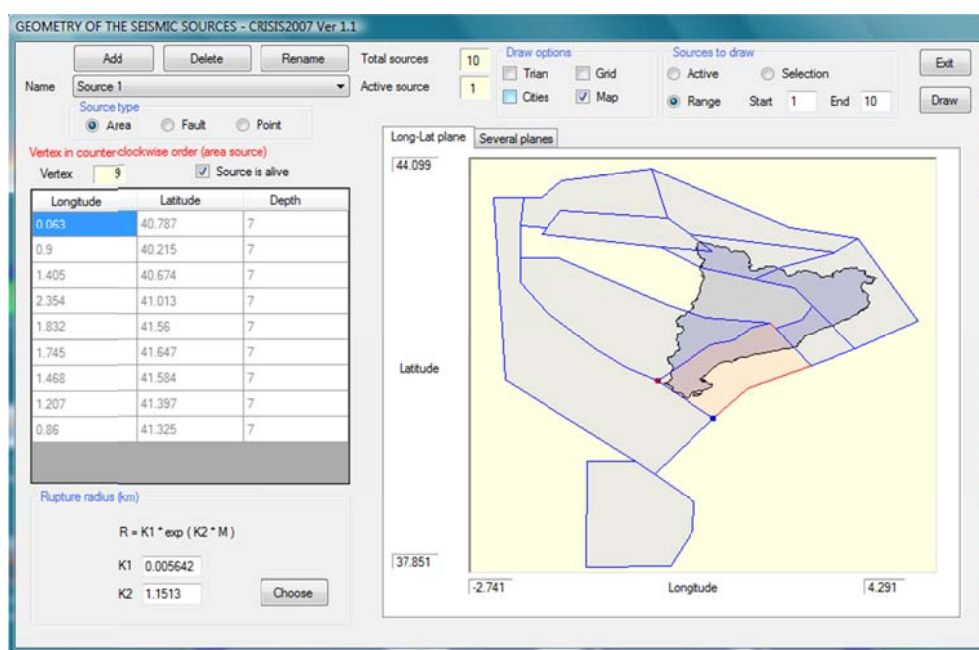


Figura 5-6. Imagen del CRISIS2007 en la que se muestran las fuentes sísmicas, que se consideraron para estimar el peligro sísmico de Barcelona.

Por otra parte, la geometría de cada fuente sísmica se definió en el programa CRISIS2007, mediante los datos de longitud, latitud y profundidad, de cada uno de los vértices del polígono que representa a cada una de las fuentes sísmicas. Es importante señalar que el proceso de integración con respecto a la

distancia, que realiza el programa CRISIS2007, requiere que los vértices del polígono que determina a una fuente sísmica tipo área, se definan de manera que el orden de los vértices sea en sentido anti-horario (Ordaz et al, 2007).

5.3.2 Potencial sísmico

La sismicidad de las fuentes sísmicas de la Figura 5-5 se modeló usando el modelo truncado Gutenberg-Richter, el cual se representa mediante la Ec. 5-1.

$$\lambda(I) = \alpha \frac{e^{-\beta(I-I_{\min})} - e^{-\beta(I_{\max}-I_{\min})}}{1 - e^{-\beta(I_{\max}-I_{\min})}} \quad 5-1$$

donde $\lambda(I)$ es la frecuencia anual de excedencia de la intensidad macrosísmica I , I_{\min} es la mínima intensidad epicentral considerada, I_{\max} es la máxima intensidad epicentral posible en cada zona, α es la frecuencia anual de excedencia de las intensidades mayores o iguales a I_{\min} , y el valor de β es la pendiente relacionada con la ley Guttenberg-Richter (Goula et al, 1997; Ordaz et al, 2007).

Los parámetros de sismicidad correspondientes a cada fuente sísmica de la Figura 5-5 se indican en la Tabla 5-2. Dichos parámetros fueron determinados a partir de un catálogo sísmico basado en intensidades macrosísmicas M.S.K (Secanell et al, 2004), y han sido empleados en estudios recientes del peligro sísmico de Barcelona y de otras regiones de Cataluña (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2004; Irizarry, 2004). Por tales motivos, en el presente trabajo se emplean los referidos parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas.

Tabla 5-2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5 (Secanell et al, 2004).

Zona Sismotectónica	Superficie (km ²)	α	$\sigma(\alpha)^*$	β	$\sigma(\beta)^*$	h (km)*	I_{\min}^*	I_{\max}^*	I_{\max} observada *
1	14100	0.100	0.030	1.864	0.559	7	V	VIII	VII
2	4600	0.128	0.033	1.608	0.324	7	V	IX	VIII
4	16300	0.157	0.030	1.256	0.186	10	V	X	IX
5	23100	0.040	0.014	1.319	0.373	10	V	IX	VIII
6	8000	0.099	0.025	1.977	0.640	10	V	VII	VI
7	7200	0.957	0.090	1.420	0.116	15	V	X	VIII
8	7700	0.218	0.040	1.716	0.246	15	V	IX	VIII
9	9600	0.070	0.020	1.737	0.214	10	V	VIII	VII
10	19700	0.635	0.059	1.201	0.083	10	V	XI	X
11	40100	0.060	0.016	0.886	0.242	10	V	IX	VIII

* $\sigma(\alpha)$ es la desviación estándar de α ; $\sigma(\beta)$ es la desviación estándar de β ; h es la profundidad en km; I_{\min} es la intensidad epicentral mínima asignada a la fuente sísmica; I_{\max} es la intensidad epicentral máxima asignada a la fuente sísmica; I_{\max} observada es la máxima intensidad epicentral observada en la fuente sísmica.

5.4 Atenuación

5.4.1 Leyes de atenuación de la intensidad

En el presente trabajo se emplearon las leyes de atenuación de López Casado et al (2000a). Dichas leyes se obtuvieron principalmente a partir de catálogos de mapas de isosistas de la Península Ibérica y se representan mediante la Ec. 5-2.

$$I = f(I_{epic}) - a_2 \ln \Delta - a_3 \Delta \quad 5-2$$

donde I es la intensidad macrosísmica a una distancia focal Δ , $\Delta = (R^2 + R_0^2)^{1/2}$ con R la distancia epicentral en km, y R_0 un valor que se usa para mejorar el ajuste y que tiene el significado de profundidad focal en km (Tabla 5-3); I_{epic} es la intensidad epicentral en la escala MSK; $f(I_{epic})$ se determina de acuerdo con la Tabla 5-3; a_2 y a_3 son coeficientes que toman los valores indicados en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Valores para determinar las leyes con una atenuación alta y una atenuación baja en la Península Ibérica de acuerdo con López Casado et al (2000a).

Atenuación	$f(I_{epic})$	a_2	a_3	R_0	σ
Alta (Figura 5-7a)	$6.016 + 0.090 \cdot I_{epic} + 0.069 \cdot I_{epic}^2$	1.477	0.01035	4	0.46
Baja (Figura 5-7b)	$5.557 + 0.902 \cdot I_{epic} + 0.014 \cdot I_{epic}^2$	1.762	0.00207	2	0.59

σ es la desviación estándar de la intensidad macrosísmica I .

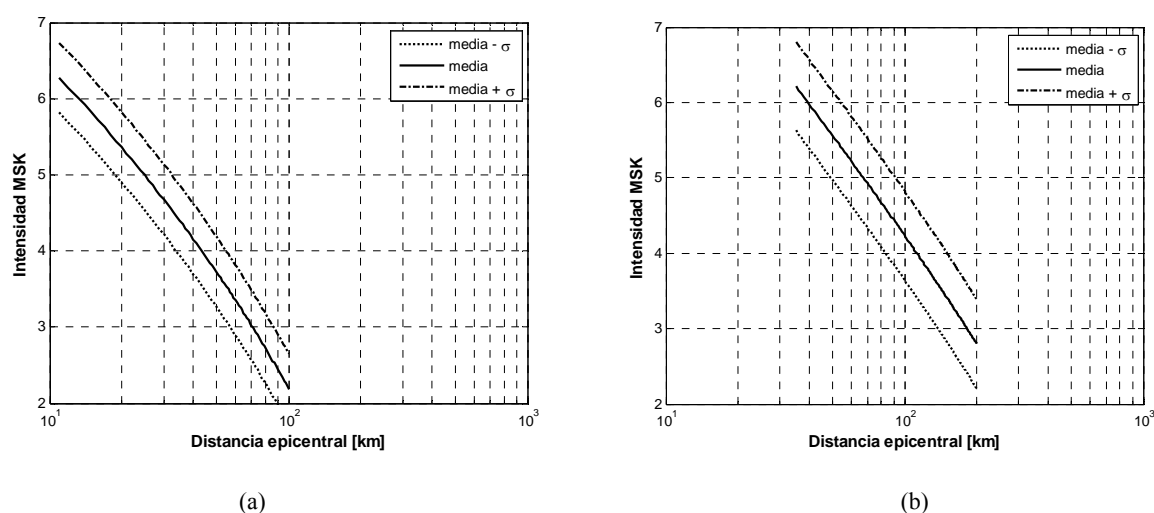


Figura 5-7. Atenuación de la intensidad de un sismo con intensidad epicentral VII, de acuerdo con: (a) la ley de atenuación “Alta” y, (b) la ley de atenuación “Baja” de López Casado et al (2000a).

López Casado et al (2000a) propusieron en total 5 leyes de atenuación, de las cuales dos se usan en el presente trabajo. Cada ley de atenuación fue definida en función del grado de atenuación, desde un grado de atenuación muy alto hasta un grado de atenuación muy bajo. Además, indicaron las regiones en las que consideran son válidas cada una de las leyes de atenuación propuestas. En función de lo anterior y al considerar la ubicación de las fuentes sísmicas empleadas en el presente trabajo, se determinó emplear únicamente dos leyes de atenuación, la correspondiente al nivel de atenuación bajo y la correspondiente al nivel de atenuación alto. Específicamente, se emplea la ley de atenuación baja para la fuente sísmica 7 ubicada en la región de los Pirineos (Figura 5-5), y la ley de atenuación alta se emplea para el resto de las fuentes sísmicas consideradas en el presente trabajo.

5.4.2 Ley de atenuación de espectros de respuesta uniformes

El modelo de atenuación sísmica elegido para estimar el peligro sísmico de Barcelona en términos de la aceleración máxima del terreno, es el que fue propuesto por Ambraseys et al (1996). Dicha ley de atenuación se obtuvo a partir de registros sísmicos de 157 sismos en Europa y regiones adyacentes (Ambraseys et al, 1996). Por otra parte dicha ley de atenuación fue elegida en el proyecto Risk-UE para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona, y ha sido considerada una opción adecuada para estimar la peligrosidad sísmica de la ciudad (Irizarry et al, 2010). Adicionalmente, la ley de Ambraseys et al (1996) ha sido empleada para realizar estudios previos de peligro sísmico de: a) regiones de Cataluña (Perea y Atakan, 2007); b) de la totalidad de Catalunya (Irizarry, 2004), y; c) de toda la península Ibérica (Jiménez et al, 2001). Enseguida se incluyen las principales expresiones que definen la ley de atenuación de Ambraseys et al (1996):

$$\log(y) = C_1' + C_2M + C_4 \log(r) + C_A S_A + C_S S_S + \sigma P \quad 5-3$$

donde y es la aceleración en m/s^2 ; M es igual a M_s (magnitud de ondas superficiales).

$$r = \sqrt{d^2 + h_0^2} \quad 5-4$$

d es la distancia más corta a la proyección del plano de falla en la superficie de la tierra en kilómetros, definida por Joyner y Boore (1981).

$h_0, C_1', C_2, C_4, C_A, C_S$ y σ son constantes que dependen del periodo estructural que se considere (Tabla 5-4).

σ es la desviación estándar del $\log(y)$.

P es una constante que determina si se obtienen valores medios (percentil 50) de $\log(y)$, o valores del percentil 84 de $\log(y)$; en el primer caso $P = 0$ y en el segundo caso $P = 1$. Los valores del

percentil 16 se obtienen al estimar los valores medios (percentil 50) de $\log(y)$, menos una desviación estándar. Por lo tanto, en este caso $P = -1$.

Las constantes S_A y S_S pueden tomar valores de 0 ó 1 de acuerdo con lo establecido en la Tabla 5-5 (Ambraseys et al, 1996). Adicionalmente, se establece que la ley de atenuación es de aplicación en el intervalo de M_s definido por los valores de 4.0 y 7.5, y en distancias hasta de 200 km de la fuente sísmica (Ambraseys et al, 1996).

Tabla 5-4. Valores de los coeficientes de la Ec. 5-3 para el periodo $T = 0$ s.

T	C_1'	C_2	h_0	C_4	C_A	C_S	σ
0.0	-1.48	0.266	3.5	-0.922	0.117	0.124	0.25

Tabla 5-5. Valores de los coeficientes S_A y S_S de la ley de atenuación de Ambraseys et al (1996).

Tipo de terreno	S_A	S_S
Roca	0	0
Firme	1	0
Blando	0	1

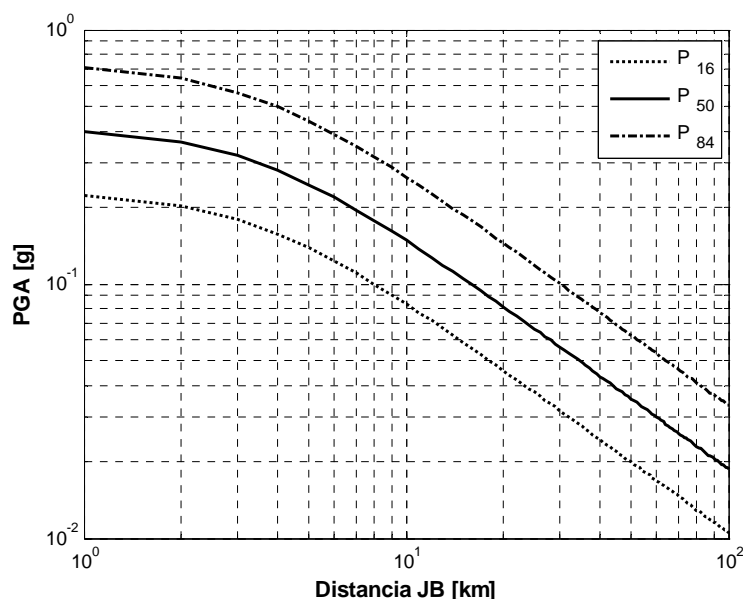


Figura 5-8. Curva de atenuación de los valores de PGA (g) versus distancia Joyner y Boore (1981), obtenida mediante la ecuación de Ambraseys et al (1996), para una magnitud $M_s = 6$ y para un sitio en roca.

Por otra parte, el código de cómputo CRISIS2007 permite emplear leyes de atenuación referidas a diferentes tipos de distancias. Por ello, para el cálculo de la peligrosidad sísmica de Barcelona, fue posible emplear directamente la ley de atenuación de Ambraseys, la cual está determinada para la distancia más corta a la proyección del plano de falla en la superficie de la tierra. Tal distancia se identifica también con

el nombre de quienes la definieron: Joyner y Boore (1981). El tipo de distancia elegido para realizar los cálculos de atenuación sísmica, se debe indicar en la tabla de atenuación que emplea el programa CRISIS2007 para estimar el peligro sísmico (Ordaz et al, 2007).

Cuando la distancia elegida para realizar los cálculos de peligrosidad sísmica es la definida por Joyner y Boore (1981), es necesario proporcionarle al CRISIS2007 los parámetros requeridos para estimar el área de ruptura. El código CRISIS2007 supone que el área de ruptura es circular con radio r , el cual depende de la magnitud sísmica. Adicionalmente, CRISIS2007 requiere que se especifiquen las constantes K_1 y K_2 de la Ec. 5-5 para calcular el área de ruptura (A), la cual a su vez se emplea para estimar el radio de ruptura r (Ec. 5-6).

$$A = K_1 e^{K_2 M} \quad 5-5$$

donde M es la magnitud sísmica.

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad 5-6$$

En el presente estudio se emplearon los valores de 0.01015 para el coeficiente K_1 , y el de 1.04768 para el coeficiente K_2 , los cuales se obtienen al considerar la expresión propuesta por Wells y Coppersmith (1994), para estimar el área de ruptura para cualquier tipo de falla (Ordaz et al, 2007).

5.4.3 Leyes de atenuación en el CRISIS

Para estimar la peligrosidad sísmica mediante el código CRISIS2007 es posible elegir una de las leyes de atenuación incluidas en dicho código, o proporcionar una ley de atenuación diferente a las disponibles en el CRISIS. En este último caso es necesario crear una tabla que contenga la información de la ley de atenuación. Las características que deben cumplir las tablas con la información de la ley de atenuación se indican en la ayuda del código CRISIS2007 (Ordaz et al, 2007). Es importante mencionar que en dichas tablas, se asigna entre otros datos, el valor de la desviación estándar del logaritmo natural del correspondiente descriptor de las características del movimiento del terreno (PGA, intensidad macrosísmica, etc.). En el presente trabajo se generaron tablas para proporcionar al código CRISIS2007, la información requerida de las leyes de atenuación elegidas para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona. El código CRISIS2008 contiene una lista más numerosa que la que contiene el CRISIS2007 de leyes de atenuación que pueden seleccionarse, para realizar las estimaciones de peligrosidad sísmica. Adicionalmente, en el CRISIS2008 es posible emplear mayor número de variables en la definición de las leyes de atenuación mediante tablas (Ordaz et al, 2008). En el presente trabajo también se generaron

tablas para proporcionar al código CRISIS2008, la información referente a las leyes de atenuación consideradas para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona. Más adelante se comentan algunas de las ventajas que ofrece el CRISIS2008 respecto al CRISIS2007, en relación a la forma de considerar las leyes de atenuación.

5.5 Efectos de sitio

5.5.1 Zonificación sísmica de la ciudad

Para considerar los efectos de sitio en Barcelona, se emplean los resultados de un trabajo realizado por Cid et al (2001). En dicho trabajo definieron las cuatro zonas sísmicas de Barcelona, cuyas características se indican en la Tabla 5-6, y cuya localización se muestra en la Figura 5-9.

Tabla 5-6. Zonas sísmicas de Barcelona (Cid et al, 1999).

Zona	Descripción
R (0)	Afloramientos rocosos.
I	Afloramientos holocenos.
II	Afloramientos pleistocenos con substrato Terciario, de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta.
III	Afloramientos pleistocenos sin substrato Terciario, de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta.
A	Terreno artificial.

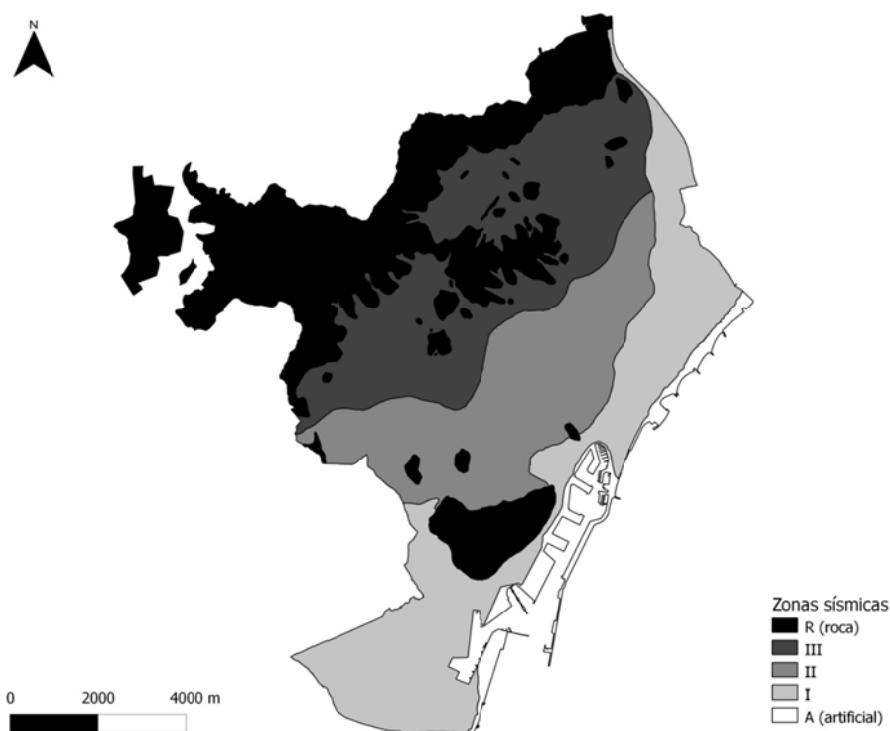


Figura 5-9. Localización de las zonas sísmicas de Barcelona (Cid et al, 1999).

5.5.2 Mapas de incrementos de intensidad en Barcelona

Para tomar en cuenta el efecto del suelo en el valor final de la intensidad en cada zona sísmica de Barcelona, se ha adoptado el criterio considerado por Lantada (2007). De acuerdo con dicho criterio el valor de la intensidad macrosísmica en las zonas de suelo blando (I, II, III y A), es igual al valor de la intensidad macrosísmica correspondiente a la zona de roca más medio grado de intensidad (Figura 5-10).



Figura 5-10. Mapa de incrementos de intensidad macrosísmica en Barcelona, para considerar efectos locales en el suelo.

5.5.3 Funciones de transferencia para los espectros de respuesta

Para considerar el efecto del suelo en el valor final de la aceleración máxima del terreno en las distintas zonas sísmicas de Barcelona, se considera el estudio realizado por Irizarry (2004), en el que estimó factores de amplificación espectral (Figura 5-11) para cada una de las zonas sísmicas definidas por Cid et al (2001). Particularmente, es posible considerar dichos factores de amplificación para obtener espectros de pseudo-aceleración para cada una de las zonas sísmicas de Barcelona, a partir de espectros de peligro uniforme. Tales factores de amplificación, fueron evaluados con detalle en el estudio realizado por

Irizarry (2004), y en el mismo trabajo se concluyó que dichos factores son adecuados para representar los probables efectos de amplificación del suelo de Barcelona, durante la presencia de sismos (Irizarry, 2004). En la Tabla 5-7 se indican algunos de los valores de los factores de amplificación estimados por Irizarry (2004). Sin embargo, en el presente trabajo únicamente se emplean los factores de amplificación asociados a la aceleración máxima del terreno.

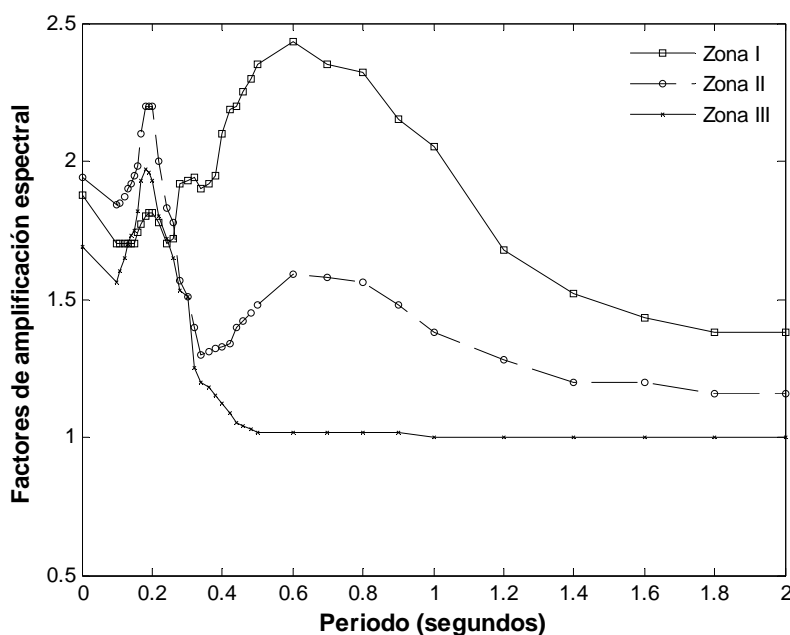


Figura 5-11. Factores de amplificación espectral para Barcelona de acuerdo con Irizarry (2004).

Para la zona A, que corresponde a terrenos ganados al mar (Figura 5-9), se considera el mismo factor de amplificación que la zona II. Dicha consideración se hizo al tomar en cuenta que el periodo predominante del suelo estimado en uno de los terrenos ganados al mar, es un valor similar a los estimados en la zona II (Alfaro et al, 1998), y al tener presente que en ocasiones los suelos ganados al mar, tienen comportamientos inadecuados ante la ocurrencia de sismos (Sugito et al, 2000; Lacave-Lachet et al, 2000). Sin embargo, es importante destacar que para definir con mayor certeza las características dinámicas del suelo de la zona A, es necesario realizar mayores estudios.

Tabla 5-7. Factores de amplificación del suelo en cada una de las diferentes zonas sísmicas de Barcelona (Irizarry, 2004).

Periodo (s)	Zona I	Zona II	Zona III
0.0	1.88	1.94	1.69
0.6	2.43	1.59	1.02

Los factores de amplificación del suelo correspondientes a un periodo fundamental de 0 s (Tabla 5-7), no tienen grandes diferencias entre sí, por ejemplo, el factor de amplificación máximo que corresponde a la

zona II, es igual a 1.94 y este valor supera en 15% al factor de amplificación mínimo igual a 1.69 que corresponde a la Zona III. Mientras que para un periodo fundamental de 0.6 s, el factor de amplificación máximo que corresponde a la zona I es igual a 2.43 y supera en 240% al factor de amplificación mínimo igual a 1.02, que corresponde a la zona III (Tabla 5-7). Por lo tanto, dado que los factores de amplificación de PGA para las zonas I, II y III son muy similares, se confirma la validez de considerar los efectos locales mediante un incremento uniforme de la intensidad macrosísmica, en todas las zonas sísmicas que son diferentes a la zona de roca (Figura 5-10).

5.6 Curva de peligrosidad a partir de intensidades macrosísmicas

En el presente apartado se describen los principales pasos considerados, para obtener curvas de frecuencias de excedencia versus intensidades macrosísmicas para Barcelona. En este caso las curvas de peligrosidad se obtienen al definir la sismicidad de las fuentes sísmicas en términos de intensidades macrosísmicas, y al considerar leyes de atenuación de intensidades macrosísmicas. Adicionalmente, en esta sección se muestran estimaciones de la peligrosidad sísmica en las que se observa la influencia de los siguientes elementos: a) la ley de atenuación y b) el parámetro de sismicidad β . Ambos elementos son tan sólo una muestra de los diversos factores que influyen en los valores finales de la peligrosidad sísmica.

Para identificar la influencia de la ley de atenuación y del parámetro de sismicidad β , se estimaron mediante el CRISIS2007 y el CRISIS2008 diferentes curvas de peligrosidad sísmica. En las estimaciones de dichas curvas de peligrosidad se consideraron las 10 fuentes sísmicas de la Figura 5-5. Enseguida se mencionan las consideraciones hechas para asignar el resto de los principales datos requeridos en el CRISIS2007 y en el CRISIS2008, para obtener los resultados de peligrosidad sísmica.

5.6.1 Influencia de la ley de atenuación

Para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona mediante el CRISIS2007, se obtuvieron inicialmente resultados de peligrosidad de cada uno de los puntos de una malla de cálculo con líneas de puntos separadas entre sí 0.5 grados (Figura 5-12). Para esta estimación, se consideraron los datos siguientes: a) valores del percentil 50 de las leyes de “atenuación alta” y de “atenuación baja” (López Casado et al, 2000a) con una sigma cercana a 0; b) los datos de sismicidad de las fuentes sísmicas indicados en la Tabla 5-8.

El valor de la desviación estándar de la ley de atenuación se considera cercano a cero debido a que el CRISIS2007 considera que la distribución de los residuos es lognormal, y en el caso de las leyes de atenuación de intensidades macrosísmicas la distribución de los residuos es normal. Los resultados obtenidos permiten generar el mapa de la Figura 5-13, en el cual es posible observar que las diferencias

entre las intensidades asociadas a un periodo de retorno de 475 años en las diferentes regiones de Barcelona, son de menos de 0.5 grados. Por lo tanto, al tomar en cuenta estos últimos resultados y al considerar el carácter regional de la metodología empleada para estimar la peligrosidad sísmica, es posible elegir un sitio representativo de Barcelona del cual se obtendrán las curvas de peligrosidad para la ciudad. El sitio elegido tiene las coordenadas siguientes: Longitud 2.195 grados y Latitud 41.42 grados. Dicho sitio corresponde a una de las regiones que dentro de Barcelona tienen los mayores niveles de peligrosidad sísmica (Figura 5-13).

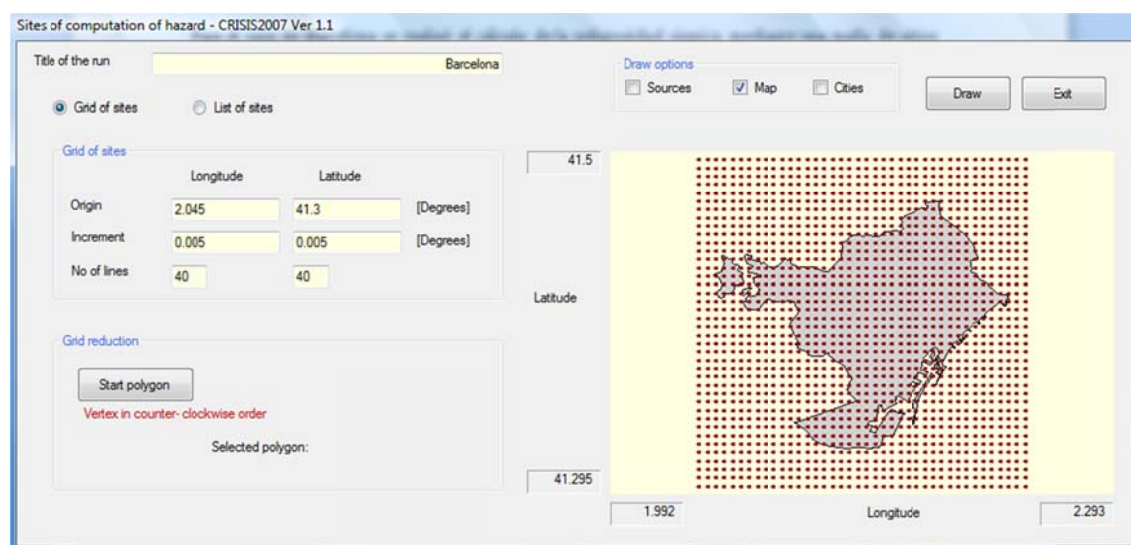


Figura 5-12. Malla de cálculo generada en el código CRISIS2007 para estimar la peligrosidad sísmica en Barcelona.

Por otra parte, para estimar la influencia de la incertidumbre en la ley de atenuación en los resultados de la peligrosidad sísmica de Barcelona, se estimaron tres curvas de peligrosidad sísmica (Figura 5-14), para el sitio de referencia (Longitud 2.195° y Latitud 41.42°), mediante las leyes de atenuación de López Casado et al (2000a) descritas anteriormente. La primera de dichas curvas de peligrosidad se obtuvo al considerar los valores del percentil 50 de las leyes de atenuación, mientras que las otras dos curvas se obtuvieron al considerar los valores del percentil 16 y 84, respectivamente. Para tal fin, se realizó una ejecución en el CRISIS2007 por cada curva de peligrosidad sísmica. Tal como se comentó anteriormente, la razón por la que se estimó la peligrosidad sísmica mediante este proceso, fue porque mediante el CRISIS2007 no es posible estimar directamente tasas de excedencia de intensidades macrosísmicas, a partir de leyes de atenuación de intensidades macrosísmicas cuyos residuos siguen una distribución normal. Adicionalmente, en la estimación de las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-14 se consideraron los datos siguientes:

- Sismicidad de las fuentes sísmicas: datos de la Tabla 5-2 y Tabla 5-8.

- Leyes de atenuación: valores medios y valores medios más y menos una desviación estándar, respectivamente, de las leyes “Atenuación alta” y “Atenuación Baja” (López Casado et al, 2000a). La ley de “Atenuación alta” se empleó para la fuente sísmica 7 (Figura 5-5), y la de “Atenuación baja” para el resto de las fuentes sísmicas.

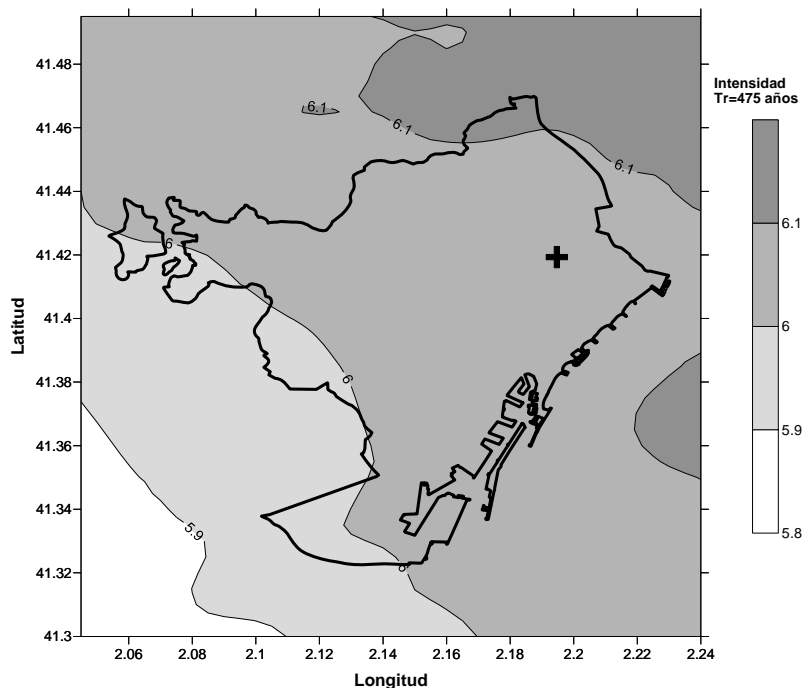


Figura 5-13. Mapa de peligrosidad sísmica de Barcelona, generado a partir de los resultados obtenidos mediante el CRISIS2007, y localización del sitio elegido (+) para estimar curvas de peligrosidad sísmica representativas de Barcelona.

De acuerdo con las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-14, el periodo de retorno de la intensidad macrosísmica de VI es un valor que varía entre 192 y 909 años, con un valor medio de 400 años. Mientras que el periodo de retorno de la intensidad macrosísmica de VII es un valor que varía entre 1280 y 10100 años, con un valor medio de 3330 años.

En función de los resultados indicados en la Figura 5-14 es posible señalar que para este caso la influencia de la ley de atenuación es importante. Dicha afirmación se basa en las diferencias significativas que se obtienen en los valores del periodo de retorno de las diferentes intensidades sísmicas. Por ejemplo, en el caso de la intensidad VI el periodo de retorno es igual a 400 años si se considera el valor medio de la ley de atenuación, pero si se considera el percentil 16 y el percentil 84 de la ley de atenuación, entonces, se obtiene un periodo de retorno de aproximadamente la mitad de 400 años o de aproximadamente el doble de 400 años (Figura 5-14), respectivamente. Las diferencias que se presentan entre las tres curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-14, destacan la importancia de tener presentes las importantes incertidumbres que suelen estar asociadas a las leyes de atenuación.

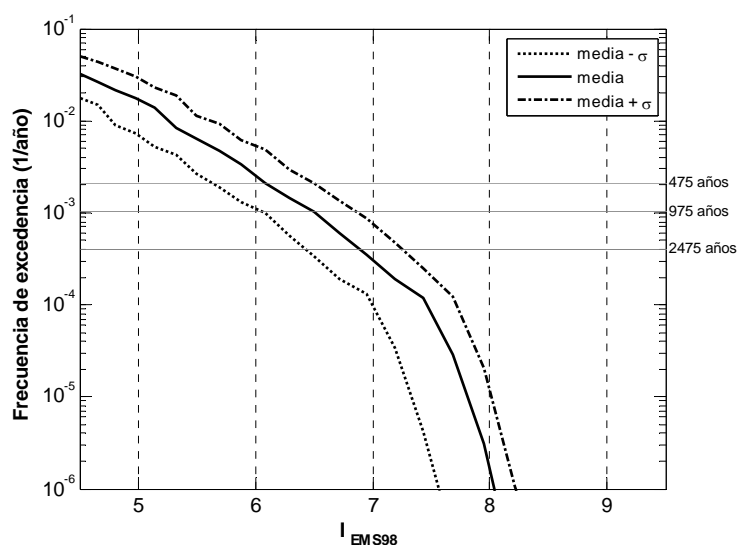


Figura 5-14. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2007, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores de la ley de atenuación de la intensidad macrosísmica: los valores medios de la intensidad, y los valores medios de la intensidad más y menos una desviación estándar, respectivamente.

Tabla 5-8. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados al estimar mediante el CRISIS2007 las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-14 (Secanell et al, 2004).

Zona Sismotectónica	$C_V(\beta)^*$	$E(I_{\max})$	$\sigma(I_{\max})$	$I1$	$I2$
1	0.3	VII	0.25	VII	VIII
2	0.202	VIII	0.25	VIII	IX
4	0.148	IX	0.25	IX	X
5	0.283	VIII	0.25	VIII	IX
6	0.324	VI	0.25	VI	VII
7	0.082	VIII	0.25	VIII	X
8	0.143	VIII	0.25	VIII	IX
9	0.123	VII	0.25	VII	VIII
10	0.069	X	0.25	X	XI
11	0.273	VIII	0.25	VIII	IX

* $C_V(\beta)$ es el coeficiente de variación de β ; $E(I_{\max})$ es el valor esperado de la intensidad máxima que en este caso se consideró igual a I_{\max} observada (Tabla 5-2); $I1$ es el límite inferior del intervalo en el que se estima estará comprendido el valor de I_{\max} que en este caso se consideró igual a I_{\max} observada (Tabla 5-2); $I2$ es el límite superior del intervalo en el que se estima estará comprendido el valor de I_{\max} (Ordaz et al, 2007).

A diferencia del CRISIS2007, en el CRISIS2008 sí es posible realizar cálculos de peligrosidad sísmica mediante leyes de atenuación cuya distribución de los residuos es normal. De manera que es posible integrar directamente en los cálculos, la incertidumbre en las leyes de atenuación de la intensidad macrosísmica empleadas para Barcelona. Esto último es relevante, porque en general, se considera primordial que en la estimación de la peligrosidad sísmica se considere directamente la incertidumbre en las leyes de atenuación sísmica (Bommer y Abrahamson, 2006). Es decir, que al emplear la integral

indicada en la Ec. 3-2, se incluya la desviación estándar de la ley de atenuación. Por tal motivo, para fines de comparación se generó la misma malla que se usó en el CRISIS2007 (Figura 5-12), para estimar la peligrosidad sísmica mediante el CRISIS2008. Al hacerlo se obtuvo el mapa de peligrosidad sísmica de Barcelona indicado en la Figura 5-15, correspondiente a un periodo de retorno de 475 años. Adicionalmente, se obtuvo la curva de peligrosidad sísmica mostrada en la Figura 5-16, la cual indica que la intensidad de VI tiene un periodo de retorno de 278 años. Mientras que a la intensidad de VII le corresponde un periodo de retorno de 2041 años.

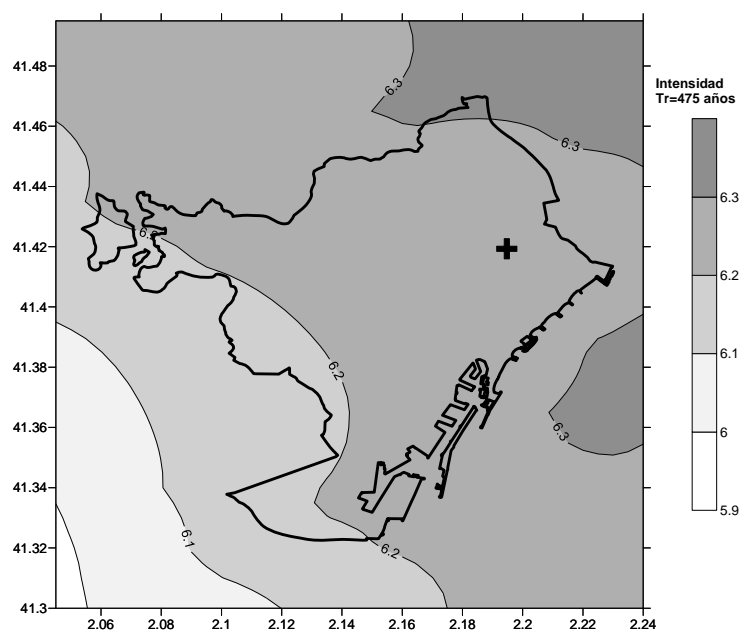


Figura 5-15. Mapa de peligrosidad sísmica de Barcelona, generado a partir de los resultados obtenidos mediante el CRISIS2008, y localización del sitio elegido (+) para estimar curvas de peligrosidad sísmica representativas de Barcelona.

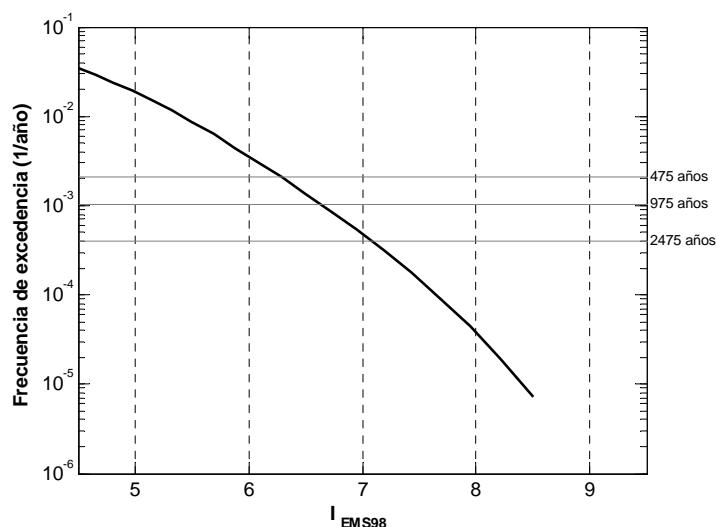


Figura 5-16. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida mediante el código CRISIS2008, en el que se integró directamente la incertidumbre en las leyes de atenuación de las intensidades macrosísmicas.

5.6.2 Influencia del parámetro beta

Para estimar la influencia de la incertidumbre en el parámetro de sismicidad β en la peligrosidad sísmica de Barcelona, se realizan dos análisis. En el primero de ellos se estimaron tres curvas de peligrosidad sísmica (Figura 5-17) para el sitio de referencia (Longitud 2.195° y Latitud 41.42°). La primera curva se obtuvo al considerar los valores medios de β , mientras que las otras dos curvas se obtuvieron al considerar los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente. Adicionalmente, para la obtención mediante el CRISIS2008 de las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-17, se consideraron los datos siguientes:

- Sismicidad de las fuentes sísmicas: datos de la Tabla 5-2 y la Tabla 5-9.
- Leyes de atenuación: valores medios de las leyes “Atenuación alta” y “Atenuación Baja” (López Casado et al, 2000a). La ley de “Atenuación alta” se empleó para la fuente sísmica 7, y la de “Atenuación baja” para el resto de las fuentes sísmicas.

De acuerdo con las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-17, el periodo de retorno de la intensidad macrosísmica de VI es un valor que varía entre 196 y 370 años, con un valor medio de 270 años. Mientras que el periodo de retorno de la intensidad macrosísmica de VII es un valor que varía entre 1205 y 3448, con un valor medio de 2041 años.

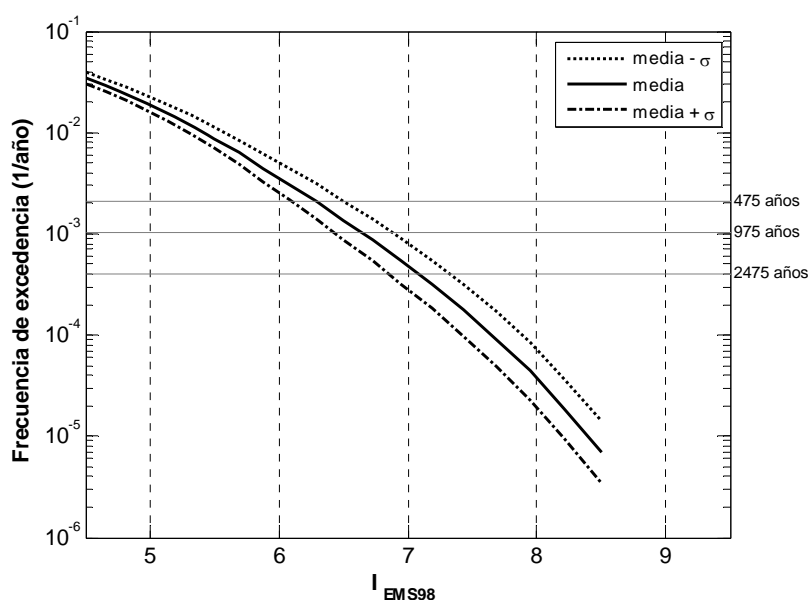


Figura 5-17. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente.

Tabla 5-9. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-17.

Zona Sismotectónica	β		
	media - σ	media	media + σ
1	1.305	1.864	2.423
2	1.284	1.608	1.932
4	1.07	1.256	1.442
5	0.946	1.319	1.692
6	1.337	1.977	2.617
7	1.304	1.420	1.536
8	1.47	1.716	1.962
9	1.523	1.737	1.951
10	1.118	1.201	1.284
11	0.644	0.886	1.128

En el segundo análisis para estimar la influencia de la incertidumbre en el parámetro de sismicidad β en la peligrosidad sísmica de Barcelona, se estimaron mediante el CRISIS2008 dos curvas de peligrosidad sísmica (Figura 5-18) para el sitio de referencia (Longitud 2.195° y Latitud 41.42°). La primera curva se obtuvo al considerar el coeficiente de variación de cada valor medio de β indicado en la Tabla 5-8, mientras que la segunda curva se obtuvo al considerar que el coeficiente de variación de cada valor medio de β es aproximadamente igual a cero.

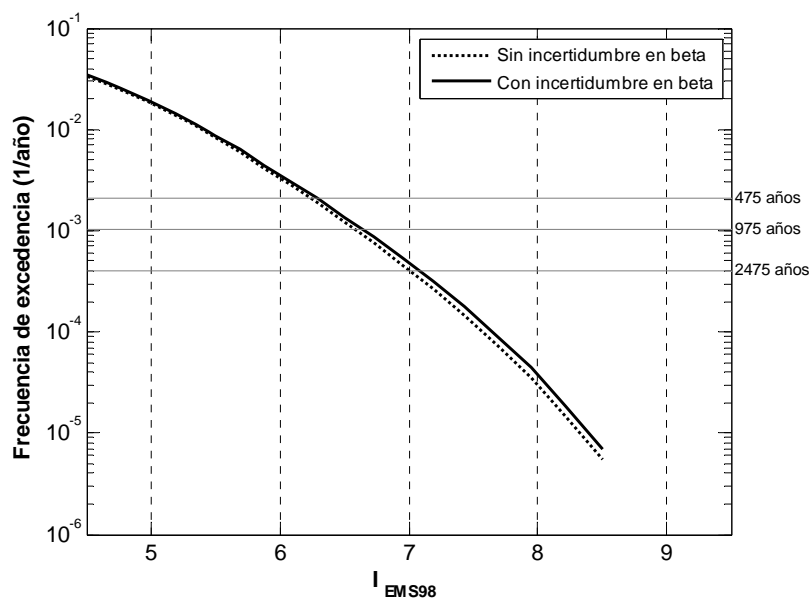


Figura 5-18. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que en un caso se consideran los coeficientes de variación del parámetros de sismicidad β indicados en la Tabla 5-8 (caso con incertidumbre en beta), y en el otro caso se considera que el valor de los coeficientes de variación de β es igual a cero (caso sin incertidumbre en beta).

Al observar las curvas de la Figura 5-18 es posible identificar que a medida que aumenta el valor de la intensidad macrosísmica, aumenta la influencia del coeficiente de variación de β . Así, por ejemplo, el periodo de retorno para la intensidad V pasa de 53 años a 55 años, según se considere la curva de peligrosidad con incertidumbre en el valor medio de β y la curva de peligrosidad sin incertidumbre en el valor medio de β , respectivamente. Mientras que para una intensidad de VII el periodo de retorno pasa de ser de 2080 años a 2380 años, de acuerdo con la curva de peligrosidad con incertidumbre en β y la curva de peligrosidad sin incertidumbre en β , respectivamente. Es decir, la diferencia respecto al periodo de intensidad V es de aproximadamente el 3% entre considerar o no la incertidumbre de β mediante su coeficiente de variación, mientras que la diferencia entre considerar o no el coeficiente de variación de β en el periodo de retorno de la intensidad VII es de cerca del 14%.

5.7 Curvas de peligrosidad a partir de la magnitud M_s

En el presente apartado se describen los principales pasos considerados para obtener en forma indirecta, curvas de frecuencias de excedencia versus intensidades macrosísmicas para Barcelona. El término de forma indirecta se refiere a que las curvas de peligrosidad relativas a intensidades macrosísmicas, se obtienen al transformar curvas de frecuencias de excedencia de PGA. Enseguida se describen los principales pasos considerados para obtener las curvas de peligrosidad sísmica indicadas. Durante el proceso se destaca la influencia en los resultados de peligrosidad de los siguientes elementos: a) la ley de transformación Intensidad-Magnitud; b) las leyes de atenuación, y c) el parámetro de sismicidad β . En este caso también se reconoce que estos tres elementos son tan sólo una muestra, de los diferentes parámetros que tienen influencia en los resultados de peligrosidad sísmica.

5.7.1 Influencia de las leyes de transformación Intensidad-Magnitud

Para obtener curvas de peligrosidad en términos de frecuencias de excedencia de PGA, se transformaron los datos de la Tabla 5-2 en términos de la magnitud M_s . Sin embargo, debido a que no existe una relación única para realizar dicha transformación, en el presente trabajo se optó por analizar tres casos, los cuales se describen más adelante. Además de convertir las intensidades epicentrales I_0 en magnitudes M_s , fue necesario obtener los parámetros requeridos por el programa CRISIS2008, para modelar la ocurrencia de sismos en cada fuente sísmica. El modelo de ocurrencia empleado es el denominado modelo de Poisson, en el cual la frecuencia de excedencia de la magnitud sísmica se representa mediante la Ec. 3-4 (Ordaz et al, 2008). El modelo llamado de Poisson ha sido considerado en estudios previos, como un modelo adecuado para representar la ocurrencia de sismos en la región de Catalunya (Irizarry et al, 2010; Irizarry, 2004).

Los datos comunes empleados en el CRISIS2008 para estimar las curvas de peligrosidad sísmica del presente apartado son los siguientes:

- Sitio de cálculo: Longitud 2.195 grados y Latitud 41.42 grados.
- Fuentes sísmicas consideradas: las 10 fuentes sísmicas de la Figura 5-5.
- Ley de atenuación: valores medios de la ley de Ambraseys et al (1996), y desviación estándar igual a 0.25 (Tabla 5-4).

Caso 1. Ley M_s - I_0 de López Casado et al (2000b).

Estimación de valores M_s mediante la relación indicada en la Ec. 5-7, la cual fue propuesta por López Casado et al (2000b), para la región Ibero-Magebrí.

$$M_s = 1.52 + 0.051I_0^2 + 0.70P \quad 5-7$$

donde I_0 es la intensidad epicentral (MSK), 0.7 es la desviación estándar, P es igual a 0 para estimar valores medios (percentil 50), o igual a 1 para estimar los valores del percentil 84. Adicionalmente, para estimar los valores del percentil 16 se consideró $P = -1$, que corresponden a los valores medios (percentil 50) menos una desviación estándar. La relación de la Ec. 5-7 es válida, principalmente, en el intervalo $II \leq I_0 \leq X$, y $1.6 \leq M_s \leq 7.0$ (López Casado et al, 2000b).

La Tabla 5-10 y la Tabla 5-11 contienen los parámetros de sismicidad para las fuentes sísmicas, asociados a la magnitud sísmica M_s . Tales parámetros de sismicidad se obtuvieron mediante los datos de la Tabla 5-2 y la Ec. 5-7. La Figura 5-19 muestra curvas de frecuencia de excedencia de la magnitud para la fuente sísmica 10, las cuales se obtienen al emplear la Ec. 3-4, y los parámetros de dicha ecuación indicados en la Tabla 5-10. En la Figura 5-20 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica que se obtienen al definir la sismicidad de las fuentes sísmicas mediante los datos de la Tabla 5-10 y la Tabla 5-11, y al emplear los datos comunes indicados al inicio del apartado 5.7.1.

Tabla 5-10. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-7 propuesta por López Casado et al (2000b).

Zona Sismotectónica	h (km)	$\lambda(M_{min})$	β	Coef. variación β
1	7	0.100	2.811	0.3
2	7	0.128	2.252	0.202
4	10	0.157	1.642	0.148
5	10	0.040	1.847	0.283
6	10	0.099	3.230	0.324
7	15	0.957	1.856	0.082
8	15	0.218	2.403	0.143
9	10	0.070	2.620	0.123
10	10	0.635	1.472	0.069
11	10	0.060	1.241	0.273

De acuerdo con las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-20, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 59 hasta 667 años con un valor medio de 169 años. Mientras que el PGA igual a 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 154 hasta 3448 años con un valor medio de 588 años.

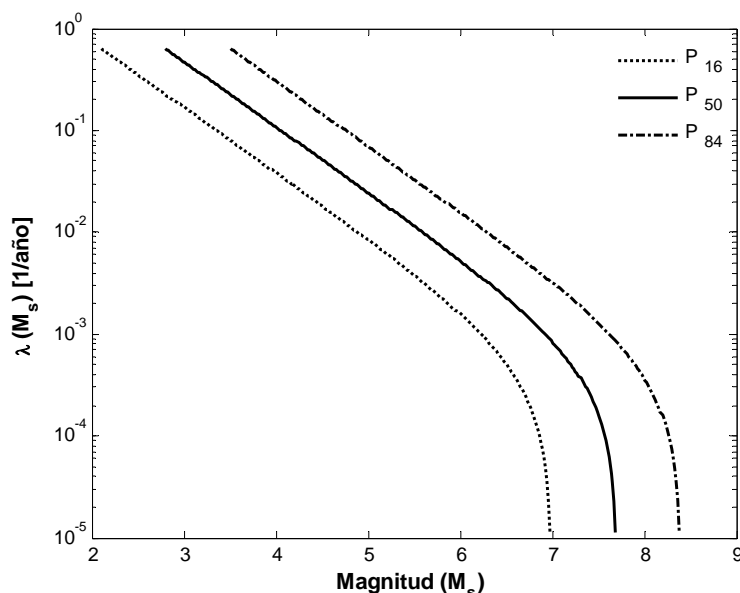


Figura 5-19. Frecuencias de excedencia de la magnitud para la fuente sísmica 10, al considerar los valores medios de M_s , y los valores de M_s relativos al percentil 16 y al percentil 84, respectivamente.

Tabla 5-11. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-20. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-7 propuesta por López Casado et al (2000b).

Zona Sismotectónica	Valores medios - σ			Valores medios			Valores medios + σ		
	M_{min}	M_{max}		M_{min}	M_{max}^*		M_{min}	M_{max}	
		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$
1	2.1	3.7	0.4	2.8	4.4	0.4	3.5	5.1	0.4
2	2.1	4.5	0.5	2.8	5.2	0.5	3.5	5.9	0.5
4	2.1	5.4	0.5	2.8	6.1	0.5	3.5	6.8	0.5
5	2.1	4.5	0.5	2.8	5.2	0.5	3.5	5.9	0.5
6	2.1	2.8	0.5	2.8	3.5	0.5	3.5	4.2	0.5
7	2.1	5.0	0.9	2.8	5.7	0.9	3.5	6.4	0.9
8	2.1	4.5	0.5	2.8	5.2	0.5	3.5	5.9	0.5
9	2.1	3.7	0.4	2.8	4.4	0.4	3.5	5.1	0.4
10	2.1	6.4	0.6	2.8	7.1	0.6	3.5	7.8	0.6
11	2.1	4.5	0.5	2.8	5.2	0.5	3.5	5.9	0.5

*en el CRISIS2008 se considera que el valor de M_{max} es un valor desconocido. Se considera además que esta variable tiene una distribución Gaussiana truncada y una función de densidad de probabilidad como se indica en Ordaz et al (2008). $E(M_{max})$ es el valor esperado de la magnitud máxima. El intervalo en que se estima estará comprendido el valor de M_{max} , está definido por el valor del (límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$ y el valor de $E(M_{max})$.

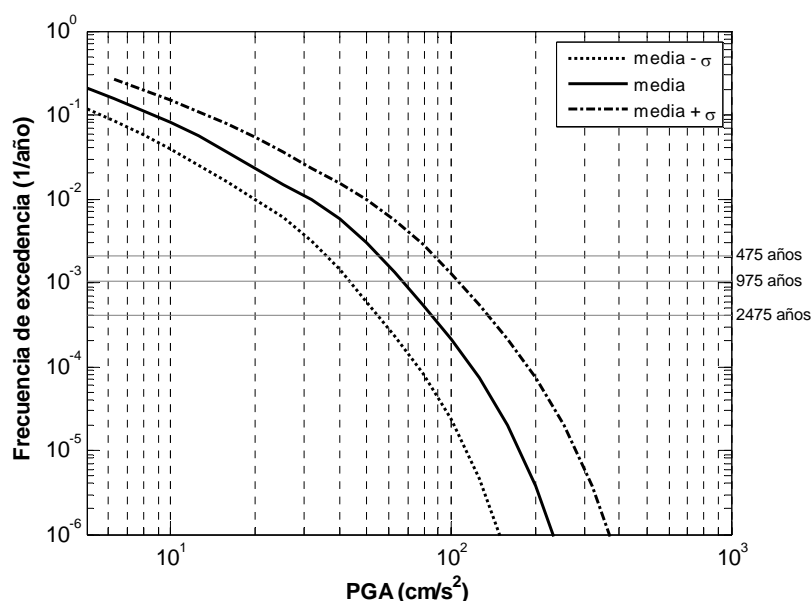


Figura 5-20. Caso 1. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su estimación se tomaron en cuenta los parámetros de sismicidad que se obtienen al considerar tres valores de la magnitud M_s : los valores medios de M_s , y los valores medios de M_s más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-10 y Tabla 5-11).

Caso 2. Ley M_s - I_0 de Gutdeutsch et al (2002).

Obtención de valores M_s , a partir de la relación propuesta por Gutdeutsch et al (2002), para el sur de Europa (Ec. 5-8).

$$M_s = 0.550I_0 + 1.260$$

5-8

donde I_0 es la intensidad epicentral. La Ec. 5-8 tiene asociada una desviación estándar de ± 0.412 , y el intervalo de validez de dicha ecuación es, aproximadamente, $4 \leq M_s \leq 7$, para profundidades menores a los 50 km (Gutdeutsch et al, 2002).

La Tabla 5-12 y la Tabla 5-13 contienen los parámetros de sismicidad para las fuentes sísmicas, asociados a la magnitud sísmica M_s . Tales parámetros de sismicidad se obtuvieron mediante los datos de la Tabla 5-2 y la Ec. 5-8. En la Figura 5-21 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica que se obtienen al definir la sismicidad de las fuentes sísmicas mediante los datos de la Tabla 5-12 y la Tabla 5-13.

De acuerdo con las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-21, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 26 hasta 67 años con un valor medio de 42 años. Mientras que el PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 56 y 169 años, con un valor medio de 91 años.

Tabla 5-12. Caso 2. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-8, propuesta por Gutdeutsch et al (2002).

Zona Sismotectónica	h (km)	$\lambda(M_{min})$	β	Coef. variación β
1	7	0.100	3.389	0.3
2	7	0.128	2.924	0.202
4	10	0.157	2.284	0.148
5	10	0.040	2.398	0.283
6	10	0.099	3.595	0.324
7	15	0.957	2.582	0.082
8	15	0.218	3.120	0.143
9	10	0.070	3.158	0.123
10	10	0.635	2.184	0.069
11	10	0.060	1.611	0.273

Tabla 5-13. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-21. Dichos parámetros están asociados a los valores de la magnitud sísmica M_s , que fueron obtenidos mediante la Ec. 5-8, propuesta por Gutdeutsch et al (2002).

Zona Sismotectónica	Valores medios - σ			Valores medios			Valores medios + σ		
	M_{min}	M_{max}		M_{min}	M_{max}		M_{min}	M_{max}	
		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de $M_{max})/2$		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de $M_{max})/2$		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de $M_{max})/2$
1	3.6	5.0	0.3	4.0	5.4	0.3	4.4	5.8	0.3
2	3.6	5.5	0.3	4.0	5.9	0.3	4.4	6.4	0.2
4	3.6	6.1	0.2	4.0	6.5	0.3	4.4	6.9	0.3
5	3.6	5.5	0.3	4.0	5.9	0.3	4.4	6.4	0.2
6	3.6	4.4	0.3	4.0	4.8	0.3	4.4	5.3	0.2
7	3.6	5.8	0.5	4.0	6.2	0.6	4.4	6.6	0.6
8	3.6	5.5	0.3	4.0	5.9	0.3	4.4	6.3	0.3
9	3.6	5.0	0.3	4.0	5.4	0.3	4.4	5.8	0.3
10	3.6	6.6	0.3	4.0	7.0	0.3	4.4	7.4	0.3
11	3.6	5.5	0.3	4.0	5.9	0.3	4.4	6.4	0.2

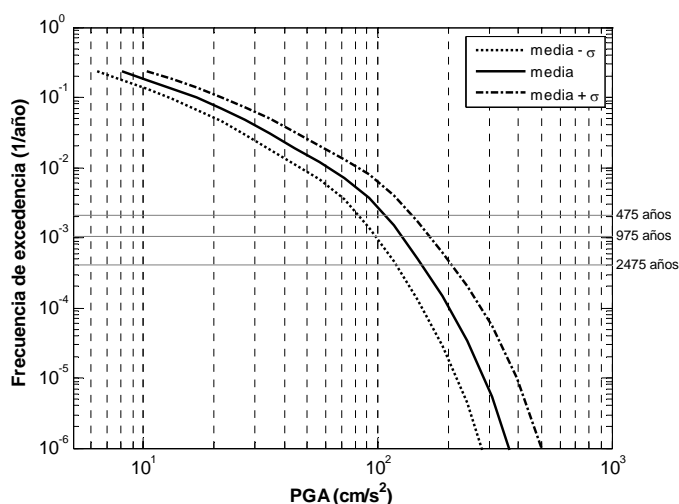


Figura 5-21. Caso 2. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su estimación se tomaron en cuenta los parámetros de sismicidad que se obtienen al considerar tres valores de la magnitud M_s : los valores medios de M_s , y los valores medios de M_s más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-12 y Tabla 5-13).

Caso 3. Ley M_L - I_0 de González (2000) e Irizarry et al (2010).

En este caso, la estimación de los valores de la magnitud M_s , a partir de los datos de intensidad I_0 , se realiza en varios pasos, es decir, no se emplea una relación directa entre intensidad epicentral I_0 y magnitud M_s . Primero, se emplean las relaciones de intensidad epicentral (I_0) y magnitud local (M_L) para Cataluña, indicadas mediante las ecuaciones 5-9 (González, 2000), 5-10, y 5-11 (Irizarry et al, 2010), para obtener las magnitudes M_L mostradas en la Tabla 5-14. Posteriormente, se emplea una relación para convertir las magnitudes M_L a magnitudes M_s .

$$M_L = 0.52I_0 + 1.5 \quad 10 \leq h < 15 \quad \text{5-9}$$

$$M_L = 0.52I_0 + 1.2 \quad h < 10 \quad \text{5-10}$$

$$M_L = 0.52I_0 + 1.8 \quad h \geq 15 \quad \text{5-11}$$

donde h es la profundidad en km.

Tabla 5-14. Caso 3. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Tales parámetros están asociados a la magnitud sísmica M_L , y fueron obtenidos mediante las ecuaciones 5-9, 5-10 y 5-11.

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min}	$\lambda(M_{min})$	β	M_{max}
1	7	3.8	0.100	3.585	5.4
2	7	3.8	0.128	3.092	5.9
4	10	4.1	0.157	2.415	6.7
5	10	4.1	0.040	2.537	6.2
6	10	4.1	0.099	3.802	5.1
7	15	4.4	0.957	2.731	7
8	15	4.4	0.218	3.300	6.5
9	10	4.1	0.070	3.340	5.7
10	10	4.1	0.635	2.310	7.2
11	10	4.1	0.060	1.704	6.2

Los parámetros de la Tabla 5-14 en términos de la magnitud M_L , pueden emplearse directamente en el CRISIS2008, para representar la sismicidad de cada fuente sísmica. Sin embargo, al hacerlo se debe tener especial cuidado en que la ley de atenuación empleada en el CRISIS2008, también esté en función de la magnitud M_L . En nuestro caso, con la finalidad de hacer una comparación en términos de magnitudes M_s , se convertirán los parámetros de la Tabla 5-14, a valores relacionados con la magnitud M_s . Para ello, se emplea la relación propuesta en 2002 por Gutdeutsch et al (Ec. 5-12) para el sur de Europa.

$$M_L = 0.664 + 0.893M_s \quad \text{5-12}$$

La Ec. 5-12 tiene asociada una desviación estándar de ± 0.163 .

La Tabla 5-15 y la Tabla 5-16 contienen los parámetros de sismicidad para las fuentes sísmicas, asociados a la magnitud sísmica M_s . Tales parámetros de sismicidad se obtuvieron mediante los datos de la Tabla 5-2 y la Ec. 5-12. En la Figura 5-22 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica que se obtienen al definir la sismicidad de las fuentes sísmicas mediante los datos de la Tabla 5-15 y la Tabla 5-16.

De acuerdo con las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-22, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 59 hasta 83 años con un valor medio de 71 años. Mientras que el valor de PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 143 y 244 años, con un valor medio de 196 años.

Tabla 5-15. Caso 3. Parámetros de sismicidad del modelo de Poisson (Ec. 3-4), para las fuentes sísmicas, cuya geometría se muestra en la Figura 5-5. Dichos parámetros están asociados a la magnitud sísmica M_s , y fueron obtenidos a partir de los datos de la Tabla 5-14 y la Ec. 5-12.

Zona Sismotectónica	h (km)	$\lambda(M_{min})$	β	Coef. variación β
1	7	0.100	3.201	0.3
2	7	0.128	2.761	0.202
4	10	0.157	2.157	0.148
5	10	0.040	2.265	0.283
6	10	0.099	3.395	0.324
7	15	0.957	2.439	0.082
8	15	0.218	2.950	0.143
9	10	0.070	2.983	0.123
10	10	0.635	2.063	0.069
11	10	0.060	1.522	0.273

Tabla 5-16. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas, considerados para estimar las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-22. Dichos parámetros están asociados a la magnitud sísmica M_s , y fueron obtenidos a partir de los datos de la Tabla 5-14 y la Ec. 5-12.

Zona Sismotectónica	Valores medios - σ			Valores medios			Valores medios + σ		
	M_{min}	M_{max}		M_{min}	M_{max}		M_{min}	M_{max}	
		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$		$E(M_{max})$	(Límite superior de M_{max} - límite inferior de $M_{max})/2$
1	3.4	4.8	0.3	3.5	5.0	0.3	3.7	5.1	0.3
2	3.4	5.4	0.3	3.5	5.6	0.2	3.7	5.7	0.3
4	3.7	6.3	0.3	3.8	6.5	0.3	4.0	6.6	0.3
5	3.7	5.7	0.3	3.8	5.9	0.3	4.0	6.0	0.3
6	3.7	4.6	0.3	3.8	4.7	0.3	4.0	4.9	0.3
7	4.0	6.4	0.5	4.2	6.5	0.6	4.3	6.7	0.6
8	4.0	6.1	0.3	4.2	6.2	0.3	4.3	6.4	0.3
9	3.7	5.1	0.3	3.8	5.3	0.3	4.0	5.5	0.3
10	3.7	6.9	0.3	3.8	7.1	0.2	4.0	7.2	0.3
11	3.7	5.7	0.3	3.8	5.9	0.3	4.0	6.0	0.3

De acuerdo con los resultados indicados en la Tabla 5-17, es posible observar que en el caso 1, el valor del periodo de retorno del PGA igual a 40 cm/s^2 se incrementa hasta en un 295% al considerar los valores medios de M_s más una desviación estándar. Por otra parte, al comparar los valores medios del periodo de retorno del PGA de 40 cm/s^2 para cada uno de los 3 casos considerados, es posible observar que el valor medio del periodo de retorno del caso 1 es 4 veces más grande que el valor medio del periodo de retorno del caso 2. Por lo tanto es posible concluir que la influencia de la relación Magnitud-Intensidad en los resultados de peligrosidad sísmica de Barcelona es importante.

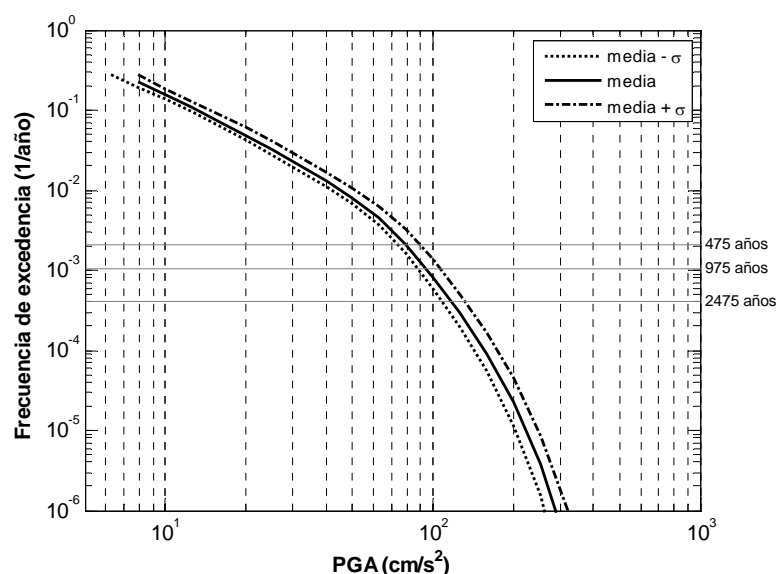


Figura 5-22. Caso 3. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su estimación se tomaron en cuenta los parámetros de sismicidad que se obtienen al considerar tres valores de la magnitud M_s : los valores medios de M_s , y los valores medios de M_s más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-15 y Tabla 5-16).

Tabla 5-17. Valores del periodo de retorno de un PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos para cada uno de los tres casos descritos en el presente apartado.

Caso	Medio - σ (años)	Medio (años)	Medio + σ (años)	Diferencia entre el valor medio y el valor medio - σ (%)	Diferencia entre el valor medio y el valor medio + σ (%)
1	59	169	667	65	295
2	26	42	67	38	60
3	59	71	83	17	17

5.7.2 Influencia del parámetro beta

Con la finalidad de estimar la influencia del parámetro β en los resultados de peligrosidad sísmica de Barcelona, se estimaron curvas de peligrosidad sísmica mediante el CRISIS2008 con los datos comunes siguientes:

- Sitio de cálculo: Longitud 2.195 grados; Latitud 41.42 grados;

- Fuentes sísmicas consideradas: las 10 fuentes sísmicas de la Figura 5-5;
- Ley de atenuación: Ambraseys et al (1996).

Caso 1. Ley M_s-I_0 de López Casado et al (2000b).

En el caso 1, los parámetros que representan la sismicidad de las fuentes sísmicas se indican en la Tabla 5-18, y los mismos fueron obtenidos mediante la Ec. 5-7 propuesta por López Casado et al (2000b). Al emplear dicha información se obtienen las curvas de peligrosidad sísmica indicadas en la Figura 5-23.

Tabla 5-18. Caso 1. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) considerados para estimar la influencia del parámetro sísmico β .

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min} media	$\lambda(M_{min})$	β			Coef. variación β	M_{max} media	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de M_{max})/2
				media - σ	media	media + σ			
1	7	2.8	0.100	1.968	2.811	3.655	0.3	4.4	0.4
2	7	2.8	0.128	1.798	2.252	2.706	0.202	5.2	0.5
4	10	2.8	0.157	1.399	1.642	1.885	0.148	6.1	0.5
5	10	2.8	0.040	1.325	1.847	2.370	0.283	5.2	0.5
6	10	2.8	0.099	2.185	3.230	4.280	0.324	3.5	0.5
7	15	2.8	0.957	1.705	1.856	2.010	0.082	5.7	0.9
8	15	2.8	0.218	2.060	2.403	2.750	0.143	5.2	0.5
9	10	2.8	0.070	2.297	2.620	2.943	0.123	4.4	0.4
10	10	2.8	0.635	1.370	1.472	1.574	0.069	7.1	0.6
11	10	2.8	0.060	0.902	1.241	1.580	0.273	5.2	0.5

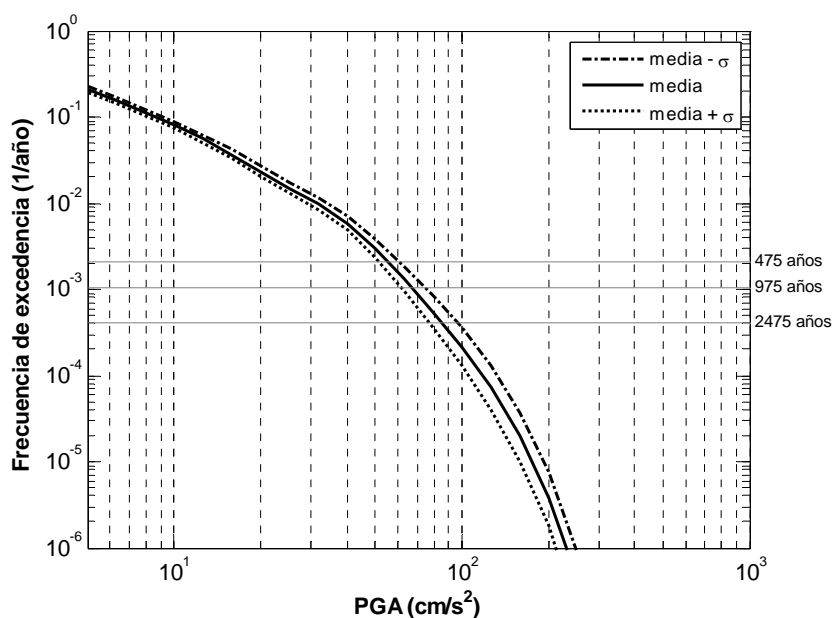


Figura 5-23. Caso 1. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medio de β más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-18).

De acuerdo con las curvas de la Figura 5-23, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 147 hasta 208 años con un valor medio de 169 años. Mientras que el PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 455 y 833 años, con un valor medio de 588 años.

Caso 2. Ley M_s-I_0 de Gutdeutsch et al (2002).

En el caso 2, los parámetros que representan la sismicidad de las fuentes sísmicas se indican en la Tabla 5-19, y los mismos fueron obtenidos mediante la Ec. 5-8 propuesta por Gutdeutsch et al (2002). Al emplear dicha información se obtienen las curvas de peligrosidad sísmica indicadas en la Figura 5-24.

Tabla 5-19. Caso 2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) considerados para estimar la influencia del parámetro sísmico β .

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min}		β			Coef. variación β	M_{max} media	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de $M_{max})/2$
		media	$\lambda(M_{min})$	media - σ	media	media + σ			
1	7	4	0.100	2.373	3.389	4.405	0.3	5.4	0.3
2	7	4	0.128	2.335	2.924	3.513	0.202	5.9	0.3
4	10	4	0.157	1.945	2.284	2.622	0.148	6.5	0.3
5	10	4	0.040	1.72	2.398	3.076	0.283	5.9	0.3
6	10	4	0.099	2.431	3.595	4.758	0.324	4.8	0.3
7	15	4	0.957	2.371	2.582	2.793	0.082	6.2	0.6
8	15	4	0.218	2.673	3.120	3.567	0.143	5.9	0.3
9	10	4	0.070	2.769	3.158	3.547	0.123	5.4	0.3
10	10	4	0.635	2.033	2.184	2.335	0.069	7.0	0.3
11	10	4	0.060	1.171	1.611	2.051	0.273	5.9	0.3

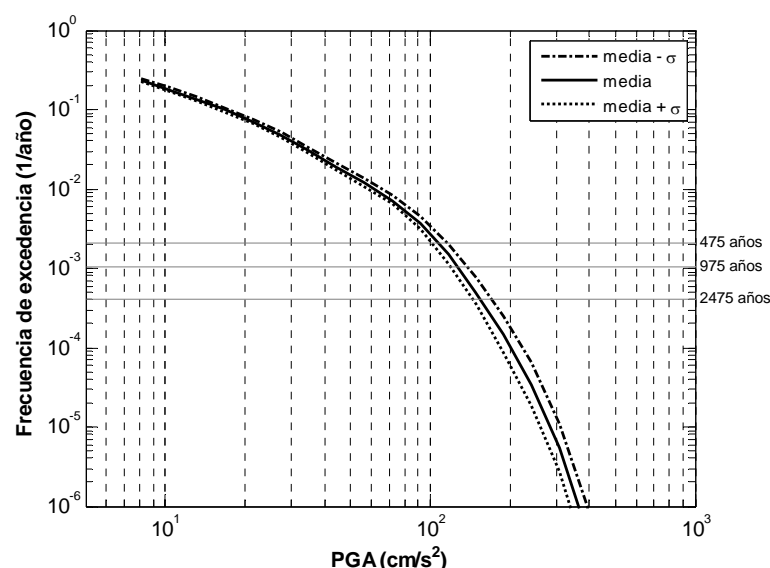


Figura 5-24. Caso 2. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-19).

De acuerdo con las curvas de la Figura 5-24, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 37 hasta 45 años con un valor medio de 42 años. Mientras que el PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 77 y 105 años, con un valor medio de 91 años.

Caso 3. Ley M_L-I_0 de González (2000) e Irizarry et al (2010).

En el caso 3, los parámetros que representan la sismicidad de las fuentes sísmicas se indican en la Tabla 5-20, y los mismos fueron obtenidos mediante expresiones propuestas por González (2000) e Irizarry et al (2010). Al emplear dicha información se obtienen las curvas de peligrosidad sísmica indicadas en la Figura 5-25.

Tabla 5-20. Caso 3. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) considerados para estimar la influencia del parámetro sísmico β .

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min} media	$\lambda(M_{min})$	β			Coef. variación β	M_{max} media	Intervalo de incertidumbre de M_{max}
				media - σ	media	media + σ			
1	7	3.5	0.100	2.241	3.201	4.161	0.3	5.0	0.3
2	7	3.5	0.128	2.205	2.761	3.318	0.202	5.6	0.2
4	10	3.9	0.157	1.838	2.157	2.476	0.148	6.5	0.3
5	10	3.9	0.040	1.625	2.265	2.906	0.283	5.9	0.3
6	10	3.9	0.099	2.296	3.395	4.494	0.324	4.7	0.3
7	15	4.2	0.957	2.239	2.439	2.638	0.082	6.5	0.6
8	15	4.2	0.218	2.524	2.950	3.369	0.143	6.2	0.3
9	10	3.9	0.070	2.615	2.983	3.350	0.123	5.3	0.3
10	10	3.9	0.635	1.920	2.063	2.205	0.069	7.1	0.2
11	10	3.9	0.060	1.106	1.522	1.937	0.273	5.9	0.3

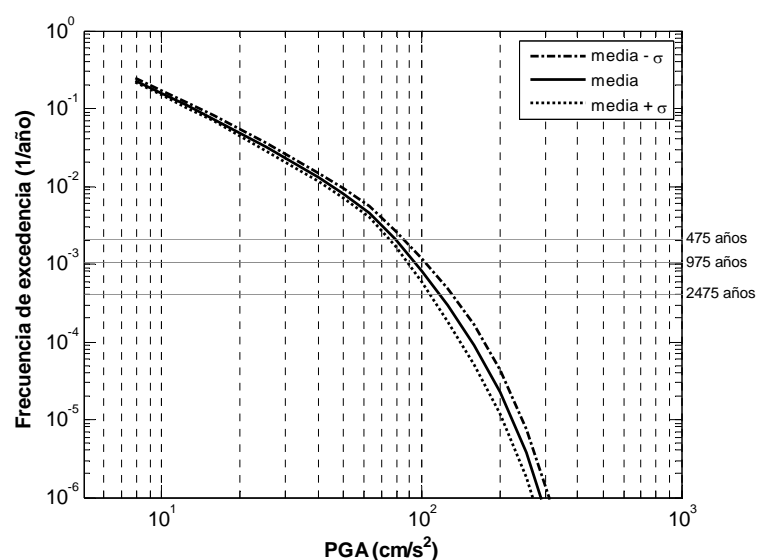


Figura 5-25. Caso 3. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores del parámetro de sismicidad β : los valores medios de β y los valores medios de β más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-20).

De acuerdo con las curvas de la Figura 5-25, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 63 hasta 83 años con un valor medio de 71 años. Mientras que el PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 164 hasta 222 años, con un valor medio de 196 años.

Por otra parte, de acuerdo con los resultados indicados en la Tabla 5-21, es posible observar que en el caso 1, los valores del periodo de retorno del PGA de 40 cm/s^2 obtenidos al considerar una desviación estándar en los valores del parámetro β , varían hasta en un 23% con respecto a los valores del periodo de retorno obtenidos al considerar los valores medios del parámetro β . Por lo tanto, si comparamos estos resultados con los obtenidos en la evaluación de la influencia en la peligrosidad sísmica de la relación de transformación Intensidad-Magnitud (Tabla 5-17), entonces, es posible concluir que la influencia de la incertidumbre del parámetro beta en las curvas de peligrosidad sísmica, es en general, menor que la influencia de la incertidumbre en la relación Intensidad-Magnitud (Tabla 5-17).

Tabla 5-21. Valores del periodo de retorno de un PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos para cada uno de los tres casos descritos en el presente apartado.

Caso	Medio – σ (años)	Medio (años)	Medio + σ (años)	Diferencia entre el valor medio y el valor medio – σ (%)	Diferencia entre el valor medio y el valor medio + σ (%)
1	147	169	208	13	23
2	37	42	45	12	7
3	63	71	83	11	17

5.7.3 Influencia de la ley de atenuación

Caso 1. Ley M_s-I_0 de López Casado et al (2000b).

Con el propósito de estimar la influencia de la ley de atenuación en las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS se consideran los datos comunes siguientes:

- Sitio de cálculo: Longitud 2.195 grados; Latitud 41.42 grados.
- Fuentes sísmicas consideradas: las 10 fuentes sísmicas de la Figura 5-5.
- Ley de atenuación: los valores medios de la ley de Ambraseys et al (1996), y los valores medios más y menos una desviación estándar, respectivamente (Ec. 5-3).

Las curvas de peligrosidad indicadas en la Figura 5-26, corresponden a los resultados que se obtienen al emplear los datos comunes indicados anteriormente, y los parámetros de sismicidad de la Tabla 5-21. De acuerdo con las curvas de la Figura 5-26, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 53 hasta 1111 años, con un valor medio de 169 años. Mientras que el PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 114 y 5882 años, con un valor medio de 588 años.

Tabla 5-22. Caso 1. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) consideradas para estimar la influencia de la ley de atenuación.

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min}		β	Coef. variación β	M_{max}	
		media	$\lambda(M_{min})$			media	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de M_{max})/2
1	7	2.8	0.100	2.811	0.3	4.4	0.4
2	7	2.8	0.128	2.252	0.202	5.2	0.5
4	10	2.8	0.157	1.642	0.148	6.1	0.5
5	10	2.8	0.040	1.847	0.283	5.2	0.5
6	10	2.8	0.099	3.230	0.324	3.5	0.5
7	15	2.8	0.957	1.856	0.082	5.7	0.9
8	15	2.8	0.218	2.403	0.143	5.2	0.5
9	10	2.8	0.070	2.620	0.123	4.4	0.4
10	10	2.8	0.635	1.472	0.069	7.1	0.6
11	10	2.8	0.060	1.241	0.273	5.2	0.5

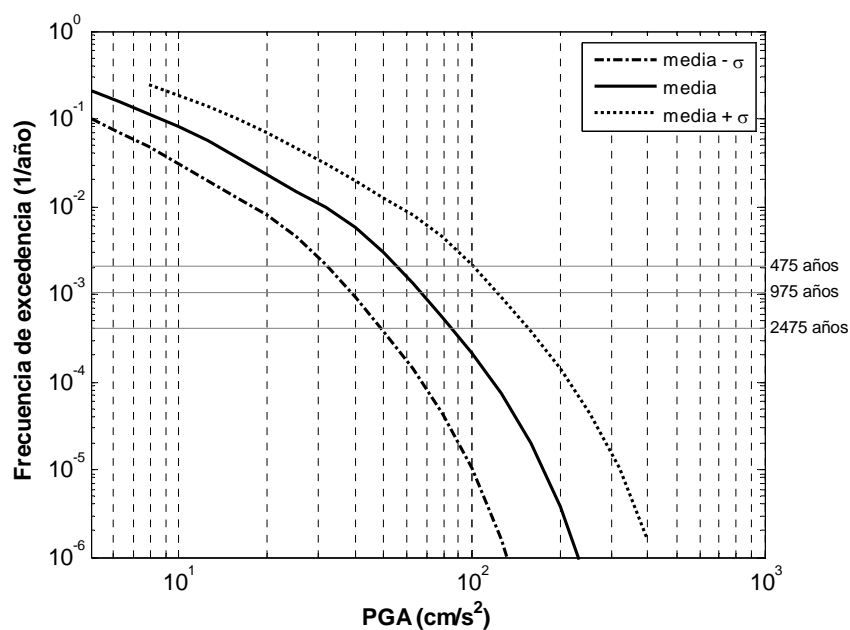


Figura 5-26. Caso 1. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores diferentes de la ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno: los valores medios de PGA y los valores medios de PGA más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-22).

Caso 2. Ley M_s-I_0 de Gutdeutsch et al (2002).

En este caso las curvas de peligrosidad indicadas en la Figura 5-27, corresponden a los resultados que se obtienen al emplear los datos comunes indicados anteriormente, y los parámetros de sismicidad de la Tabla 5-23.

Tabla 5-23. Caso 2. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) consideradas para estimar la influencia de la ley de atenuación.

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min}		$\lambda(M_{min})$	β	Coef. variación β	M_{max}	
		media					media	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de M_{max})/2
1	7	4		0.100	3.389	0.3	5.4	0.3
2	7	4		0.128	2.924	0.202	5.9	0.3
4	10	4		0.157	2.284	0.148	6.5	0.3
5	10	4		0.040	2.398	0.283	5.9	0.3
6	10	4		0.099	3.595	0.324	4.8	0.3
7	15	4		0.957	2.582	0.082	6.2	0.6
8	15	4		0.218	3.120	0.143	5.9	0.3
9	10	4		0.070	3.158	0.123	5.4	0.3
10	10	4		0.635	2.184	0.069	7.0	0.3
11	10	4		0.060	1.611	0.273	5.9	0.3

De acuerdo con las curvas de la Figura 5-27, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 15 hasta 128 años, con un valor medio de 42 años. Mientras que el PGA de 60 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 30 y 435 años, con un valor medio de 91 años.

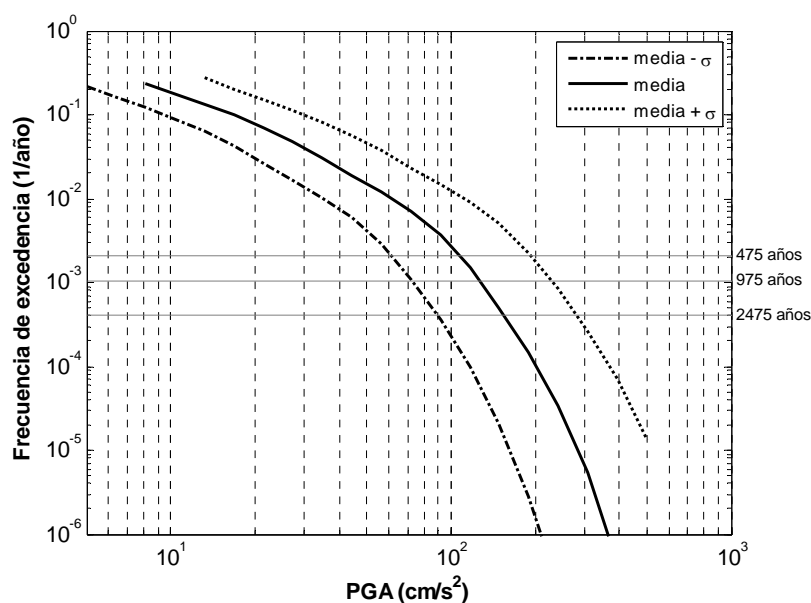


Figura 5-27. Caso 2. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores diferentes de la ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno: los valores medios de PGA y los valores medios de PGA más y menos una desviación estándar, respectivamente (Tabla 5-23).

Caso 3. Ley M_L - I_0 de González (2000) e Irizarry et al (2010).

En este caso las curvas de peligrosidad indicadas en la Figura 5-28, corresponden a los resultados que se obtienen al emplear los datos comunes indicados anteriormente, y los parámetros de sismicidad de la Tabla 5-24.

Tabla 5-24. Caso 3. Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas (Figura 5-5) consideradas para estimar la influencia de la ley de atenuación.

Zona Sismotectónica	h (km)	M_{min}		β	Coef. variación β	M_{max}	
		media	$\lambda(M_{min})$			media	(Límite superior de M_{max} – límite inferior de M_{max})/2
1	7	3.5	0.100	3.201	0.3	5.0	0.3
2	7	3.5	0.128	2.761	0.202	5.6	0.2
4	10	3.9	0.157	2.157	0.148	6.5	0.3
5	10	3.9	0.040	2.265	0.283	5.9	0.3
6	10	3.9	0.099	3.395	0.324	4.7	0.3
7	15	4.2	0.957	2.439	0.082	6.5	0.6
8	15	4.2	0.218	2.950	0.143	6.2	0.3
9	10	3.9	0.070	2.983	0.123	5.3	0.3
10	10	3.9	0.635	2.063	0.069	7.1	0.2
11	10	3.9	0.060	1.522	0.273	5.9	0.3

De acuerdo con las curvas de la Figura 5-28, el valor de PGA igual a 40 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía desde 25 hasta 286 años con un valor medio de 77 años. Mientras que el PGA de 69 cm/s^2 tiene un periodo de retorno que varía entre 56 y 1449, con un valor medio de 196.

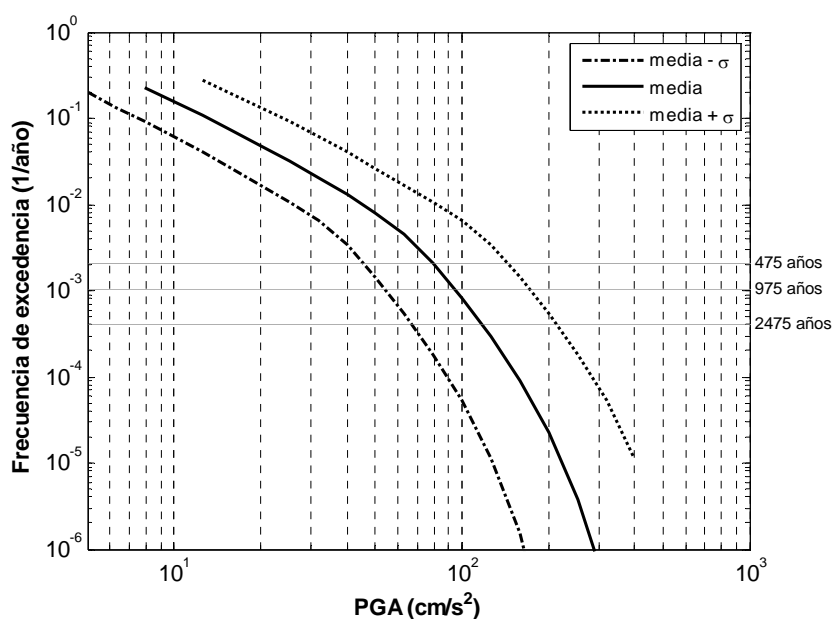


Figura 5-28. Caso 3. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona, cuyas diferencias se deben a que para su obtención se consideraron tres valores diferentes de la ley de atenuación de la aceleración máxima del terreno: los valores medios de PGA y los valores medios de PGA más y menos una desviación estándar (Tabla 5-24).

De acuerdo con los resultados indicados en la Tabla 5-25, es posible observar que para los tres casos, los periodos de retorno del PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos al considerar una desviación estándar en la ley de atenuación, superan desde el 205% hasta el 557% los valores de los periodos de retorno obtenidos al considerar los valores medios de la ley de atenuación. Por lo tanto, es posible concluir que la influencia

de la incertidumbre en la ley de atenuación en los resultados de peligrosidad sísmica de Barcelona, es mayor que la influencia que tienen las incertidumbres asociadas a las relaciones Intensidad-Magnitud (Tabla 5-17), y la influencia de la incertidumbre en los parámetros de sismicidad β (Tabla 5-21) empleados en el presente trabajo.

Tabla 5-25. Valores del periodo de retorno de un PGA igual a 40 cm/s^2 , obtenidos para cada uno de los tres casos descritos en el presente apartado.

Caso	Medio - σ (años)	Medio (años)	Medio + σ (años)	Diferencia entre el valor medio y el valor medio - σ (%)	Diferencia entre el valor medio y el valor medio + σ (%)
1	53	169	1111	69	557
2	15	42	128	64	205
3	25	77	286	68	271

5.8 Resultados

5.8.1 Curvas de peligrosidad probabilista basadas en intensidades

En el caso de la peligrosidad sísmica basada en intensidades, se obtuvieron dos tipos de curvas de peligrosidad: a) las obtenidas mediante el CRISIS2007 y; b) la obtenida mediante el empleo del CRISIS2008. Tal como se mencionó anteriormente las tres curvas obtenidas mediante el CRISIS2007 se obtuvieron debido a que en dicho código aún no era posible hacer estimaciones de peligrosidad, en las que los residuos de la ley de atenuación tuviesen una distribución normal. Lo cual si puede realizarse mediante el código CRISIS2008. Al observar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas en ambos casos (Figura 5-29), es posible identificar que la simplificación realizada para poder usar el código CRISIS2007, para estimar curvas de peligrosidad sísmica mediante leyes de atenuación de intensidades macrosísmicas, es razonablemente válida porque la curva de peligrosidad sísmica única obtenida mediante el código CRISIS2008, queda contenida entre la curva media de peligrosidad y la curva media + σ obtenidas mediante el CRISIS2007. De manera que el procedimiento simplificado usado en el presente caso con el CRISIS2007, puede emplearse para Barcelona siempre que se considere que no se tendrá una curva única de peligrosidad, sino que la peligrosidad sísmica estará representada por el intervalo definido por las curvas media y la curva media + σ . Sin embargo, de acuerdo con los resultados de esta comparación es posible concluir también que en el procedimiento simplificado en el que se usa el CRISIS2007, se tiende a sobre-estimar las tasas de peligrosidad asociadas a las intensidades macrosísmicas bajas, y a subestimar las tasas de peligrosidad correspondientes a las intensidades macrosísmicas altas.

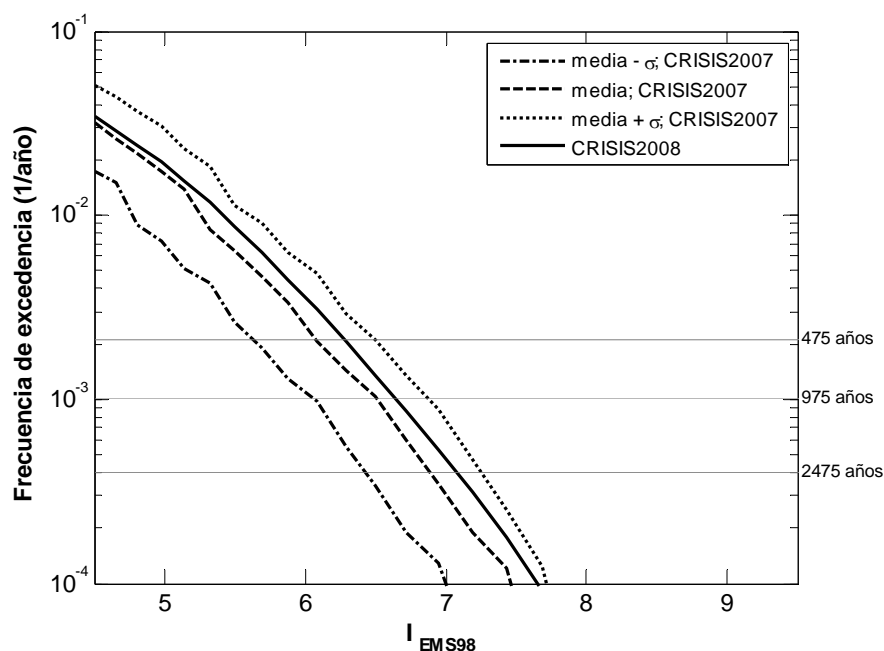


Figura 5-29. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas mediante el CRISIS2007 (media - σ , media, media + σ), y la curva de peligrosidad sísmica única obtenida mediante el CRISIS2008.

5.8.2 Curva de peligrosidad probabilista basada en magnitudes

Para obtener una curva de peligrosidad sísmica que tome en cuenta las diferentes relaciones Magnitud-Intensidad consideradas en el presente trabajo, es posible emplear un árbol lógico como el de la Figura 5-30. Particularmente, a partir de las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas para cada uno de los tres casos de relaciones Magnitud-Intensidad considerados, y mediante el CRISIS2008, es posible obtener la curva que relaciona a cada una de dichas curvas con los criterios del árbol lógico establecido en la Figura 5-30. Los árboles lógicos permiten integrar los resultados de peligrosidad sísmica que se obtienen al considerar distintos parámetros (McGuire, 2004), y su principal objetivo es considerar incertidumbres epistémicas (Bommer y Abrahamson, 2006). La curva final obtenida se indica en la Figura 5-31.

De acuerdo con los resultados de la Figura 5-31, el PGA que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 55, 80 ó 110 cm/s^2 según se elijan la curva de peligrosidad sísmica del caso 1, caso 3 o el caso 2, respectivamente. Mientras que si se considera la curva de peligrosidad sísmica que resulta de combinar mediante los criterios del árbol lógico de la Figura 5-30 los 3 casos indicados, entonces, el valor de PGA que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 85 cm/s^2 (Figura 5-32).

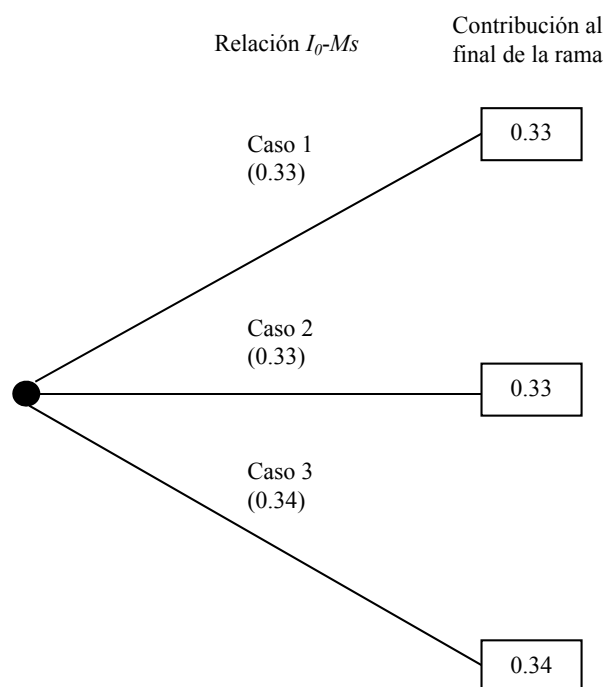


Figura 5-30. Ejemplo de árbol lógico que puede usarse para considerar las diferentes relaciones $I_0 - Ms$ utilizadas para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona.

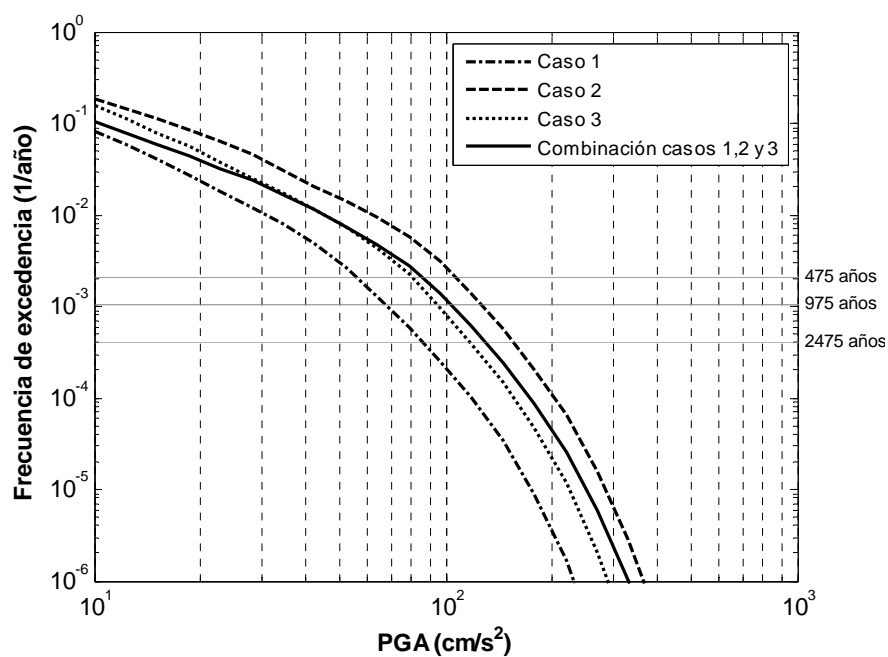


Figura 5-31. Curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas mediante el CRISIS2008 para los casos 1,2,3 y para la combinación de ellos de acuerdo con los criterios del árbol lógico indicado en la Figura 5-30.

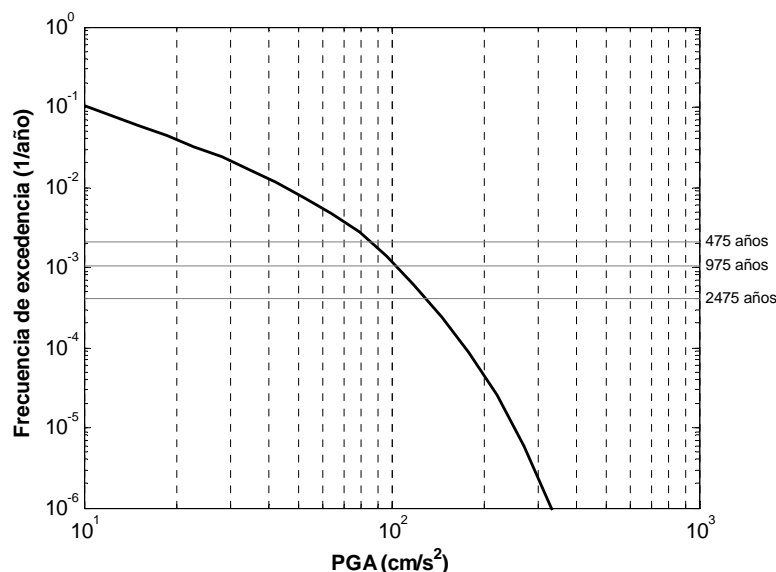


Figura 5-32. Curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida mediante el CRISIS2008 a partir de la combinación de los casos 1,2 y 3 de acuerdo con los criterios del árbol lógico indicado en la Figura 5-30.

A partir de las curvas de la Figura 5-31 es posible emplear una relación de PGA-Intensidad macrosísmica, para obtener curvas de frecuencias de excedencia versus intensidad macrosísmica. En el caso de Barcelona se ha usado con mucha frecuencia una relación PGA-Intensidad macrosísmica establecida en las normas sísmicas (NCSE-94, 1994). Sin embargo, debido a que se considera que dicha relación se propuso con datos que no se obtuvieron en España (García, 2009), en el presente trabajo se identifican otras relaciones PGA-intensidad, con la finalidad de elegir una de ellas para transformar las curvas de PGA en términos de intensidad macrosísmica.

En la Figura 5-33 se muestran 4 relaciones intensidad macrosísmica-PGA: a) la de Sorensen et al (2008) que fue propuesta a partir de datos de la región de Campania en Italia y en especial de registros del sismo de Irpina de 1980 (Ec. 5-13); b) la de Wald et al (1999) determinada a partir de datos sísmicos de California (Ec. 5-14); c) la de Marin et al (2004) propuesta a partir de datos de Francia (Ec. 5-15), y; d) la de las normas NCSE-94 (Ec. 5-16). En el presente trabajo se emplearon las cuatro relaciones para observar las curvas que se obtienen en cada caso.

$$I = 1.98 \log \cdot (PGA) + 6.51 \quad 5-13$$

$$I = 3.66 \log \cdot (PGA) - 1.66 \quad 5-14$$

$$I = 10 + 2.3 \log \cdot (PGA) \quad 5-15$$

$$I = [3.2233 + \log \cdot (PGA)] / 0.30103 \quad 5-16$$

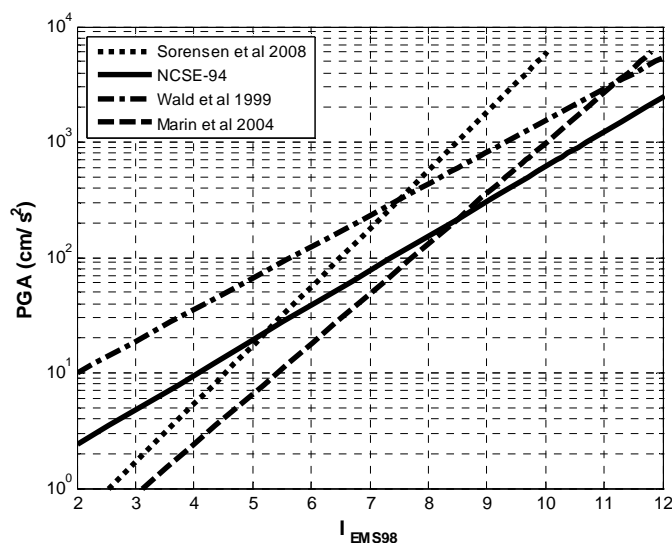


Figura 5-33. Relaciones intensidad macrosísmica-PGA propuestas por Sorensen et al(2008), Wald et al (1999), Marin et al (2004) y la considerada en las normas NCSE-94 (1994).

En la Figura 5-34 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31 pero en términos de intensidades macrosísmicas, obtenidas mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Wald et al (1999). De acuerdo con dichas curvas, la intensidad macrosísmica que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 4.7, 5.8 ó 5.2, según se elija la curva de peligrosidad sísmica del caso 1, del caso 2 o del caso 3, respectivamente. Mientras que será igual a 5.4 si se elige la curva que resulta de combinar los tres casos.

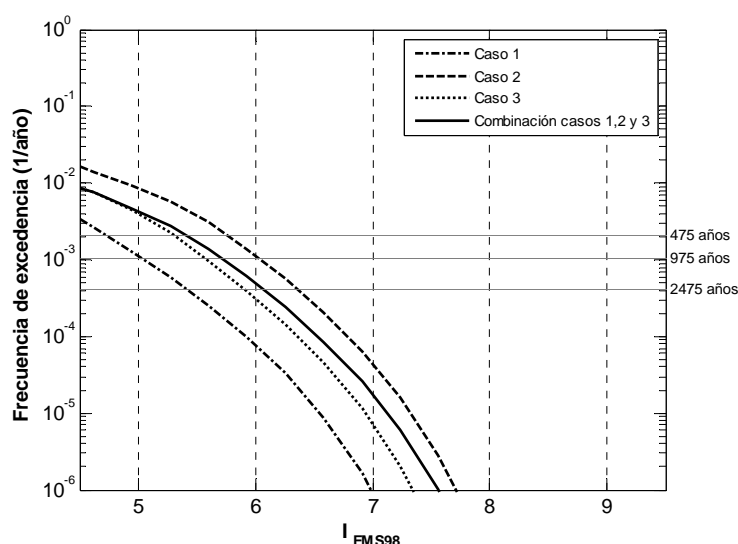


Figura 5-34. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Wald et al (1999).

De manera similar en la Figura 5-35 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, pero en términos de intensidades macrosísmicas, obtenidas mediante la relación de intensidades

macrosísmicas versus PGA de Marin et al (2004). De acuerdo con dichas curvas, la intensidad macrosísmica que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 7.1, 7.8 ó 7.5, según se elija la curva de peligrosidad sísmica del caso 1, del caso 2 o del caso 3, respectivamente. Mientras que será igual a 7.6 si se elige la curva que resulta de combinar los tres casos.

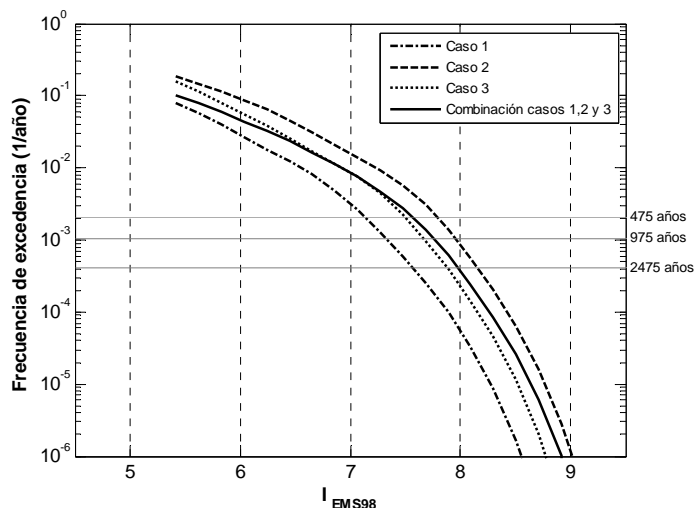


Figura 5-35. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Marin et al (2004).

Por otra parte en la Figura 5-36 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31 pero en términos de intensidades macrosísmicas, obtenidas mediante la relación intensidades macrosísmicas versus PGA de la NCSE-94 (1994). De acuerdo con dichas curvas, la intensidad macrosísmica que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 6.6, 7.4 ó 7, según se elija la curva de peligrosidad sísmica del caso 1, del caso 2 o del caso 3, respectivamente. Mientras que será igual a 7.2, si se elige la curva que resulta de combinar los tres casos.

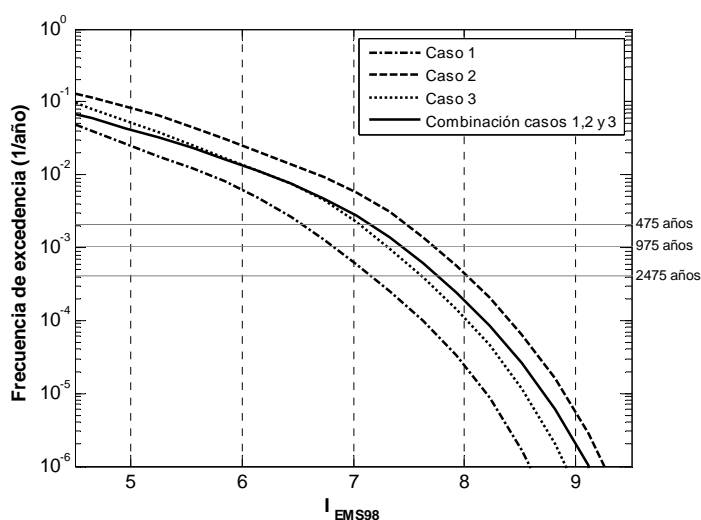


Figura 5-36. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de la NCSE-94 (1994).

De manera similar en la Figura 5-37 se muestran las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31 pero en términos de intensidades macrosísmicas, obtenidas mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Sorensen et al (2008). De acuerdo con dichas curvas, la intensidad macrosísmica que tiene un periodo de retorno de 475 años es igual a 6.0, 6.6 ó 6.3, según se elija la curva de peligrosidad sísmica del caso 1, del caso 2 o del caso 3, respectivamente. Mientras que será igual a 6.4, si se elige la curva que resulta de combinar los tres casos.

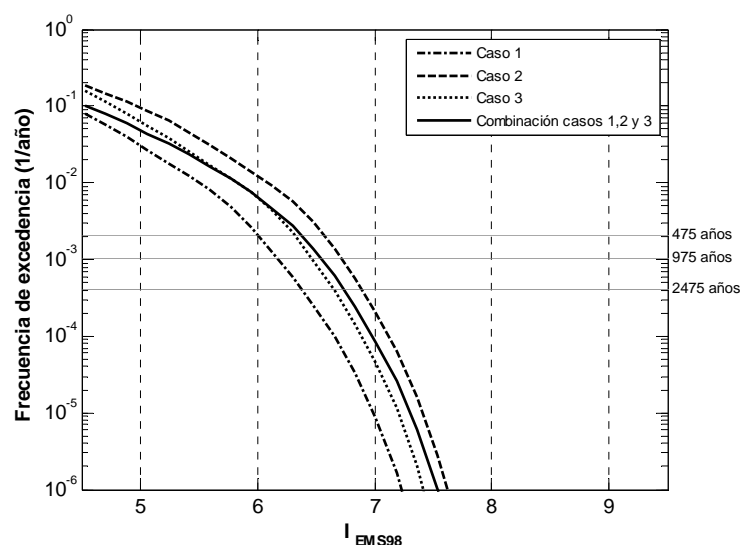


Figura 5-37. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar cada curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-31, mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Sorensen et al (2008).

En la Figura 5-38 se muestra únicamente la curva que resulta de la combinación de los casos 1, 2 y 3, y de emplear diferentes relaciones de intensidad macrosísmica-PGA.

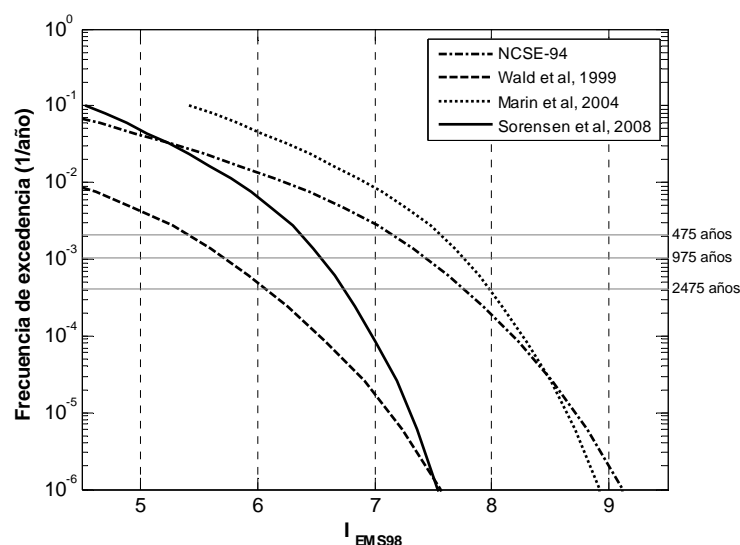


Figura 5-38. Curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar la curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-32, mediante diferentes relaciones intensidad macrosísmica versus PGA.

Adicionalmente, en la Figura 5-39 es posible observar que entre las curvas en términos de intensidades macrosísmicas obtenidas al transformar las curvas en términos de PGA, la obtenida mediante la relación de Sorensen et al (2008), es la que tiene las mayores similitudes con las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas directamente en términos de intensidades macrosísmicas (Figura 5-16). Especialmente, en los periodos de retorno comprendidos entre los 475 años y 975 años. Por lo tanto, debido a que las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas directamente mediante intensidades macrosísmicas, son las que acumulan menos incertidumbres, es posible concluir que para el presente estudio la relación de Sorensen es una relación razonablemente adecuada para el caso de Barcelona, especialmente, en intensidades macrosísmicas comprendidas entre V y VII. Por lo tanto, la curva de frecuencias de excedencia de intensidades macrosísmicas (Figura 5-40) obtenida al transformar mediante la relación de Sorensen et al (2008), la curva de frecuencias de excedencia de valores de PGA de la Figura 5-32, puede considerarse una curva que representa en forma razonable la peligrosidad sísmica de Barcelona.

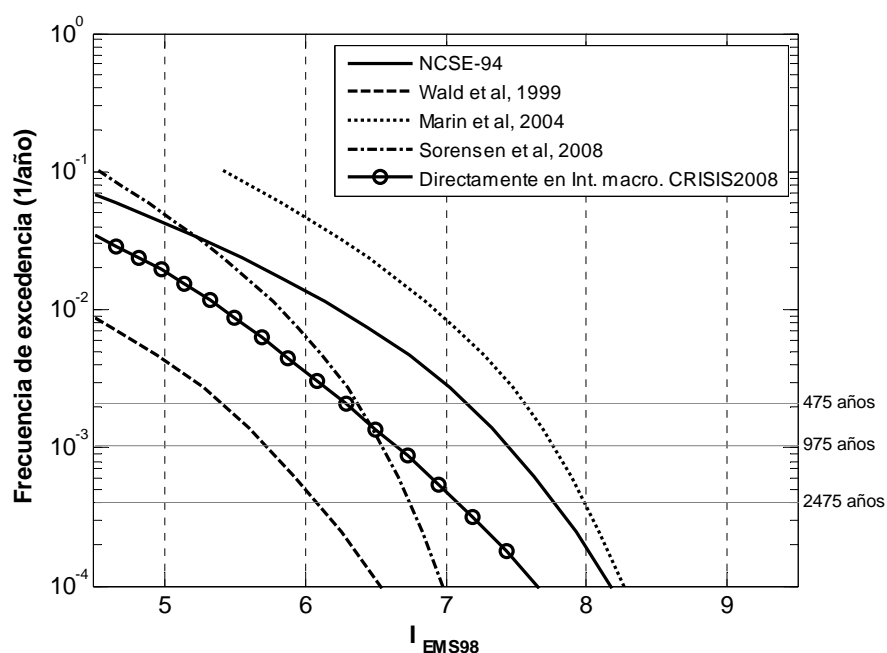


Figura 5-39. Comparación de las curvas de las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas al transformar valores de PGA en intensidades macrosísmicas (Figura 5-38), con la curva de peligrosidad sísmica obtenida directamente en términos de intensidades macrosísmicas (Figura 5-16).

En la Tabla 5-26 se incluyen los valores de PGA estimados para Barcelona, para los periodos de retorno de 475 años y 975 años. De acuerdo con los resultados de dicha tabla, los mayores valores de PGA se obtuvieron en el caso 2 (Figura 5-27) y los menores en el caso 1 (Figura 5-26). Por ejemplo, de acuerdo con el caso 1 el valor de PGA para un periodo de retorno de 475 años es igual 55 cm/s^2 , mientras que de acuerdo con el caso 2 para el mismo periodo de retorno el valor de PGA es igual a 110 cm/s^2 . Por otra

parte, en la Tabla 5-27 se muestran los valores de intensidad macrosísmica estimados en el presente trabajo para Barcelona, para un periodo de retorno de 475 años. Al comparar los valores de intensidad de dicha tabla es posible observar que el menor valor estimado de la intensidad es igual a 6.3 y el máximo igual a 6.4. Siendo el menor valor el que se obtiene de la curva de peligrosidad sísmica basadas en intensidades, y obtenida mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16).

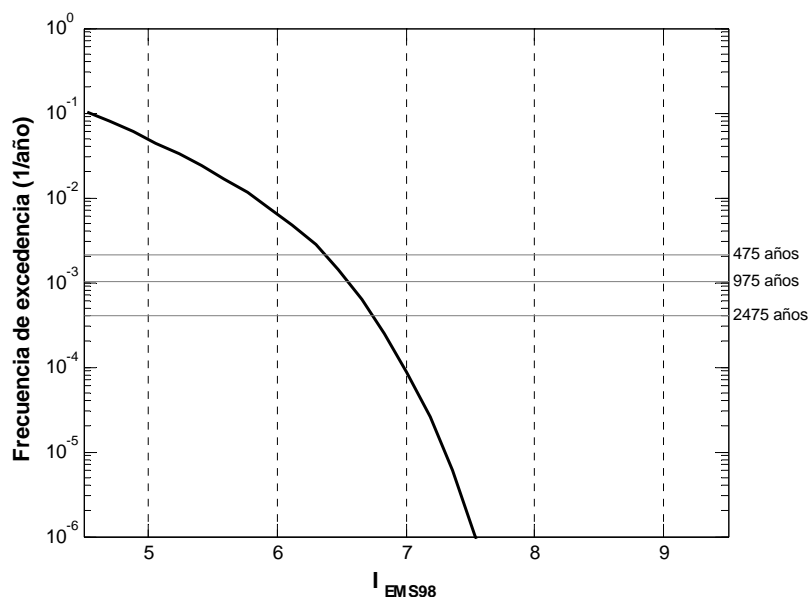


Figura 5-40. Curva de peligrosidad sísmica obtenida al transformar mediante la relación de intensidades macrosísmicas versus PGA de Sorensen et al (2008), la curva de peligrosidad sísmica de la Figura 5-32.

Tabla 5-26. Aceleración máxima del terreno (cm/s^2), en Barcelona para los periodos de retorno de 475 y 975 años.

Caso	PGA (cm/s^2)	
	T = 475 años	T = 975 años
1	55	67
2	110	140
3	80	95
Combinación casos 1, 2 y 3	85	102

Tabla 5-27. Intensidad macrosísmica en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años.

Caso	Procedimiento	Intensidad macrosísmica
Basado en intensidades	Intensidad macrosísmica obtenida directamente mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16).	6.3
Basado en magnitudes	Intensidad macrosísmica estimada al transformar resultados obtenidos en términos de PGA (Figura 5-40).	6.4

5.8.3 Discusión. Comparación con otros estudios

En la Tabla 5-28 se muestran valores de la intensidad macrosísmica que han sido estimados para Barcelona en estudios previos. Al comparar los datos de dicha tabla con los resultados obtenidos en el presente estudio (Tabla 5-27), es posible observar que las similitudes en los resultados son importantes. Por ejemplo, en el presente trabajo se obtuvo una intensidad de 6.3 cuando se empleó el CRISIS2008, valor de intensidad que coincide con la obtenida por Goula et al (1997), y que está ligeramente por debajo del valor de 6.5 obtenido por Secanell et al (2004). Por otra parte, en la Tabla 5-29 se muestran los valores de PGA en Barcelona que se estimaron en estudios anteriores para un periodo de retorno de 475 años. Al comparar los datos de dicha tabla con los resultados obtenidos en el presente estudio (Tabla 5-26), es posible observar que aunque existen diferencias entre los valores medios de PGA de la Tabla 5-26 y los de la Tabla 5-29, dichas diferencias no son significativas porque todos los valores de PGA obtenidos en el presente estudio, están comprendidos dentro de los valores de PGA obtenidos en los estudios previos mencionados.

Tabla 5-28. Valores de la intensidad macrosísmica en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años, estimados en diferentes estudios de peligrosidad sísmica.

Autores del estudio	Intensidad media - σ	Intensidad media	Intensidad media + σ
Secanell et al, 2004.	6.2	6.5	6.8
Peláez y López, 2002.	-	Un intervalo delimitado por V-VI y VI-VII	-
Goula et al, 1997.	-	6.3	-
NCSE-02, 2002.		6.1	

Tabla 5-29. Valores de la aceleración máxima del terreno en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años, estimados en diferentes estudios de peligrosidad sísmica.

Autores del estudio	PGA (cm/s^2)
Jiménez et al, 1999.	80-160
Peláez y López, 2002.	40-80
Irizarry et al, 2010.	100
Secanell et al, 2008.	76-100
NCSE-02, 2002.	40

5.8.4 Curvas de peligrosidad adoptadas

Para estimar el riesgo sísmico de edificios en Barcelona se adoptan las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona de la Figura 5-16, las cuales se obtuvieron en el presente trabajo. Dicha elección se realizó al

considerar lo siguiente: 1) que tales curvas de peligrosidad se obtuvieron mediante el procedimiento directo, es decir, empleando parámetros de sismicidad de las fuentes en términos de intensidades macrosísmicas y utilizando leyes de atenuación de intensidades macrosísmicas determinadas para diferentes regiones de la Península Ibérica y; 2) que dichas curvas de peligrosidad tienen similitudes importantes con las estimadas por Secanell et al (2004). Específicamente, las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas en el presente trabajo (Figura 5-16), corresponden a valores ligeramente por debajo de los valores de peligrosidad sísmica obtenidos por Secanell et al (2004) (Figura 5-41).

La curva de peligrosidad sísmica obtenida en el presente trabajo (Figura 5-16) y las obtenidas por Secanell et al (2004) (Figura 5-41), tienen diferencias a pesar de que en ambos casos se emplearon las mismas fuentes sísmicas con los mismos parámetros de sismicidad de las fuentes. Dichas diferencias se deben a diversas razones, por ejemplo, al hecho que los procedimientos empleados para obtener las curvas de peligrosidad sísmica no fueron los mismos, y a que se consideraron también datos diferentes, entre ellos, las leyes de atenuación sísmica.

Además de emplear la curva de la Figura 5-16 para estimar riesgo sísmico de edificios, se harán también algunas estimaciones del riesgo sísmico de Barcelona considerando principalmente, la curva media estimada por Secanell et al (2004). Esto último se debe: 1) a que dicha curva media de peligrosidad indica las tasas de excedencia que le corresponden a las intensidades macrosísmicas que van desde el grado V hasta el grado VIII, a diferencias de las curvas medias menos una desviación estándar y más una desviación estándar, las cuales únicamente indican tasas de excedencia para intensidades entre 6 y 7.5, y entre 7 y 8, respectivamente; 2) a que dicha curva ha sido utilizada como referencia básica de la aplicación a Barcelona, de las metodologías de Risk-UE; y 3) a que tal curva de peligrosidad ha sido estimadas por un grupo de investigadores que han realizado importante número de trabajos sobre la peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004).

Es importante señalar, que en el capítulo 3 se emplearon las curvas de Secanell et al (2004) indicadas en la Figura 5-41, pero modificadas. Las curvas modificadas se indican en la Figura 3-4 y las mismas se obtuvieron al completar la curva media menos una desviación estándar y la curva media más una desviación estándar estimadas por Secanell, para que las mismas incluyesen tasas de excedencia para mayor número de intensidades. La modificación consistió en completar la curva media menos sigma y la curva media más sigma (Secanell et al, 2004), para que la mismas iniciasen en un punto que tuviese la misma tasa de excedencia que el punto en el que inicia la curva media de peligrosidad estimada por Secanell et al (2004). Esta consideración es necesaria porque Secanell et al (2004) muestran las curvas medias más una desviación estándar y menos una desviación estándar, para un intervalo de intensidades mucho menor que el estimado para la curva media de peligrosidad sísmica. Por lo tanto, el objetivo de la

modificación fue disponer de curvas de peligrosidad que facilitasen la comparación de los resultados de riesgo sísmico. Para tal fin se consideró que las intensidades cuya desviación estándar no está disponible, tendrán aproximadamente la misma desviación estándar, que la intensidad que inicia la curva original estimada por Secanell et al (2004), que corresponde a la intensidad que tiene un periodo de retorno de 500 años. Para la curva media menos sigma y la curva media más sigma la desviación estándar considerada para completar dichas curvas es igual a 0.31 en unidades de intensidad (Secanell et al, 2004). Es importante insistir en que tal consideración tiene únicamente el propósito de disponer de curvas completas comparables, que contribuyan a mostrar la aplicación del método LM1_P. Por lo tanto, los resultados que sí pueden considerarse estrictamente válidos son los que se obtienen de la curva media de la peligrosidad sísmica estimada por Secanell et al (2004), o los que se obtienen al considerar directamente las curvas de peligrosidad sísmica estimadas por Secanell et al (2004), y que se indican en la Figura 5-41. Sin embargo, si se emplean las curvas estimadas por Secanell et al (2004) indicadas en la Figura 5-41, se debe tener presente que en el caso de las curvas medias más y menos una desviación estándar se estará omitiendo un segmento de las curvas de peligrosidad sísmica, que sí está presente en la curva media de peligrosidad, y que puede tener una influencia importante en el riesgo sísmico de la ciudad de Barcelona.

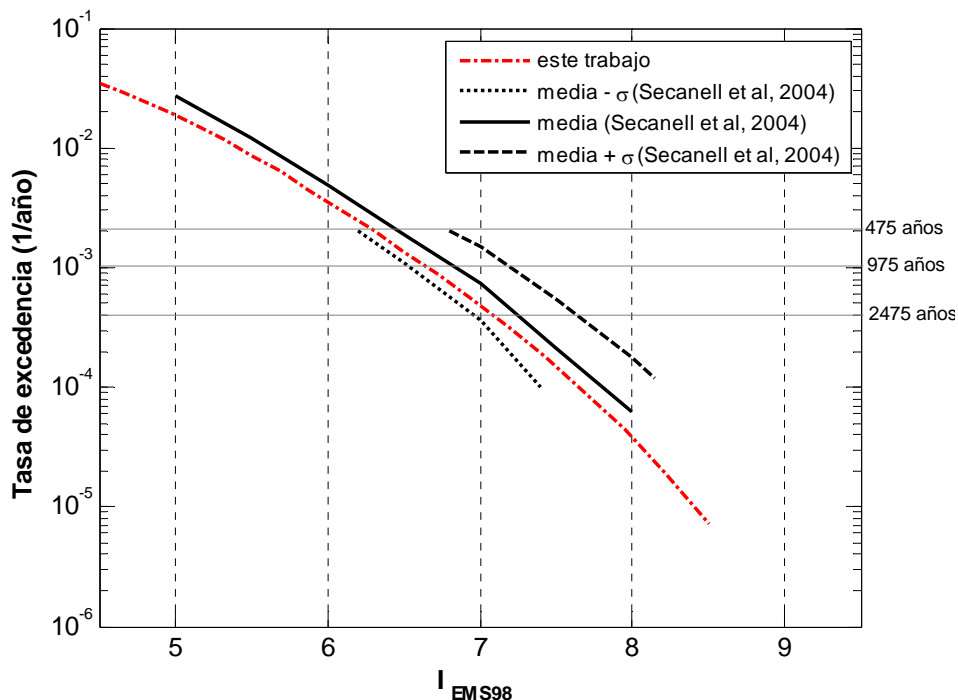


Figura 5-41. Comparación de la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenida en el presente trabajo y las obtenidas por Secanell et al (2004).

5.8.5 Efectos de sitio

Tal como se mencionó anteriormente, los efectos de sitio se consideran mediante el incremento en medio grado de la intensidad sísmica en las zonas de suelo blando (Zonas I, II, III, A), con respecto a la intensidad sísmica en la zona de Roca. La validez de dicho criterio se confirma al observar la Tabla 5-30. En dicha tabla se muestran los valores de PGA y de intensidades macrosísmicas que se obtienen para las zonas sísmicas I, II y III de Barcelona, a partir de un valor de PGA en roca de 85 cm/s^2 , y al considerar los factores de amplificación propuestos por Irizarry (2004) (Tabla 5-7), y las relaciones de PGA-intensidad de Marin et al (2004) y de Sorensen et al (2008) (Figura 5-33). En la Figura 5-42 se observan las curvas de peligrosidad sísmica para las zonas I, II y III de Barcelona.

Tabla 5-30. Ejemplo de los valores de amplificación de PGA y de la intensidad macrosísmica para las diferentes zonas sísmicas de Barcelona, al considerar los factores de amplificación de Irizarry (2004), y las relaciones PGA-Intensidad macrosísmica de Marin et al (2004) y de Sorensen et al (2008).

Zona sísmica	PGA (cm/s^2)	Intensidad Macrosísmica (relación Marin et al, 2004)	Diferencia de la intensidad macrosísmica con respecto a la Zona R	Intensidad Macrosísmica (relación Sorensen et al, 2008)	Diferencia de la intensidad macrosísmica con respecto a la Zona R
R	85	7.6	-	6.4	-
I	160	8.2	0.6	6.9	0.5
II	165	8.2	0.6	6.9	0.5
III	144	8.1	0.5	6.8	0.4

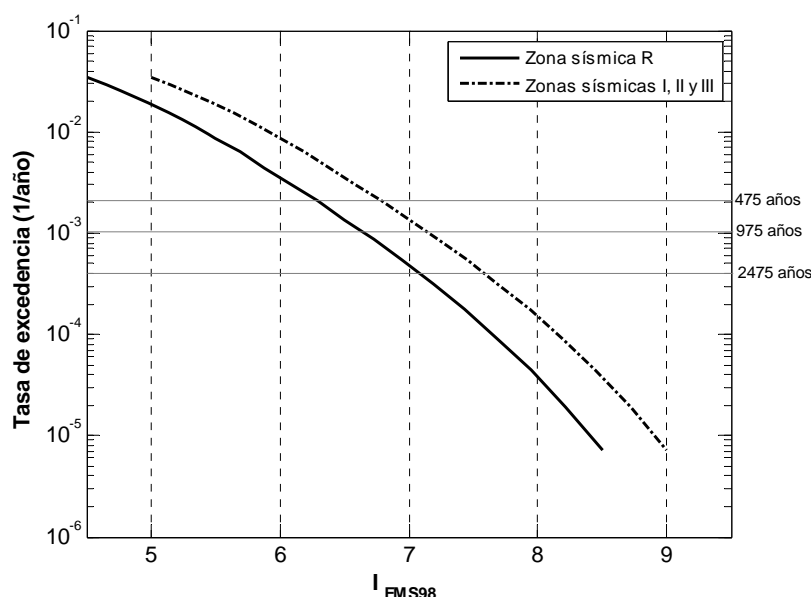


Figura 5-42. Curva probabilista de peligrosidad sísmica de Barcelona adoptada para el presente trabajo para la zona sísmica R (línea continua), y curva que representa la peligrosidad sísmica de las zonas I, II y III (línea punteada), obtenida al considerar que la intensidad que se producirá en éstas últimas tres zonas será medio grado mayor que la que se producirá en la zona sísmica R.

5.9 Otros aspectos del peligro sísmico de Barcelona

Para estimar la medida en que cada fuente sísmica contribuye a la peligrosidad sísmica de Barcelona es posible realizar la desagregación de dicha peligrosidad. Al hacerlo, se pueden generar gráficos como el de la Figura 5-43 (a), en el que se muestra la contribución de cada fuente sísmica, al valor total de la frecuencia de excedencia de una aceleración máxima del terreno de 5 cm/s^2 , en el sitio de referencia de Barcelona (Longitud 2.195 grados, Latitud 41.42 grados) para el caso 3. En dicha figura, se puede observar que prácticamente las 10 fuentes sísmicas contribuyen en alguna medida con el valor final de la frecuencia de excedencia del PGA igual a 5 cm/s^2 . Sin embargo, al pasar a un valor de PGA de 20 cm/s^2 , disminuye en forma significativa el número de fuentes que influyen en el valor final de la frecuencia de excedencia, asociada a dicho valor de PGA. Esto último puede observarse en la Figura 5-43 (b), en la que se aprecia que para un valor de PGA de 20 cm/s^2 , prácticamente, sólo 3 fuentes sísmicas aportan algún porcentaje importante a la frecuencia de excedencia. Siendo la fuente 2 la que aporta un porcentaje significativamente mayor que el resto de las fuentes sísmicas, al valor final de la frecuencia de excedencia del valor de PGA de 20 cm/s^2 . Conclusión similar fue obtenida por Irizarry (2004).

Adicionalmente, a partir de los resultados de desagregación generados por el CRISIS2008 para el caso 3, es posible identificar que sismos que se producen a una distancia mayor de 444 km, ya no contribuyen a la frecuencia de excedencia del PGA igual a 5 cm/s^2 . De manera similar los sismos que se producen a una distancia mayor a 167 km, ya no contribuyen a la frecuencia de excedencia del PGA igual a 20 cm/s^2 . Por lo tanto, es posible afirmar que el origen más probable de un sismo que pueda generar valores de PGA mayores o iguales a 20 cm/s^2 , en zona de roca en Barcelona, es la región delimitada por la fuente sísmica No. 2.

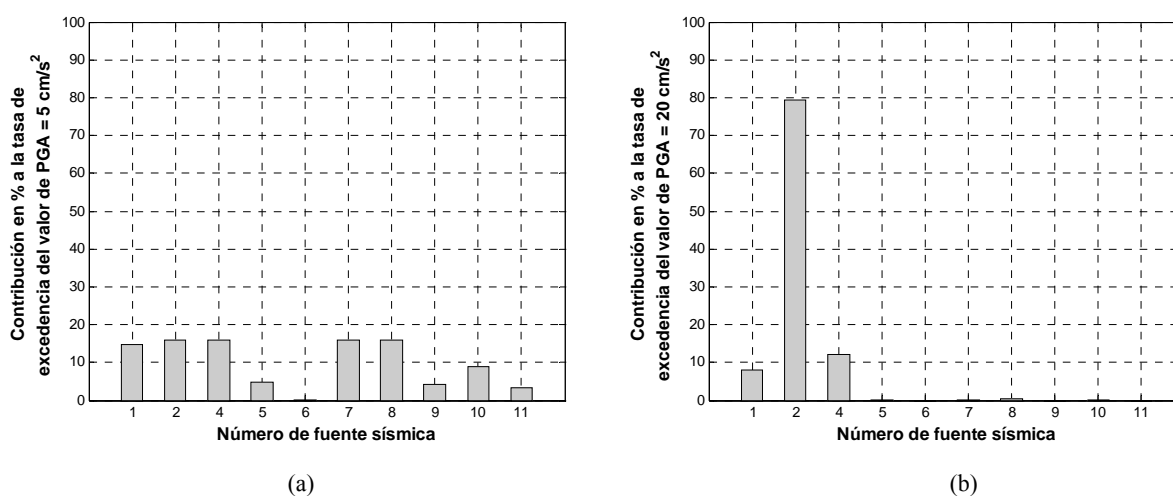


Figura 5-43. Porcentaje de contribución de cada una de las 11 fuentes sísmicas, a la tasa de excedencia de valores de PGA en roca, iguales a 5 cm/s^2 (a), y a 20 cm/s^2 (b), en el sitio de referencia de Barcelona (Longitud 2.195 grados, latitud 41.42 grados).

Por otra parte, el conocimiento de las regiones que contribuyen en mayor medida a la peligrosidad sísmica de una región, permiten evaluar la posibilidad de establecer sistemas de alerta sísmica. Dichos sistemas tienen la finalidad de identificar cerca del origen del sismo el tamaño del mismo para que cuando la magnitud de dicho sismo sea importante, se avise en forma automática a las regiones alejadas del origen del sismo que son susceptibles de sufrir daños debido a la llegada de las ondas sísmicas del sismo identificado (Espinosa-Aranda et al, 2011; Brown et al, 2011; Allen et al, 2009; Suárez et al, 2009; Kamigaichi et al, 2009; Kanamori, 2007; Lee y Espinosa-Aranda, 2003). Uno de los objetivos del aviso es que las personas realicen acciones que contribuyan a que puedan soportar mejor los posibles efectos del movimiento sísmico del terreno. Una de dichas acciones es la evacuación de los edificios.

Este tipo de alerta sísmica se ha establecido para avisar a la ciudad de México de la ocurrencia de un sismo en las costas de Guerrero, que por su tamaño pueda generar un movimiento sísmico importante en la ciudad de México. En este caso el sistema de alerta es posible porque las estaciones sensoras detectan los sismos en las costas de Guerrero y desde esa región a la ciudad de México hay más de 300 km, distancia que las ondas sísmicas potencialmente destructivas recorren aproximadamente en 70 segundos (Lee y Espinosa-Aranda, 2003). De manera que este sistema únicamente alerta de los sismos generados en la región de Guerrero, por lo que se generan en la ciudad de México movimientos sísmicos que no tienen aviso previo de algún sistema de alerta sísmica.

En función de los resultados del presente estudio de peligrosidad sísmica es posible señalar, que dado que la región que contribuye en mayor medida a la peligrosidad sísmica de Barcelona corresponde a la fuente sísmica 2, es difícil establecer un sistema de alerta sísmica para Barcelona que incluya los sismos generados en dicha fuente sísmica. Esto último se debe a que al estar Barcelona comprendida en la propia fuente sísmica 2, se dispondría de muy poco tiempo para identificar el tamaño del sismo, para avisar de la llegada de las ondas sísmicas potencialmente destructivas, y para permitir a los habitantes de la ciudad que realicen acciones preventivas como la evacuación de edificios.

5.10 Resumen y conclusiones

En el presente capítulo se realizó un análisis exhaustivo de la peligrosidad sísmica de Barcelona basado en zonificaciones sísmicas y en estudios de atenuación realizados por otros. La principal aportación de este estudio ha consistido en la determinación de la influencia de los diferentes elementos que contribuyen a la peligrosidad sísmica de la ciudad. Específicamente, se evaluó la influencia de la relación $I_0 - M_s$, la influencia del parámetro de sismicidad β , y la de las leyes de atenuación sísmica. De entre estos tres elementos analizados, se concluye que el de mayor influencia en los resultados de peligrosidad sísmica fue el valor de la ley de atenuación sísmica.

A partir de los resultados de peligrosidad sísmica se adoptaron unas curvas de peligrosidad para ser usadas en la estimación probabilista del riesgo sísmico de edificios en Barcelona. Las curvas adoptadas establecen valores de peligrosidad compatibles con los que se han obtenido para Barcelona en estudios previos. Adicionalmente, se ha adoptado un criterio para considerar los efectos de amplificación causados por las condiciones locales del suelo en las zonas sísmicas de Barcelona.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN EL MÉTODO LM1_P

6.1 Introducción

Este capítulo se dedica al estudio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona. La vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la ciudad han sido estudiados desde los años 90 usando diferentes técnicas y métodos. Los primeros estudios (Mañà, 1997) se centraban en barrios específicos de la ciudad para los que se establecían matrices tipológicas sencillas en base a la escala de intensidad MSK. Esta escala se usaba también para cuantificar el nivel de daño esperado. Este primer estudio, realizado por arquitectos, ya detectaba un alto nivel de vulnerabilidad sísmica en los edificios de la ciudad, identificando características constructivas específicas que los hacían inseguros en caso de terremoto. Por estos mismos años Caicedo (1993) introduce el método italiano en el que el edificio se define mediante un índice de vulnerabilidad y la acción sísmica mediante la intensidad macrosísmica MSK, y el daño se estima usando funciones empíricas que relacionan un índice de daño con la intensidad. Yépez (1996) da continuidad a los estudios de Caicedo (1993) y desarrolla funciones de daño para edificios de mampostería y de hormigón armado. Las correspondientes a edificios de mampostería no reforzada para intensidad VII, se obtienen a partir de daños observados en dos terremotos ocurridos en Almería (sur de España), los días 23 de diciembre de 1993 y 4 de enero de 1994. Mientras que las funciones de daño correspondientes a otras intensidades macrosísmicas, se obtienen mediante programas de ordenador capaces de simular el comportamiento de estos edificios. Las curvas empíricas se usan para calibrar el modelo. Yépez (1996) también desarrolla curvas de daño para edificios de hormigón aunque usando sólo simulaciones. El primer estudio global de vulnerabilidad sísmica de Barcelona lo realiza Mena (2002). En este caso, usa el método tal como fue puesto a punto por Yépez (1996), quien realizó también aplicaciones concretas a sectores y barrios de interés particular de la ciudad. En el marco del proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) se desarrollan los dos métodos LM1 y LM2 que se han explicado oportunamente en el capítulo 1. Lantada (2007) aplica estos métodos avanzados a Barcelona yendo más allá en los análisis de riesgo, incluyendo aspectos socioeconómicos, de gestión de emergencias y de afectación a la población. Los resultados obtenidos en todos estos trabajos se resumen en valores concretos de daño que hay que interpretar como valores medios esperados para los escenarios

considerados. Es decir, en cierto modo son resultados deterministas ya que obvian importantes incertidumbres en cada paso que conlleva la evaluación del riesgo. Aquí es donde se produce una de las aportaciones significativas de este trabajo: la incorporación de elementos probabilistas. En el capítulo anterior se aplicaron criterios probabilistas en la evaluación de la peligrosidad sísmica de Barcelona; en este capítulo se aplica la propuesta metodológica LM1_P, que supone un avance respecto a todos los métodos y aplicaciones comentados más arriba, ya que incorpora las incertidumbres en la asignación de la vulnerabilidad de los edificios. Es conveniente y oportuno decir también que, en este trabajo, se usa una base de datos de los edificios de Barcelona actualizada al año 2008. Esta base de datos ha sido utilizada recientemente por Lantada et al (2009b) para actualizar los análisis de riesgo sísmico de la ciudad, por encargo del Ayuntamiento de Barcelona. Si bien hay que decir también que en dicho trabajo han usado la misma técnica LM1 que en Lantada (2007).

6.2 La ciudad de Barcelona

6.2.1 Fisiografía (geografía física)

La ciudad de Barcelona se asienta en una plataforma de ligera pendiente hacia el mar mediterráneo, y está delimitada al sudoeste por el río Llobregat, al nordeste por el río Besós, al sudeste por el mar mediterráneo y al noroeste por la sierra de Collserola (Figura 5-2). En esta sierra la cima más alta corresponde al denominado Tibidabo el cual tiene una altitud de 516.2 m. Adicionalmente, en diferentes partes de la ciudad hay algunas cimas pequeñas que son parques y otras que están urbanizadas. Siendo la más conocida la de Montjuïc (192 m de altitud), la cual se localiza justo encima de la línea de costa. Por otra parte, el río Llobregat tiene una longitud de 170 km, mientras que el río Besòs tiene una longitud de 41 km. Este último río tiene un caudal muy irregular a lo largo del año. Por otra parte, la línea de costa de Barcelona se ha modificado a través del tiempo, porque se ha ido ganando terreno al mar, ya sea por causas naturales o artificiales. De manera que por ejemplo, el barrio de Barceloneta se asienta en terrenos que no existían un siglo y medio antes de la construcción de dicho barrio.

6.2.2 Divisiones administrativas

Para fines administrativos Barcelona está actualmente dividida en 10 distritos municipales (Figura 6-1) y en 73 Barrios. Sin embargo, la división en 73 Barrios fue recientemente aprobada (Idescat, 2010), por lo que la mayor parte de la información disponible en el presente trabajo está referida a los 38 Barrios en que se dividía a la ciudad hasta el 2008 (Figura 6-2). Por otra parte, debido a que uno de los objetivos del presente trabajo es que los resultados sean fácilmente comparables con los estudios previos del riesgo sísmico de Barcelona, se ha optado por mantener para este trabajo la división de Barcelona en 38 Barrios.

En la Tabla 6-1 se muestra la superficie que le corresponde a cada distrito de Barcelona (Idescat, 2010), y en la Tabla 6-2 se listan cada uno de los 38 barrios de la ciudad (Idescat, 2007). Adicionalmente, el ayuntamiento de Barcelona ha definido para fines de estudio 248 zonas de menor tamaño que los barrios, las cuales ha denominado Zonas de Recerca Petites (ZRP), que en castellano se llamarían Zonas de Estudio Reducidas (Idescat, 2010; Lantada, 2007). El nombre de cada zona ZRP y su ubicación se indica en el Anexo B.



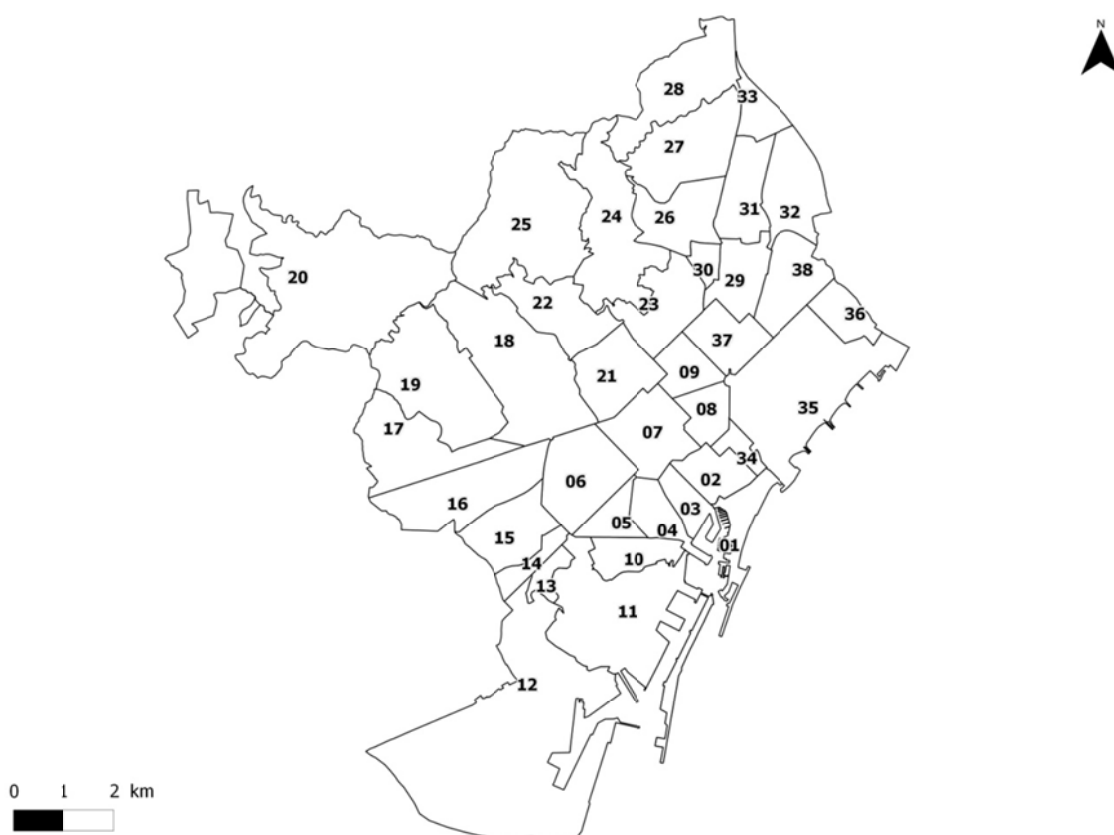
Figura 6-1. Localización de los 10 distritos municipales en los que actualmente está dividida la ciudad de Barcelona.

Tabla 6-1. Superficie por distrito en Barcelona en km² (Idescat, 2009).

Distrito	km ²
1. Ciutat Vella	4.37
2. Eixample	7.48
3. Sants-Montjuïc	22.94
4. Les Corts	6.02
5. Sarrià-Sant Gervasi	20.09
6. Gràcia	4.19
7. Horta-Guinardó	11.95
8. Nou Barris	8.04
9. Sant Andreu	6.57
10. Sant Martí	10.52

Tabla 6-2. Barrios por distrito de Barcelona (Idescat, 2007).

Distrito	Barrio	
Ciutat Vella	1	Barceloneta
	3	Gòtic
Eixample	5	Sant Antoni
	7	Dreta Eixample
	9	Sagrada Família
Sants-Montjuïc	10	Poble Sec
	12	Zona Franca-Port
	14	Bordeta-Hostafrancs
Les Corts	16	Les Corts
Sarrià-Sant Gervasi	18	Sant Gervasi
	20	Vallvidrera-Les Planes
Gràcia	21	Gràcia
Horta-Guinardó	23	Guinardó
	25	Vall d'Hebron
Nou Barris	26	Viliapicina-Turó de la Peira
	28	Ciutat Meridiana-Vallbona
Sant Andreu	29	Sagrera
	31	Sant Andreu
	33	Trinitat Vella
Sant Martí	34	Fort Pius
	36	Barris Besòs
	38	Verneda
	2	Parc
	4	Raval
	6	Esquerra Eixample
	8	Estació Nord
	11	Montjuïc
	13	Font de la Guatlla
	15	Sants
	17	Pedralbes
	19	Sarrià
	22	Vallcarca
	24	Horta
	27	Roquetes-Verdum
	30	Congrés
	32	Bon Pastor
	35	Poblenou
	37	Clot

**Figura 6-2. Localización de los 38 barrios de Barcelona listados en la Tabla 6-2.**

6.2.3 Población

De acuerdo con los datos del anuario estadístico de Barcelona en el año de 2009 la ciudad tenía 1621537 habitantes (Idescat, 2010). De manera que la población en el 2009 superaba en cerca de 43000 habitantes a los existentes en el año de 2004 (Idescat, 2005). Siendo la población del 2004 la que se consideró en el estudio de Lantada (2007). En la Tabla 6-3 se indica la distribución de población por distrito actualizada al año 2009 (Idescat, 2010), y en la Figura 6-3 se muestra la correspondiente densidad de población por barrio.

Tabla 6-3. Distribución de población por distrito de Barcelona (Idescat, 2010).

	Distrito	Habitantes	Habs./km ²
1	Ciutat Vella	107426	24583
2	Eixample	266874	35678
3	Sants-Montjuïc	182395	7951
4	Les Corts	82952	13779
5	Sarrià-Sant Gervasi	143911	7163
6	Gràcia	123383	29447
7	Horta-Guinardó	171186	14325
8	Nou Barris	168181	20918
9	Sant Andreu	146528	22303
10	Sant Martí	228701	21740

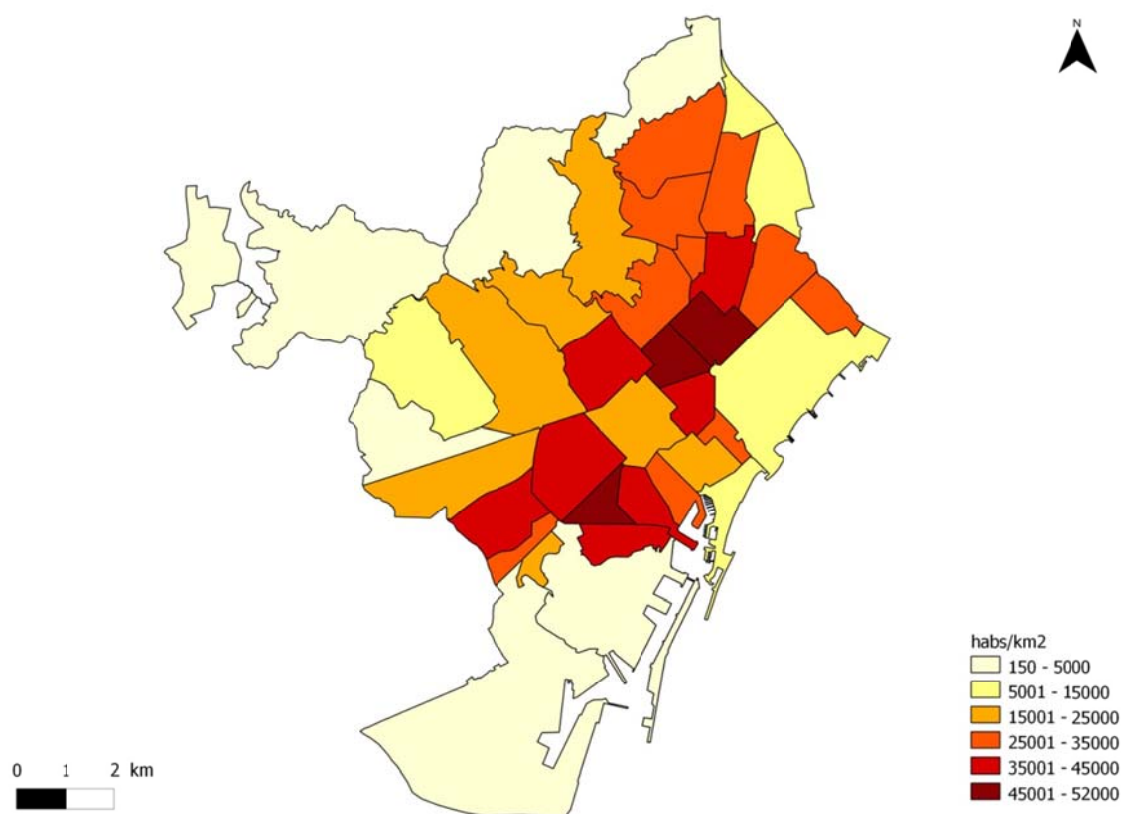


Figura 6-3. Distribución de la densidad de población por barrio de Barcelona.

De acuerdo con la información de la Tabla 6-3, el distrito del Eixample es el que tiene la mayor densidad de población en Barcelona con 35678 Habs./km². Además, en dicho distrito se localizan los dos barrios de Barcelona con la mayor densidad de población: Sagrada Família y Sant Antoni, con 51538 Habs./km² y 48579 Habs./km², respectivamente. Mientras que el tercer barrio más poblado es Clot con 46198 Habs./km². Si además se toma en cuenta que los barrios de Sagrada Família y Clot son barrios colindantes (Figura 6-2), entonces, es posible concluir que la región formada por estos dos barrios es una zona con una importante concentración de habitantes en la ciudad.

6.3 Base de datos de edificios

Como se ha avanzado en la introducción de este capítulo, este trabajo usa datos actualizados al año 2008. Durante los últimos 15 años ha sido posible preparar una sofisticada base de datos que cubre casi la totalidad del parque edificado de Barcelona, incluyendo, entre otra, información sobre la geometría, en planta y en altura, la antigüedad, la tipología constructiva, el tipo de uso y el estado de conservación de los edificios de la ciudad. El origen de esta base de datos se remonta a mediados de la década de los 80 del siglo pasado, cuando el Departamento de Estudios Fiscales del Instituto Municipal de Hacienda de Barcelona y la sociedad privada municipal Informació Cartogràfica y de Base, Sociedad Anónima (ICB S.A. Spm), realizan un ingente trabajo de campo destinado a establecer una valoración económica orientada a determinar el impuesto de bienes inmuebles. Se ha tenido acceso al documento de uso interno de los evaluadores de campo (ICB, 1986) en el que se describe cuidadosamente las instrucciones y códigos usados para esta evaluación. La base de datos resultante es mantenida por el Institut Municipal d'Informàtica (IMI) y fue cedida por medio de los Servicios de Protección Civil del Ayuntamiento de Barcelona. Mena (2002) es el primero que usa esta base de datos. Lantada (2007) mejora la base de datos y la usa para aplicar nuevas metodologías de análisis de riesgo. En el 2009 el Ayuntamiento de Barcelona encarga al Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la UPC, una revisión y actualización de diversos escenarios sísmicos en la ciudad proporcionando una base de datos actualizada al 2008. Lantada et al (2009b) obtienen una base de datos mejorada incluyendo la información de las bases de datos antigua y nueva. Hay que decir que en la nueva base de datos se pierde la información sobre la tipología constructiva de los edificios, por haber dejado de usarse en las valoraciones económicas de la Hacienda Municipal. Este campo para los nuevos edificios se ha supuesto que corresponde a hormigón armado dada la frecuencia de este tipo constructivo desde los años 90. Es esta base de datos mejorada, que conserva el formato de la usada por Lantada (2007), la que constituye la información para el análisis probabilista de la vulnerabilidad.

En este trabajo como en el trabajo de Lantada (2007), la base de datos de edificios de Barcelona se apoya en tres fuentes: el catastro, un fichero con información sobre la edad de los edificios y un fichero con información sobre las tipologías. La información facilitada el año 2009 por el Ayuntamiento actualiza al 2008 la información catastral y el fichero sobre las edades usado en anteriores estudios, mientras que la información sobre las tipologías ya no se incluye en las actualizaciones. Se han efectuado hipótesis basadas en la comparación del archivo de tipologías disponible y en la fecha de construcción de los edificios para recuperar, en la medida de lo posible, esta información que es crucial para la asignación de la vulnerabilidad. Se describen a continuación cada una de estas fuentes de información.

6.3.1 Base de datos del catastro

La principal base de datos empleada para estimar la vulnerabilidad sísmica y el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona, fue facilitada por el Instituto Municipal de Informática (IMI) del Ayuntamiento de Barcelona, gracias a las gestiones de los Servicio de Protección Civil del Ayuntamiento (Lantada et al, 2009b). Dicha base de datos contiene principalmente información sobre cada parcela catastral de Barcelona. Siendo la parcela la unidad básica en la que ha sido dividido el territorio de Barcelona. Específicamente, la base de datos contiene información de 78668 parcelas, de las cuales 71256 son parcelas construidas y representan el 90.6% del total de parcelas. En el presente trabajo se consideró como parcela construida a la que tiene al menos un nivel bajo rasante o un nivel sobre rasante. La Tabla 6-4 resume las principales características de las parcelas.

Tabla 6-4. Número de manzanas y de parcelas edificadas por distrito de Barcelona (Lantada et al, 2009b).

Distrito	Área total (Ha)	Área edificada (Ha)	Número de manzanas	Número de parcelas	Número de parcelas edificadas
1. Ciutat Vella	422	284 (67.3%)	545	5991	5755 (96.1%)
2. Eixample	748	444 (59.4%)	472	8942	8764 (98.0%)
3. Sants-Montjuïc	2186	1672 (76.5%)	610	8143	7527 (92.4%)
4. Les Corts	602	350 (58.1%)	261	3025	2634 (87.1%)
5. Sarrià-Sant Gervasi	2009	1015(50.5%)	695	9896	8250 (83.4%)
6. Gràcia	419	286 (68.3%)	453	7524	7088 (94.2%)
7. Horta-Guinardó	1195	579 (48.5%)	548	11155	9880 (88.6%)
8. Nou Barris	804	395 (49.1%)	514	8293	7033 (84.8%)
9. Sant Andreu	657	363 (55.3%)	498	7780	7198 (92.5%)
10. Sant Martí	1056	490 (46.4%)	729	7919	7127 (90.0%)
Total	10098	5878 (58.2%)	5325	78668	71256 (90.6%)

6.3.2 Antigüedad de los edificios

La información facilitada por el Instituto Municipal de Informática incluye una base de datos en formato Access que contiene el dato del año de construcción de los edificios de 69982 parcelas (Lantada et al, 2009b). Dicha información permitió generar la Figura 6-4 en la que es posible observar los principales periodos en los que se han construido edificios en Barcelona. Uno de dichos periodos es el cercano al año 1850 en el que se estima que el auge en la construcción estuvo asociado al derribo de las murallas de la ciudad (1858-1868) (Lantada, 2007). Otro periodo es el cercano a 1900 el cual se estima está relacionado con la celebración de la Exposición Universal de 1888 y la anexión a Barcelona de los términos municipales de Sants, Sant Martí de Provençals, Gràcia, Les Corts y Sant Gervasi (Lantada, 2007). Sin embargo, se considera que la actividad constructiva más importante se realizó en el periodo comprendido entre los años 1940 y 1980 (Lantada, 2007) (Figura 6-5).

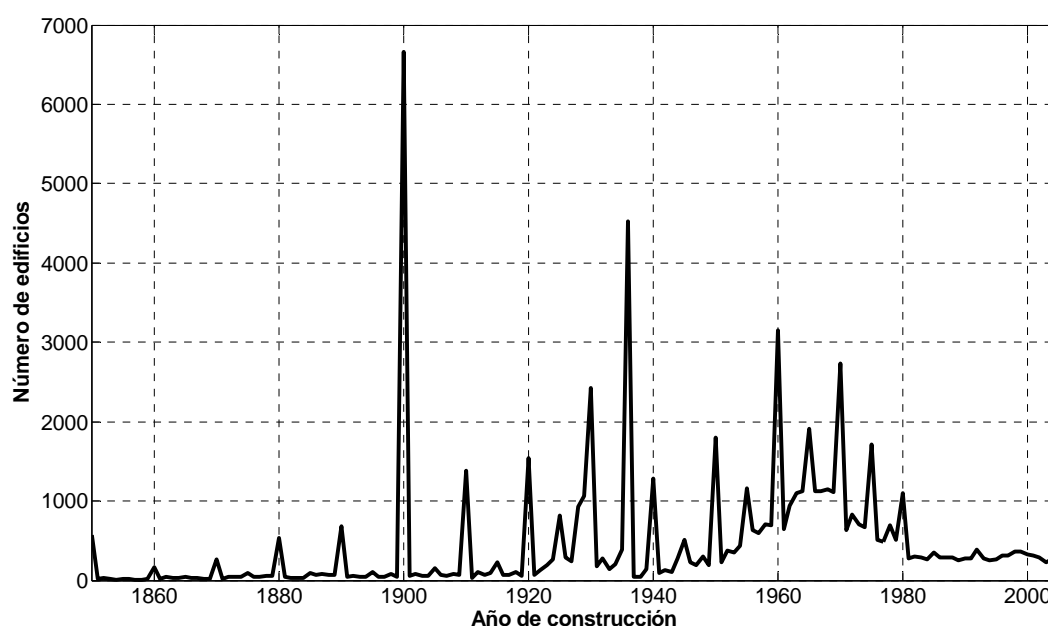


Figura 6-4. Número de edificios construidos en Barcelona en el periodo 1850-2005.

A partir de la información del año de construcción de los edificios, es posible identificar que los edificios de Ciutat Vella se construyeron en promedio en el año de 1900 (Figura 6-6), lo cual convierte a este distrito en el más antiguo de la ciudad. Mientras que los edificios del distrito de Nou Barris se construyeron en promedio en el año de 1960, y por tal motivo, dicho distrito es el de menor antigüedad de la ciudad. Lo anterior significa también que los edificios de Ciutat Vella y Nou Barris, tienen una antigüedad media de 110 y 50 años, respectivamente.

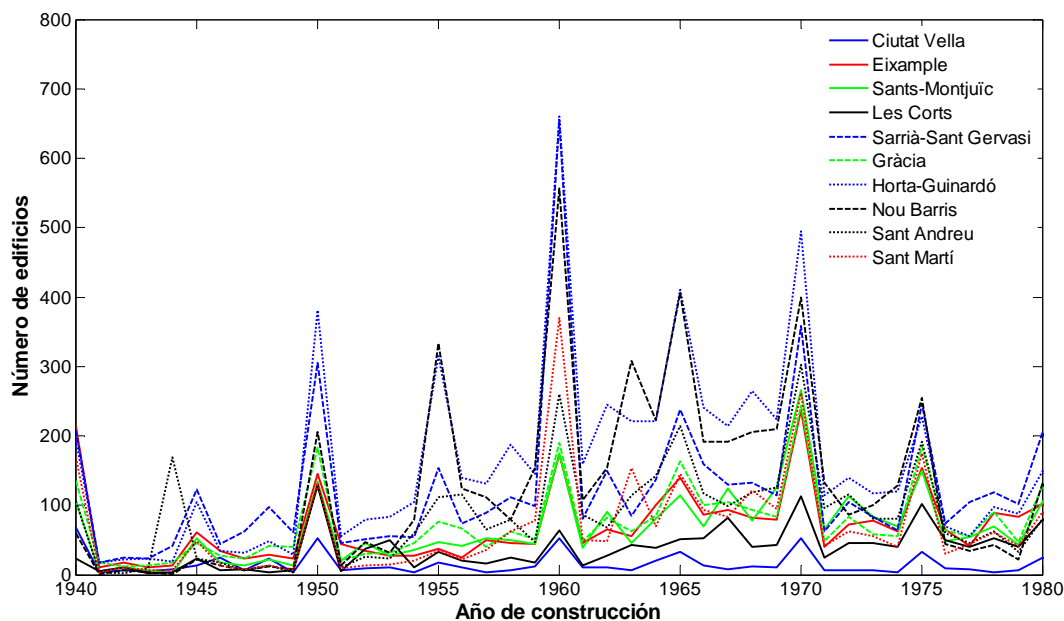


Figura 6-5. Número de edificios construidos por distrito en Barcelona en el periodo 1940-1980.

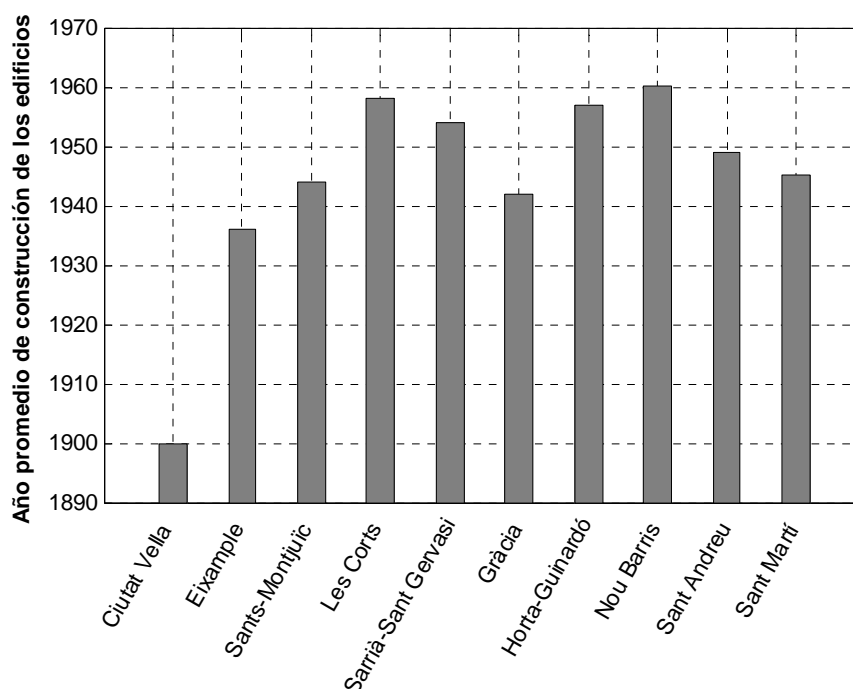


Figura 6-6. Año promedio de construcción de los edificios de cada distrito de Barcelona.

Por otra parte, en la Figura 6-7 se muestra un mapa de la antigüedad de los edificios por barrio en Barcelona. En dicha figura se puede observar que son pocos los barrios en los que la edad media de sus edificios está entre 40 y 50 años. Además, es posible observar el patrón radial de evolución histórica de la

ciudad que crece desde un núcleo histórico (Ciutat Vella), hasta incorporar los pequeños núcleos de población existentes en el llano de Barcelona y en las faldas de la sierra de Collserola.

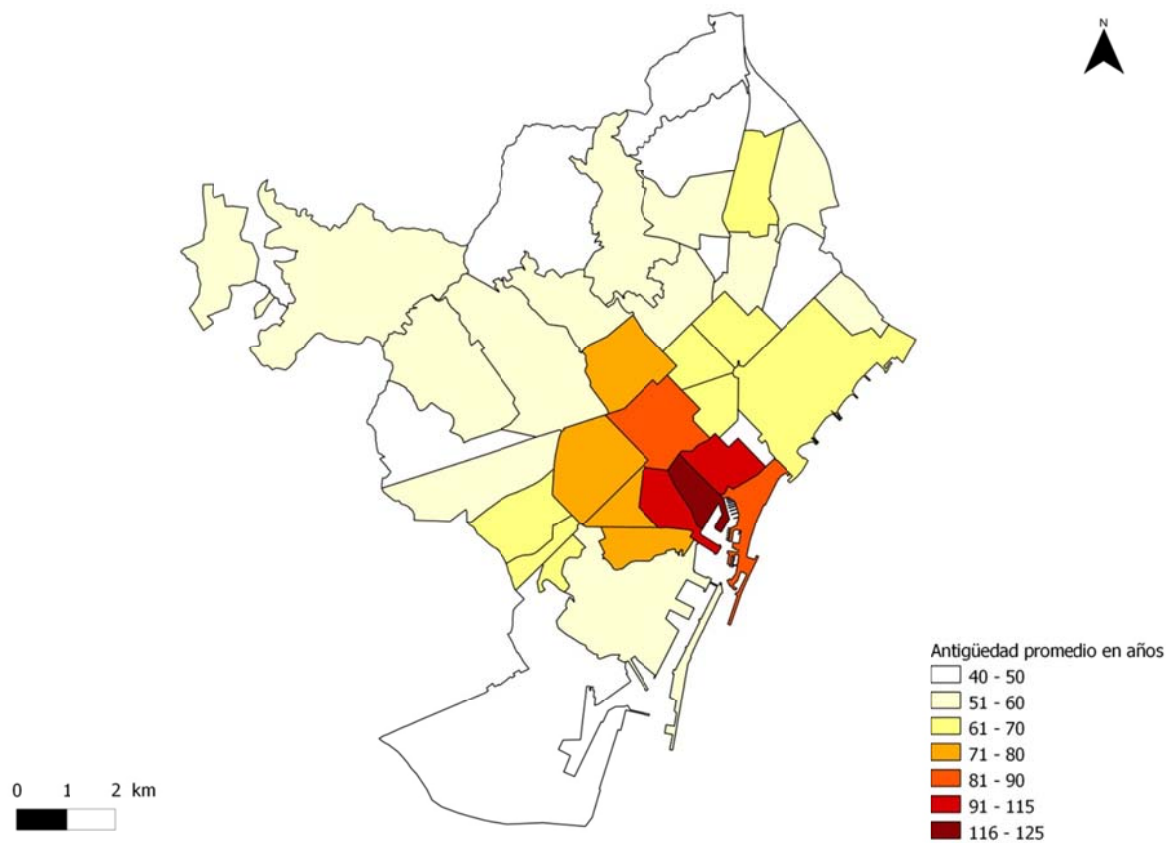


Figura 6-7. Antigüedad promedio de los edificios de cada barrio de Barcelona.

6.3.3 Tipologías constructivas

En la primera base de datos facilitada por el IMI del Ayuntamiento de Barcelona, se incluía la información de la tipología constructiva de 70137 edificios, lo cual representa el 98.4% de las parcelas construidas. La definición de la tipología constructiva se establece principalmente mediante dos datos de cada edificio: 1) los principales elementos estructurales y 2) el tipo de forjados. A partir de estos datos y del conocimiento del tipo de edificios que existen en Barcelona, Lantada (2007) y Lantada et al (2009b), propusieron representar a la mayoría de los edificios mediante las 8 tipologías listadas en la Tabla 3-2. En la Tabla 6-5 (Lantada, 2007) se indica la correspondencia entre las tipologías empleadas por el Ayuntamiento de Barcelona para identificar edificios, con las tipologías de Risk-UE descritas en la Tabla 3-2 (Lungu et al, 2001; Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

A partir de la equivalencia de la Tabla 6-5 y de la base de datos de Barcelona, es posible obtener la Tabla 6-6, en la que se muestra el número de edificios por tipología estructural identificado en cada distrito de la

ciudad. Adicionalmente, en la Figura 6-8 se muestra la distribución por tipología estructural de los edificios estudiados. De acuerdo con dicha información el 69.8% de los edificios corresponde a edificios de mampostería no reforzada, el 26.2% a edificios de hormigón armado, el 3.7% a edificios de estructuras metálicas y el 0.3% a edificios de madera.

Tabla 6-5. Equivalencia entre las tipologías del Ayuntamiento de Barcelona y las de Risk-UE (Lantada, 2007).

Tipología del Ayuntamiento de Barcelona*	Tipología de Risk-UE
MNRU OF	M31
MNRR MNCR MNSL	M32
MNRE OM	M33
MNRO MNFO MNFR	M34
FO	RC32
FERE FERR	S3
FH FERO FEFO	S5
FMRE FMRU FMRR	W

*En el anexo D se incluye la descripción de las tipologías del Ayuntamiento de Barcelona.

Tabla 6-6. Distribución de tipologías estructurales por distrito de los edificios de Barcelona.

Distrito	No. Edif.	Tipologías							
		M31	M32	M33	M34	RC32	S3	S5	W
Ciutat Vella	5675	4069	112	690	151	459	101	47	46
Eixample	8723	1624	57	3990	384	2309	182	155	22
Sants-Montjuïc	7410	2288	44	1974	816	1874	166	243	5
Les Corts	2587	428	29	539	352	1155	49	33	2
Sarrià-Sant Gervasi	8152	1426	206	1923	1773	2539	124	140	21
Gràcia	6976	2049	32	2023	1003	1635	80	113	41
Horta-Guinardó	9762	1321	216	2324	3354	2289	48	195	15
Nou Barris	6912	1025	75	1613	2169	1761	51	194	24
Sant Andreu	7000	1728	157	981	2002	1890	101	133	8
Sant Martí	6785	2240	12	1270	353	2443	201	234	32
Total	69982	18198	940	17327	12357	18354	1103	1487	216

Adicionalmente, en la Figura 6-9 se muestra la evolución en la construcción de los dos principales grupos de tipologías estructurales: los de mampostería no reforzada y los de hormigón armado. En dicha figura es posible observar que a partir del año de 1960 se realizó un aumento importante en el número de edificios

de hormigón armado construidos en la ciudad, aunque el número de edificios construidos de ese material no superaba a los que se construían de mampostería. Sin embargo, en el año de 1970 el número de edificios de hormigón armado que se construyeron fue prácticamente el mismo que los edificios de mampostería construidos. Desde el año de 1972 a la fecha, el número de edificios de hormigón armado que se construyen anualmente, supera al número de los que se construyen de mampostería. A partir del año 1995 se ha hecho la hipótesis de que todos los edificios de nueva construcción son de hormigón armado.

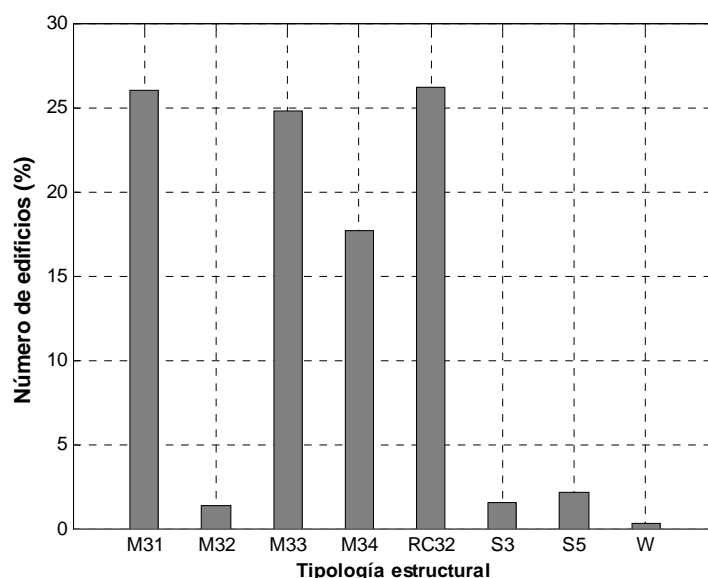


Figura 6-8. Distribución en porcentaje de las tipologías estructurales de los 69982 edificios de Barcelona.

Por otra parte, en la Figura 6-10 y en la Figura 6-11, se muestran la proporción de los principales grupos de tipologías estructurales que existen en cada distrito y en cada barrio de Barcelona, respectivamente. Por ejemplo, de acuerdo con la Figura 6-10 el distrito que tiene la mayor proporción de edificios de mampostería es el de Ciutat Vella con aproximadamente el 89% de sus edificios. Mientras que el distrito que tiene la menor proporción de edificios de mampostería es el de Les Corts con aproximadamente el 52% de sus edificios. En este mismo distrito el porcentaje de edificios de hormigón es de aproximadamente 45%. Por otra parte, de acuerdo con la Figura 6-11 los barrios que tienen la mayor proporción de edificios de mampostería son el Gòtic y Ciutat Meridiana-Vallbona con cerca del 92% de sus edificios. Mientras que el barrio de Vermeda es el que tiene la mayor proporción de edificios de hormigón armado, con aproximadamente el 68% de sus edificios.

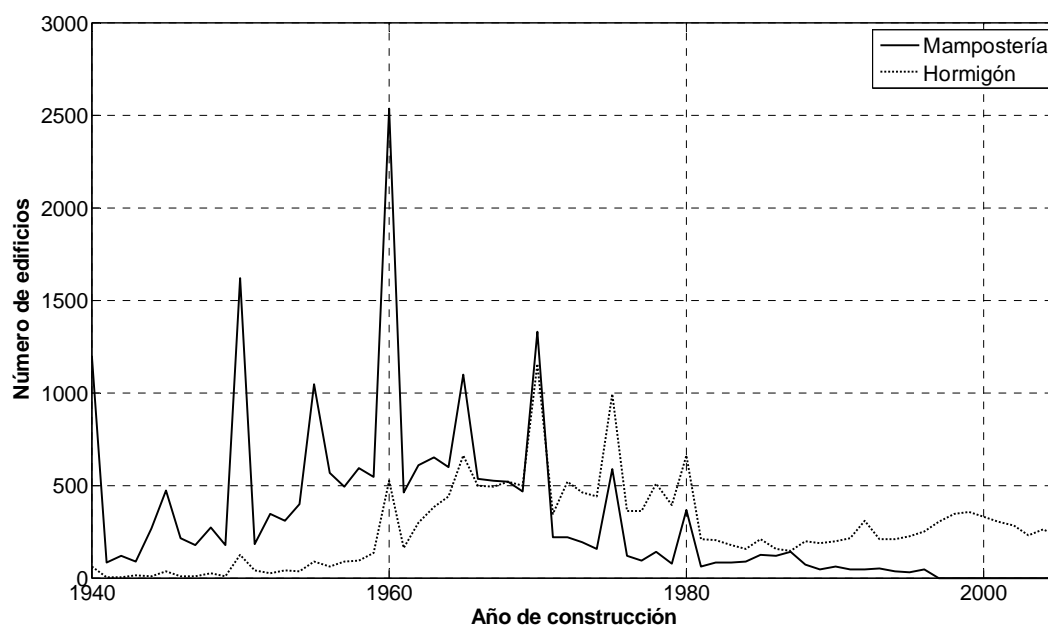


Figura 6-9. Número de edificios construidos por tipología estructural (mampostería no reforzada y hormigón armado) en Barcelona en el periodo 1940-2005.

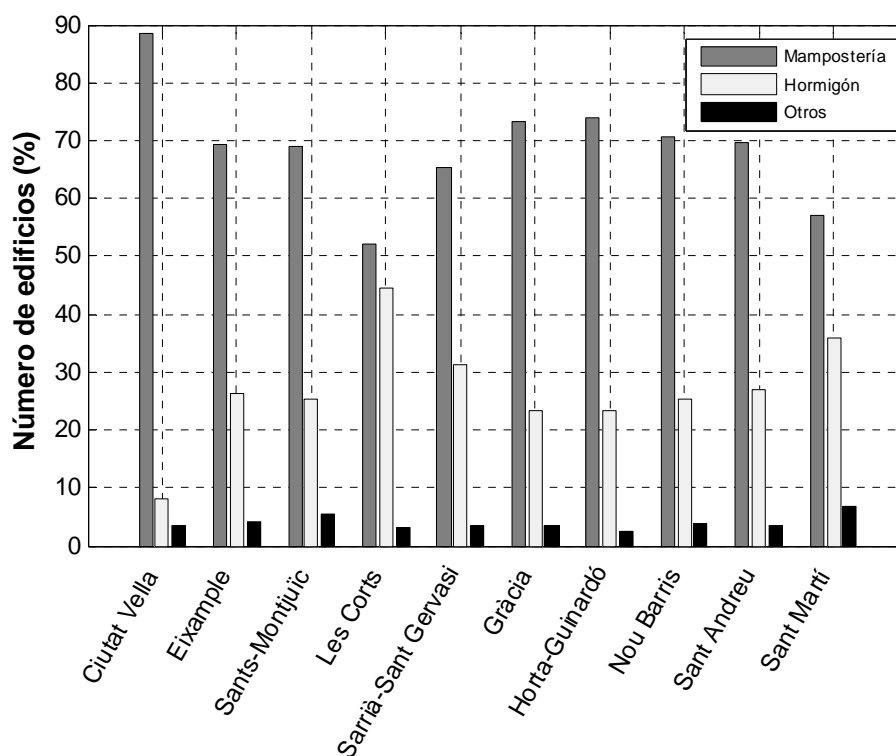


Figura 6-10. Proporción de las tipologías estructurales por distrito al considerar los 69982 edificios de Barcelona.

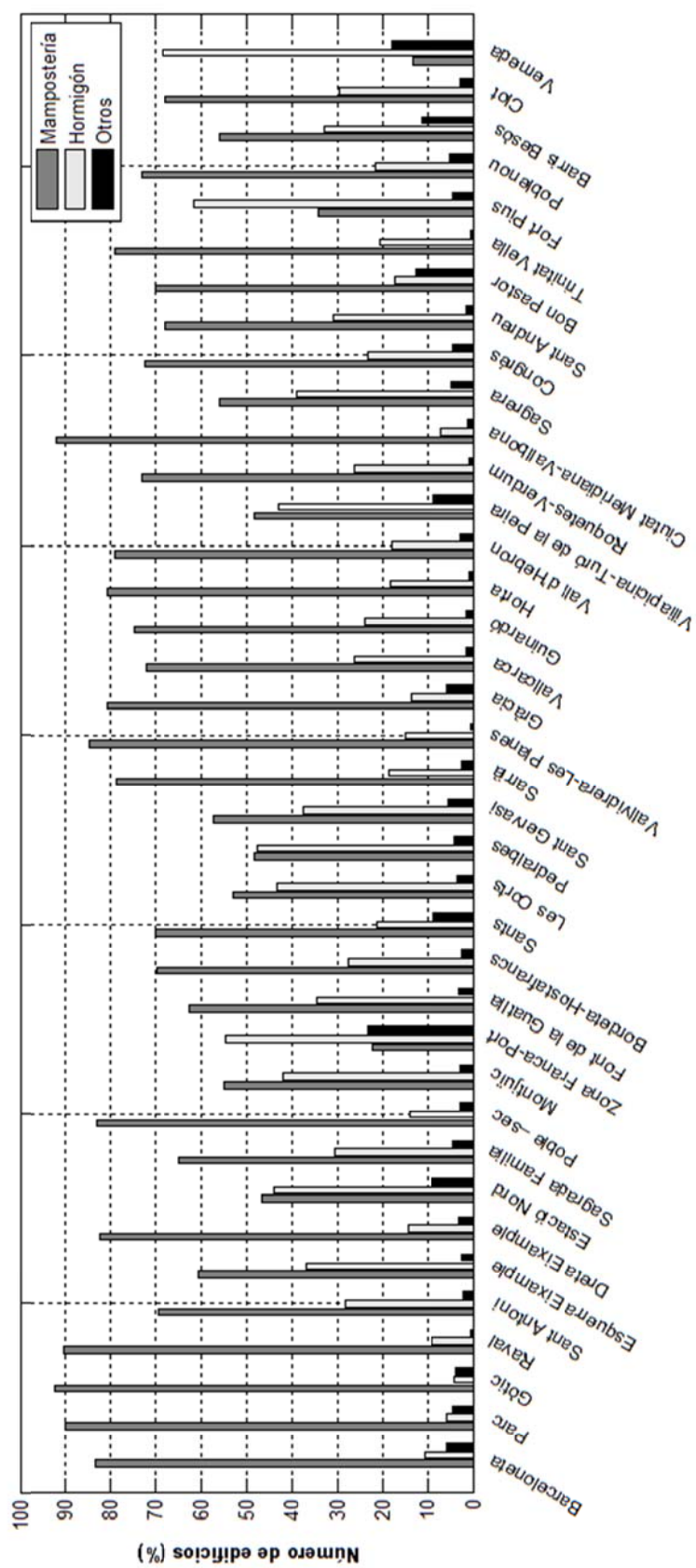


Figura 6-11. Proporción de las tipologías estructurales por barrio al considerar los 69982 edificios de Barcelona.

6.3.4 Estado de conservación

La base de datos de los edificios de Barcelona empleada en el presente trabajo, también incluye el dato del estado de conservación de los edificios. Los niveles de conservación empleados en la base de datos se indican en la Tabla 6-7. De acuerdo con dicha información, de los 69982 edificios, el 92.27% tienen un estado de conservación normal, mientras que el 7.56% de los edificios tienen un estado de conservación regular, y menos del 0.2% de los edificios tienen un estado de conservación entre deficiente y ruinoso.

Tabla 6-7. Clasificación empleada por el Ayuntamiento de Barcelona para indicar el nivel de conservación de los edificios.

Código	Descripción
N	Normal
R	Regular
D	Deficiente
O	Ruinoso

6.4 Plataforma GIS

6.4.1 Segregación de edificios especiales

En el presente trabajo los edificios estudiados son edificios con las tipologías indicadas en la Tabla 3-2 y además edificios cuyo principal uso es el residencial. Por lo tanto, fue necesario separar a los edificios especiales que no tenían uso residencial siendo estos los edificios de uso industrial, los edificios de uso comercial, los de uso deportivo, los de uso para oficinas, los de uso cultural y religioso y los de uso para espectáculos. Para identificar los edificios especiales se emplea principalmente la información del uso del edificio incluida en la base de datos. En el presente trabajo se consideró la selección de los edificios especiales que fue realizada por Lantada (2007) y por Lantada et al (2009b). Por lo tanto, en el presente trabajo, se excluyeron del estudio de vulnerabilidad los mismos edificios especiales que fueron identificados por Lantada et al (2009b).

6.4.2 La información catastral

La Figura 6-12 muestra un ejemplo de la información catastral disponible. En este caso la figura corresponde a una manzana de Barcelona identificada mediante el código 41300. En dicha figura se delimitan también las parcelas de la manzana, las cuales se identifican mediante un número compuesto formado por el número de la manzana y el número de la parcela. En este ejemplo la manzana tiene 10 parcelas y por ello los códigos de las parcelas van desde el 41300-001 hasta el 41300- 010. En la Figura 6-13 se muestra una imagen digital de la manzana del ejemplo.

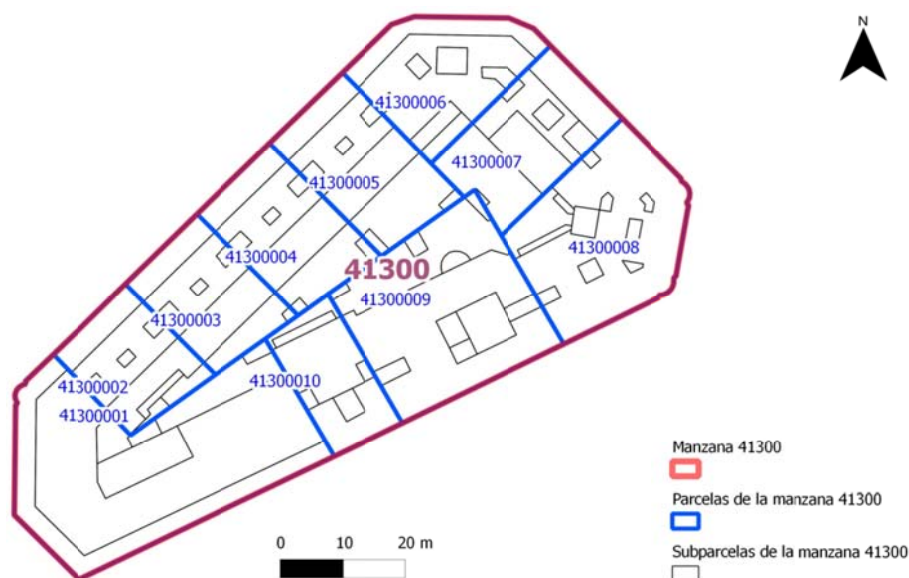


Figura 6-12. Ejemplo de una manzana con los datos catastrales facilitados por el Ayuntamiento de Barcelona.

Adicionalmente, la información catastral incluye una descripción del contenido de cada parcela. Para dicho fin las parcelas se dividen en subparcelas, por ejemplo, en la Figura 6-14 se muestra la parcela 4 de la manzana 41300 y las subparcelas que contiene. Los letreros de cada subparcela indican información sobre la misma. Por ejemplo, los datos de la Figura 6-14 indican que en la parcela existe un edificio que tiene un número máximo de niveles igual a 7 (VII), que la cubierta del edificio es tipo terraza catalana (Te) y que hay dos zonas de patio (P). En el anexo D se incluye la totalidad de los códigos empleados por el Ayuntamiento de Barcelona para indicar características de las parcelas. La información catastral descrita permitió identificar las principales características geométricas de cada edificio estudiado en el presente trabajo.



Figura 6-13. Imagen digital de la manzana 41300 (ICC, 2010) representada mediante la Figura 6-12 en la base de datos del IMI (2009).

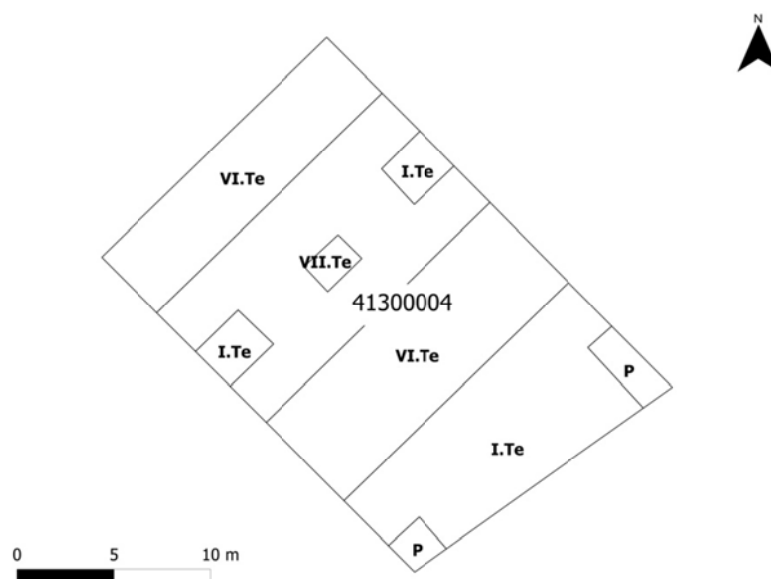


Figura 6-14. Detalle de la información catastral de la parcela 4 de la manzana 41300 (Figura 6-12).

6.4.3 Altura de los edificios

A partir del dato del número de niveles por edificio se estimó el número medio de niveles de los edificios de cada distrito de Barcelona y su correspondiente desviación estándar (Tabla 6-8). De acuerdo con dichos resultados, el distrito con el mayor número medio de niveles es el del Eixample, con 7.16 niveles (Tabla 6-8), y el distrito con el menor número medio de niveles el de Horta-Guinardó con 3.82 niveles (Figura 6-15).

Tabla 6-8. Número medio de niveles de los edificios de cada distrito de Barcelona y su correspondiente desviación estándar.

Distrito	Número medio de niveles de los edificios	Desviación estándar (niveles)
1. Ciutat Vella	5.85	1.56
2. Eixample	7.16	2.38
3. Sants-Montjuïc	4.85	2.63
4. Les Corts	5.66	3.58
5. Sarrià-Sant Gervasi	4.76	2.81
6. Gràcia	4.69	2.48
7. Horta-Guinardó	3.82	2.36
8. Nou Barris	4.03	2.65
9. Sant Andreu	3.86	2.74
10. Sant Martí	4.93	3.45

Por otra parte, en la Tabla 6-9 se muestra el número medio de niveles de cada barrio de Barcelona y su correspondiente desviación estándar. De acuerdo con dicha información el barrio con el mayor número medio de niveles es el de Esquerra Eixample, con 7.57 niveles, y el barrio con el menor número medio de niveles es el de Vallvidrera-Les Planes con 1.82 niveles (Figura 6-16).

Tabla 6-9. Número medio y desviación estándar de los niveles de los edificios de cada barrio de Barcelona.

Distrito		Barrio	Número medio de niveles de los edificios	Desviación estándar (niveles)
1 Ciutat Vella	01	Barceloneta	5.38	1.76
	02	Parc	5.90	1.37
	03	Gòtic	5.96	1.24
	04	Raval	5.94	1.51
2 Eixample	05	Sant Antoni	7.40	2.17
	06	Esquerra Eixample	7.57	2.14
	07	Dreta Eixample	7.18	1.99
	08	Estació Nord	7.43	2.50
	09	Sagrada Família	6.12	3.01
3 Sants-Montjuïc	10	Poble –sec	5.70	2.18
	11	Montjuïc	3.07	2.31
	12	Zona Franca-Port	3.69	2.21
	13	Font de la Guatlla	4.81	2.95
	14	Bordeta-Hostafrancs	5.37	2.86
	15	Sants	4.78	2.42
4 Les Corts	16	Les Corts	5.92	3.59
	17	Pedralbes	4.85	3.42
5 Sarrià-Sant Gervasi	18	Sant Gervasi	5.95	2.67
	19	Sarrià	3.94	2.26
	20	Vallvidrera-Les Planes	1.82	1.06
6 Gràcia	21	Gràcia	5.06	2.45
	22	Vallcarca	3.79	2.31
7 Horta-Guinardó	23	Guinardó	4.61	2.52
	24	Horta	3.23	1.89
	25	Vall d'Hebron	4.02	2.90
8 Nou Barris	26	Viliapicina-Turó de la Peira	4.07	2.73
	27	Roquetes-Verdum	4.67	2.44
	28	Ciutat Meridiana-Vallbona	2.09	1.92
9 Sant Andreu	29	Sagrera	5.42	3.54
	30	Congrés	4.70	2.05
	31	Sant Andreu	3.75	2.50
	32	Bon Pastor	2.23	1.96
	33	Trinitat Vella	3.75	1.80
10 Sant Martí	34	Fort Pius	6.92	3.07
	35	Poblenou	4.02	3.04
	36	Barris Besòs	4.64	3.95
	37	Clot	4.96	2.94
	38	Verneda	7.46	4.22

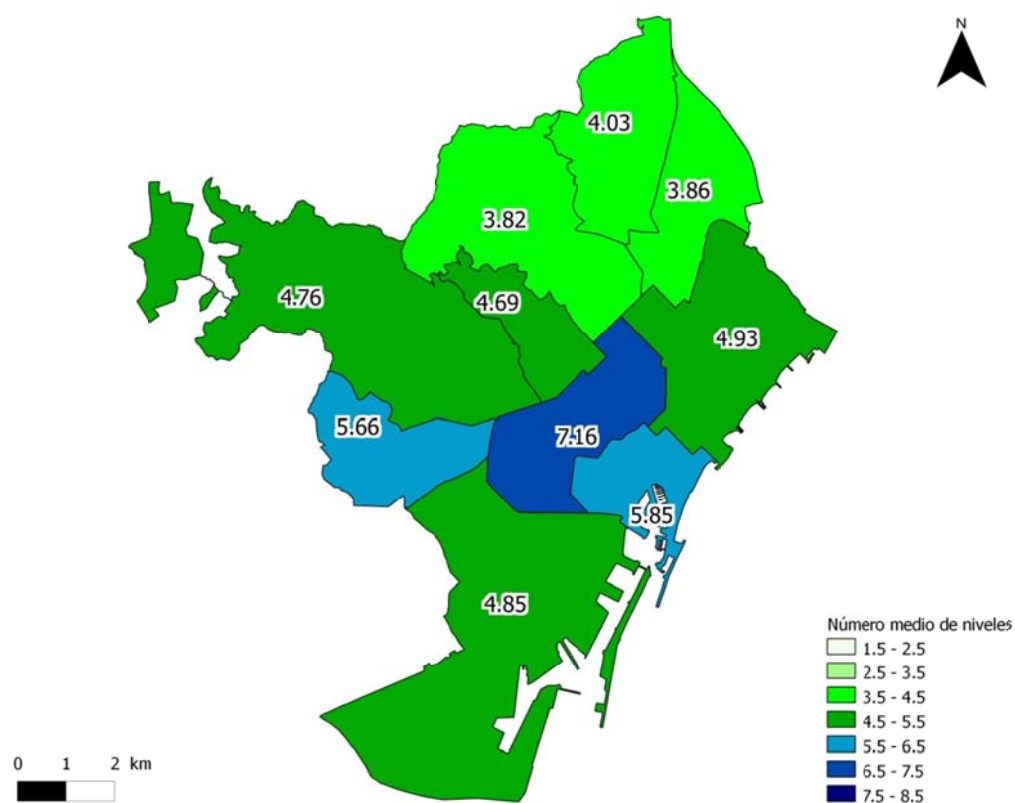


Figura 6-15. Número medio de niveles de los edificios de cada distrito de Barcelona.

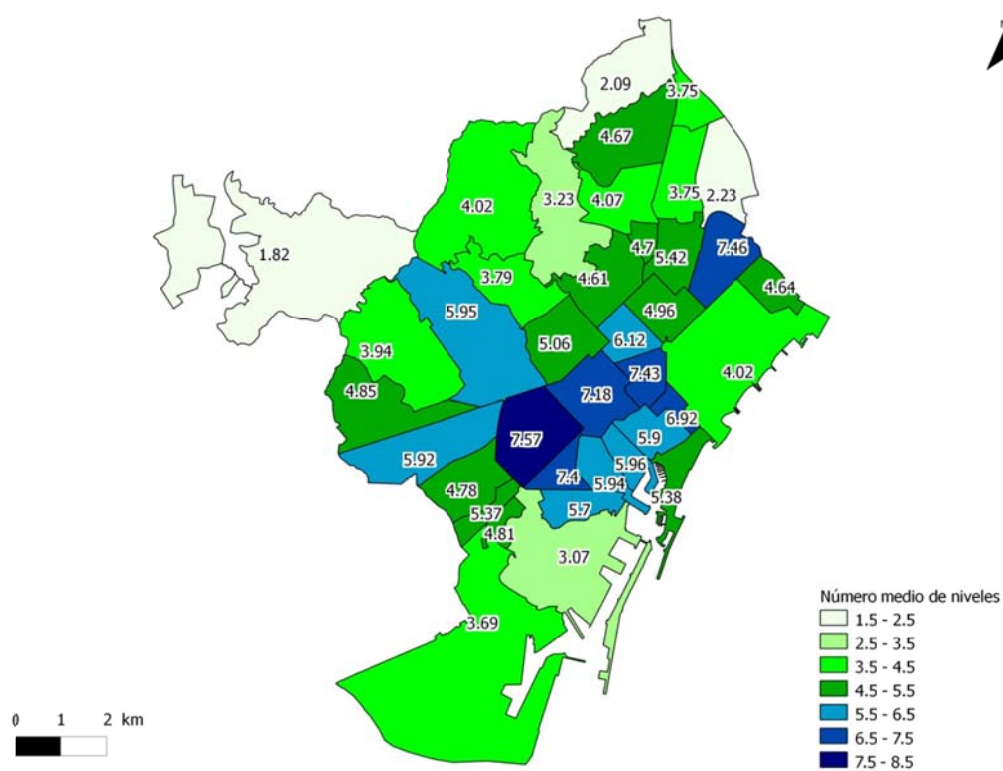


Figura 6-16. Número medio de niveles de los edificios de cada barrio de Barcelona.

6.4.4 Síntesis de los datos y fiabilidad

Al analizar y procesar la base de datos proporcionada por el IMI se generó la Figura 6-17, en la cual se resume la cantidad de información disponible en relación a los edificios de Barcelona. Particularmente, es posible identificar que de acuerdo con el catastro, la ciudad tiene 78668 parcelas, de las cuales 71256 están edificadas. De manera que el 90.6% de las parcelas totales de Barcelona tienen algún tipo de edificación. Particularmente, se conoce la tipología de los edificios existentes en 70137 parcelas, lo cual representa el 98.4% de las parcelas construidas. A partir de los datos existentes en las bases de datos generadas por Lantada et al (2007), y la nueva información proporcionada por el IMI, fue posible identificar la tipología y el año de construcción de 69982 edificios. En el presente trabajo al igual que en el de Lantada et al (2009b) se estima la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los 69982 edificios, que representan el 98.2% de las parcelas construidas. Por otra parte, para fines de hacer estimaciones de los efectos sobre la población se dispone de información de personas censadas en 58481 parcelas. Adicionalmente, es posible señalar que el número de edificios analizados en el presente trabajo es una cantidad similar a los 70157 edificios residenciales analizados por Lantada et al (2009a). El empleo de los mismos edificios que estudiaron Lantada et al (2009b) facilitará la comparación entre los resultados de dicho estudio y los obtenidos en el presente trabajo.

Tal como se ha descrito anteriormente la base de datos empleada en el presente trabajo ha sido procesada y mejorada a través de los años. Por tal razón, y por el origen mismo de los datos se considera que la información empleada en el presente trabajo para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios, tiene en general una alta fiabilidad. Particularmente, en el caso de la información de la tipología estructural se le asignará un factor de fiabilidad igual a 8, entre una escala de 0 a 10.

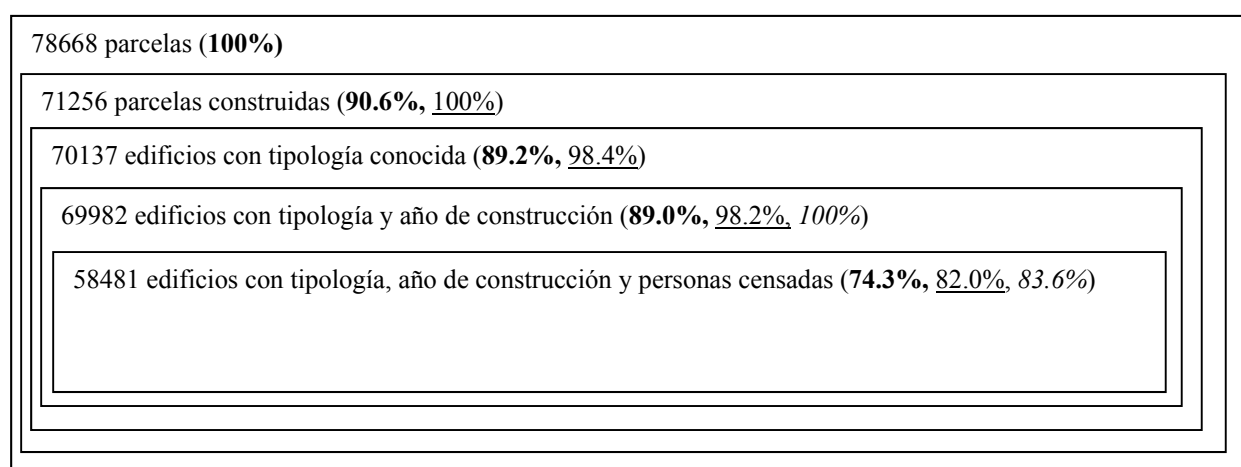


Figura 6-17. Resumen de los datos disponibles en el presente trabajo sobre los edificios de Barcelona.

6.5 Vulnerabilidad

En este apartado se describen las principales consideraciones realizadas para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona, a partir de los datos de los edificios descritos anteriormente en este mismo capítulo. La estimación de la vulnerabilidad se realiza mediante la metodología LM1_P y con la ayuda del código USERISK 2011. Se incluyen también los principales resultados de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la ciudad.

6.5.1 USERISK 2011: un caso de aplicación

Para estimar las curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona se emplea el código USERISK 2011. Para el caso de los edificios de Barcelona el código considera: 1) Los índices de vulnerabilidad por tipología estructural establecidos en la metodología LM1 de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) [Tabla 3-2]; 2) Los modificadores regionales de la vulnerabilidad establecidos por Lantada (2007) [Tabla 3-3], y; 3) Los modificadores de vulnerabilidad debidos al estado de conservación del edificio, al número de niveles del edificio, a la irregularidad geométrica en planta del edificio, a la posición del edificio en la manzana y a las diferencias de altura entre edificios adyacentes.

Estado de conservación del edificio

El dato del estado de conservación de cada edificio estudiado permite estimar el respectivo modificador de la vulnerabilidad sísmica, de acuerdo con los criterios indicados en la Tabla 3-4.

Número de niveles del edificio

La información del número de niveles del edificio permite considerar el respectivo modificador de la vulnerabilidad sísmica, de acuerdo con los criterios indicados en la Tabla 3-5.

Irregularidad geométrica en planta

Debido a que en la base de datos de los edificios no existe información explícita sobre la irregularidad geométrica en planta, es posible hacer una estimación de dicha irregularidad mediante los datos geométricos disponibles. Para ello, se emplea el criterio considerado por Lantada (2007), el cual se basa en la estimación de la razón de compacidad RC (Lantada, 2007; De Smith et al, 2007). El valor de RC se estima de acuerdo con la Ec. 6-1.

$$RC = \sqrt{\frac{A}{A_c}}$$

6-1

donde A es el área del polígono estudiado, y A_c el área del círculo que tiene el mismo perímetro que el polígono. RC vale 1 cuando el polígono es un círculo, y toma valores entre 0 y 1 para cualquier

otra forma. En la Tabla 6-10 se muestran los criterios empleados para asignar el modificador de la vulnerabilidad en función del valor de RC .

Tabla 6-10. Modificador de la vulnerabilidad por irregularidad geométrica en planta (Lantada et al, 2009b).

RC	Modificador
$RC < 0.5$	+0.04
$0.5 \leq RC < 0.7$	+0.02

Posición del edificio en la manzana

En el presente trabajo los modificadores de la vulnerabilidad debidos a la posición del edificio en la manzana, se toman en cuenta mediante el criterio considerado por Lantada et al (2009b), el cual se resume en la Tabla 6-11.

Tabla 6-11. Modificador de la vulnerabilidad por la posición del edificio en la manzana.

Posición	Código USERISK	Modificador
Terminal	3	+0.06
Esquina	1	+0.04
Intermedio	2	-0.04

Diferencias de altura entre edificios adyacentes

En el caso de las diferencias de altura la vulnerabilidad sísmica del edificio se modifica de acuerdo con el criterio establecido por Lantada et al (2009b), el cual se resume en la Figura 6-18. Adicionalmente, en la Tabla 6-12, se incluyen los códigos para indicar en el archivo de datos requerido por USERISK, cada uno de los casos de la Figura 6-18.

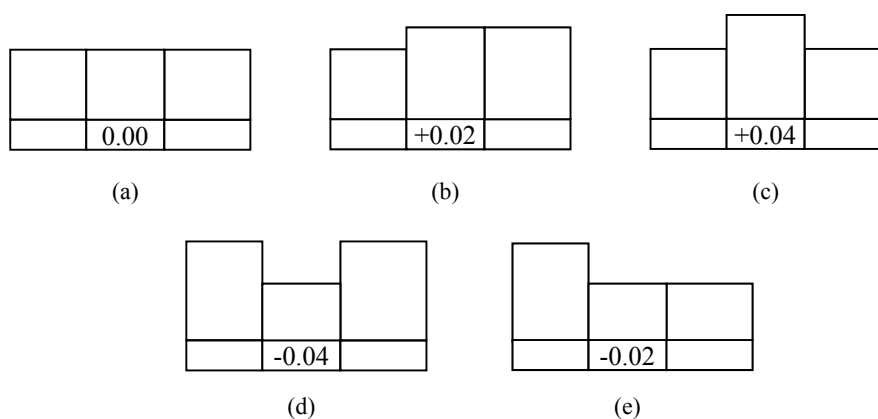


Figura 6-18. Modificadores en función del número de plantas de los edificios adyacentes (Lantada et al, 2009b).

Tabla 6-12. Códigos para identificar en USERISK los diferentes casos del modificador relativo al número de plantas de los edificios adyacentes (Figura 6-18).

Caso	Código USERISK
a	0
b	1
c	2
d	3
e	4

Estimación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona

En el presente trabajo se estima la vulnerabilidad sísmica de 69982 edificios de Barcelona. Por lo tanto, se generó una base de datos que permitiese estimar la vulnerabilidad sísmica de dichos edificios. A manera de ejemplo, se eligieron dos edificios de dicha base de datos para mostrar el procedimiento empleado para estimar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada uno de los edificios de Barcelona. Para facilitar la identificación de los dos edificios del ejemplo, en el presente documento los mismos se denominan BCN3 y BCN4.

Generación de los archivos de datos para usarse en USERISK 2011

Como se mencionó en el capítulo 4, para realizar estimaciones de la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante el código USERISK, se requiere generar dos archivos de datos. Por ello, para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, se generó el archivo de datos generales (*datos_generales.data*) que contenía la información indicada en la Tabla 6-13, y el archivo de datos específicos de los edificios (*edificios_BCN.csv*) que contenía la información incluida en Tabla 6-14. El formato requerido para cada uno de los dos archivos se indica en el anexo C.

Tabla 6-13. Descripción de los datos que contiene el archivo de texto *datos_generales.data*, requerido para estimar mediante USERISK la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4.

No	Descripción	Dato
1	Nombre de la ciudad o región de estudio	Barcelona
2	Número de edificios incluidos en el estudio	2
3	(V_a) = Límite inferior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	-1
4	(V_b) = Límite superior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	2
5	Ubicación del archivo *.csv que contiene los datos de los edificios	C:\edificios_BCN.csv
6	Ubicación del archivo *.hz que contiene la información de las curvas de peligrosidad sísmica del sitio en el que están los edificios en estudio.	C:\peligro_sismico_BCN.hz

Es importante señalar que aunque en el archivo de datos generales (Tabla 6-13) se incluye la ubicación del archivo que contiene la información de la peligrosidad sísmica, tal información no se emplea para estimar la vulnerabilidad sísmica. Sin embargo, como se verá en el capítulo siguiente, la información de la peligrosidad sísmica sí será necesaria para que USERISK pueda estimar el riesgo sísmico de los edificios.

Tabla 6-14. Descripción de los datos que contiene el archivo de texto *edificios_BCN.csv*, requerido para estimar mediante USERISK 2011 la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4.

No.	Descripción	Edificio	
		BCN3	BCN4
1	Número de orden del edificio dentro de la base de datos	1	2
2	Código de identificación del edificio	50200011	50200111
3	Código de la parcela	5020001	5020011
4	Código de la manzana	5020	5020
5	Código de la zona ZRP	68	68
6	Código del barrio	204	204
7	Código del distrito	2	2
8	Área del edificio (m)	68.34	58.68
9	Perímetro del edificio (m ²)	39.80	36.97
10	Número de niveles	9	5
11	Código de la tipología estructural	RC32	M31
12	Factor de fiabilidad de la tipología estructural	8	8
13	Año de construcción	1975	1914
14	Zona sísmica (Tabla 5-6)	II	II
15	Código de estado de conservación (Tabla 3-4)	N	N
16	Código de la posición del edificio (Tabla 6-11)	1	1
17	Código de la diferencia de alturas de los edificios adyacentes (Tabla 6-12)	0	1

Cálculo de la vulnerabilidad sísmica mediante USERISK 2011

Una vez generado el archivo de datos que contiene la información de los edificios BCN3 y BCN4, es posible emplear el código USERISK para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios. Particularmente, USERISK estima los valores de α y β que definen las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio. Para hacerlo, USERISK estima primero los valores de α_m y β_m que definen a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, mediante los pasos siguientes:

- 1) Determina el valor de V_I^* (índice de vulnerabilidad por tipología estructural) del edificio en función del dato de la tipología estructural;
- 2) Determina el valor de ΔV_R (factor de vulnerabilidad regional) del edificio en función del dato de la ciudad en la que se encuentran los edificios, que en este caso es Barcelona;

- 3) Determina los modificadores de la vulnerabilidad para obtener el valor de ΔV_m (suma de modificadores de la vulnerabilidad), en función de los datos asociados a los modificadores considerados para los edificios de Barcelona;
- 4) Obtiene el valor de $\overline{V_I}$ (índice de vulnerabilidad medio) del edificio, mediante la Ec. 1-1.
- 5) Obtiene los valores de V_c y V_d (límites del intervalo de confianza) mediante la Ec. 3-19 y la Ec. 3-20;
- 6) Propone valores de β_m hasta encontrar los valores de α_m y β_m que correspondan a una función de probabilidad beta cuyo valor medio sea igual a $\overline{V_I}$, y cuyo intervalo de confianza del 90% esté delimitado por los valores de V_c y V_d .

De manera similar, los principales pasos empleados por USERISK para estimar los valores de α_L y β_L , que definen la curva Inferior de vulnerabilidad para cada edificio son los siguientes:

- 1) Obtiene el valor de $\overline{V_{I_L}}$ mediante la Ec. 3-27;
- 2) Determina los valores de V_{c_L} y de V_{d_L} mediante la Ec. 3-28 y la Ec. 3-29, respectivamente;
- 3) Propone valores de β_L hasta encontrar los valores de α_L y β_L que correspondan a una función de probabilidad beta cuyo valor medio sea igual a $\overline{V_{I_L}}$, y cuyo intervalo de confianza del 90% esté delimitado por los valores de V_{c_L} y de V_{d_L} .

Finalmente, los principales pasos empleados por USERISK para estimar los valores de α_U y β_U , que definen la curva Superior de vulnerabilidad para cada edificio son los siguientes:

- 1) Obtiene el valor de $\overline{V_{I_U}}$ mediante la Ec. 3-34;
- 2) Determina los valores de V_{c_U} y de V_{d_U} mediante la Ec. 3-35 y la Ec. 3-36, respectivamente;
- 3) Propone valores de β_U hasta encontrar los valores de α_U y β_U que correspondan a una función de probabilidad beta cuyo valor medio sea igual a $\overline{V_{I_U}}$, y cuyo intervalo de confianza del 90% esté delimitado por los valores de V_{c_U} y de V_{d_U} .

Los resultados generados por USERISK se incluyen en un archivo, que en el caso del ejemplo, se denomina *edificio_vulnerability.RES*. Dicho archivo contiene datos de los edificios y los resultados de la estimación de la vulnerabilidad sísmica (Tabla 6-15). Tales resultados son el índice de vulnerabilidad medio $\overline{V_I}$, y los valores de α y β que definen a las curvas de vulnerabilidad Inferior, Mejor y Superior, respectivamente, de cada edificio. A partir de los valores de α y β de la Tabla 6-15 es posible generar las curvas de vulnerabilidad de los edificios BCN3 (Figura 6-19a) y BCN4 (Figura 6-19b). De acuerdo con dichas curvas de vulnerabilidad hay una probabilidad entre el 39.96% y el 70.08% con un valor medio de 55.5%, de que el índice de vulnerabilidad del edificio BCN3 sea mayor que 0.5. También, hay un 50% de

probabilidad de que el índice de vulnerabilidad del edificio BCN3 sea mayor que un valor entre 0.43 y 0.65, con un valor medio de 0.54. De manera similar si se consideran las curvas de vulnerabilidad del edificio BCN4, es posible identificar que para este edificio hay una probabilidad entre el 98.16% y el 99.66%, con un valor medio del 99.28% de que el índice de vulnerabilidad del edificio BCN4 sea mayor que 0.5. También, hay un 50% de probabilidad de que el índice de vulnerabilidad del edificio BCN4 sea mayor que un valor entre 0.85 y 0.98, con un valor medio de 0.92. Por lo tanto, a partir de estos resultados es posible afirmar que la vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 es significativamente mayor que la del edificio BCN3.

Tabla 6-15. Descripción de la información que contiene el archivo de texto *edificios_vulnerability.res*, el cual es generado por USERISK 2011, para concentrar los resultados de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4.

Tipo de información	Descripción	Edificio	
		BCN3	BCN4
Datos	1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos.	1	2
	2. Código de identificación del edificio.	50200011	50200111
	3. Código de la parcela.	5020001	5020011
	4. Código de la manzana.	5020	5020
	5. Código de la zona ZRP.	68	68
	6. Código del barrio.	204	204
	7. Código del distrito.	2	2
	8. Código de la tipología estructural.	RC32	M31
	9. Año de construcción.	1975	1914
	10. Número de niveles.	9	5
	11. (V_a) = Límite inferior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	-1	-1
	12. (V_b) = Límite superior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	2	2
Resultados	13. Índice de vulnerabilidad medio ($\overline{V_I}$).	0.54	0.918
	14. Valor de α_L correspondiente a la curva Inferior de la vulnerabilidad del edificio.	12.24	47.53
	15. Valor de β_L correspondiente a la curva Inferior de la vulnerabilidad del edificio.	13.51	29.41
	16. Valor de α_m correspondiente a la curva Mejor de la vulnerabilidad del edificio.	13.20	48.06
	17. Valor de β_m correspondiente a la curva Mejor de la vulnerabilidad del edificio.	12.51	27.11
	18. Valor de α_U correspondiente a la curva Superior de la vulnerabilidad del edificio.	14.02	45.24
	19. Valor de β_U correspondiente a la curva Superior de la vulnerabilidad del edificio.	11.41	23.21

El proceso empleado para estimar las curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, se repite para obtener las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada uno de los 69982 edificios de Barcelona

estudiados en el presente trabajo. Más adelante se describen con detalle los resultados obtenidos al estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la ciudad.

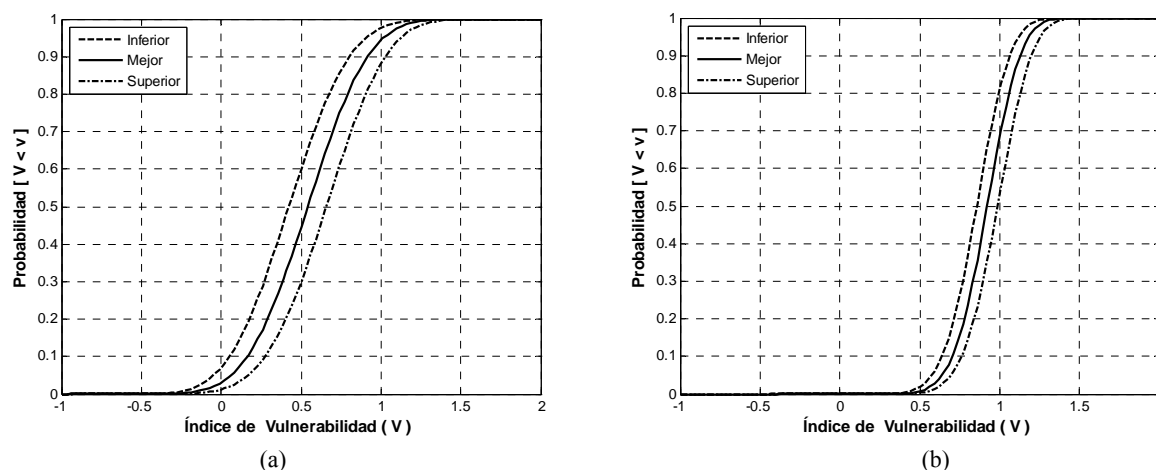


Figura 6-19. Curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (a) y BCN4 (b).

Estimación de curvas promedio de vulnerabilidad sísmica de un grupo de edificios (barrio, distrito, etc.)

Los resultados de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio pueden emplearse para obtener curvas que representen la vulnerabilidad sísmica de un grupo de edificios (barrio, distrito, etc.). Enseguida, se describe mediante un ejemplo, el procedimiento empleado en el presente trabajo para obtener curvas promedio de vulnerabilidad sísmica. Específicamente, se obtienen las curvas promedio de vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, a partir de las curvas de vulnerabilidad de cada uno de dichos edificios (Figura 6-19). Para ello, se considera que una curva promedio de la vulnerabilidad es aquella que surge al promediar los valores del índice de vulnerabilidad, que tienen la misma probabilidad acumulada. Por ello, las curvas promedio de la vulnerabilidad de los edificios BCN3 y BCN4 se obtiene mediante los pasos siguientes: 1) se estiman las probabilidades de que el índice de vulnerabilidad sea menor o igual a un grupo de valores representativos del intervalo -1 y 2, de cada una de las curvas de vulnerabilidad de los edificios. Por ejemplo, en la Tabla 6-16, se muestran los valores del índice de vulnerabilidad de las curvas Mejor de los edificios BCN3 y BCN4 que tienen las mismas probabilidades acumuladas ($P[V \leq v]$); 2) se determinan índices de vulnerabilidad promedio que se obtienen al promediar los índices de vulnerabilidad de cada edificio que tienen la misma probabilidad acumulada. Por ejemplo, de acuerdo con la Tabla 6-16, el edificio BCN3 tiene una probabilidad del 50% de tener un índice de vulnerabilidad menor a 0.54, y el edificio BCN4 tiene una probabilidad del 50% de tener un índice de vulnerabilidad menor a 0.93, por lo tanto, en la curva promedio de los edificios BCN3 y BCN4 habrá una probabilidad del 50% de que el índice de vulnerabilidad sea menor a 0.74 (Tabla 6-16). En la Figura 6-20 se muestran la curva Mejor promedio de los edificios BCN3 y BCN4, generadas a partir del procedimiento descrito, y las respectivas curvas Mejor de los edificios BCN3 y BCN4.

Posteriormente, es posible emplear los puntos que definen a la curva promedio (Figura 6-20), para obtener una función de probabilidad beta que la represente. Para ello, basta con estimar los parámetros α y β que definen a la función de probabilidad beta. Para tal fin, es posible usar esencialmente el mismo procedimiento descrito en el capítulo 3 para estimar los parámetros α y β que definen a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica. De acuerdo con dicho procedimiento, es posible determinar una función de probabilidad beta a partir de tres puntos de la función: el valor medio, y los valores que determinan el intervalo de confianza del 90%. Por lo tanto, en el presente caso de los edificios BCN3 y BCN4 se emplea dicho procedimiento para obtener la curva Mejor promedio que representa la vulnerabilidad de ambos edificios y que, de acuerdo con los resultados tal curva está definida por los valores de α igual a 25.89 y β igual a 18.71. Al repetir este proceso para el resto de las curvas de vulnerabilidad de los edificios BCN3 y BCN4, es posible obtener las curvas promedio indicadas en la Figura 6-21, con sus respectivos parámetros α y β (Tabla 6-17).

Tabla 6-16. Índices de vulnerabilidad de los edificios BCN3 y BCN4 que tienen la misma probabilidad acumulada, $P(V < v)$, de acuerdo con sus respectivas curvas Mejor de la vulnerabilidad; e índices de vulnerabilidad promedio de los edificios BCN3 y BCN4, que determinan la curva Mejor promedio de los edificios BCN3 y BCN4.

Curva Mejor de la vulnerabilidad				Curva Mejor promedio de la vulnerabilidad*	
Edificio BCN3		Edificio BCN4		Edificios BCN3 y BCN4	
Índice de vulnerabilidad (V)	$P(V < v)$	Índice de vulnerabilidad (V)	$P(V < v)$	Índice de vulnerabilidad (V)	$P(V < v)$
0.16	0.1	0.70	0.1	0.43	0.1
0.29	0.2	0.78	0.2	0.54	0.2
0.39	0.3	0.83	0.3	0.61	0.3
0.47	0.4	0.88	0.4	0.68	0.4
0.54	0.5	0.93	0.5	0.74	0.5
0.61	0.6	0.96	0.6	0.79	0.6
0.70	0.7	1.01	0.7	0.86	0.7
0.79	0.8	1.06	0.8	0.93	0.8
0.92	0.9	1.13	0.9	1.03	0.9
1.37	1	1.39	1	1.38	1

* El índice de vulnerabilidad promedio se obtiene al promediar los índices de los edificios BCN3 y BCN4 que tienen la misma probabilidad acumulada. Estos índices promedio y sus respectivas probabilidades acumuladas son los puntos que definen a la curva Mejor promedio de los edificios BCN3 y BCN4.

El procedimiento descrito anteriormente para estimar las curvas de vulnerabilidad promedio de dos edificios, puede emplearse también para obtener curvas de vulnerabilidad promedio de mayor número de edificios. De tal forma que es posible obtener, por ejemplo, curvas de vulnerabilidad sísmica promedio de cada barrio y distrito de Barcelona. Más adelante se muestran ejemplos de las curvas de vulnerabilidad sísmica promedio que se han estimado en el presente trabajo para barrios y distritos de Barcelona.

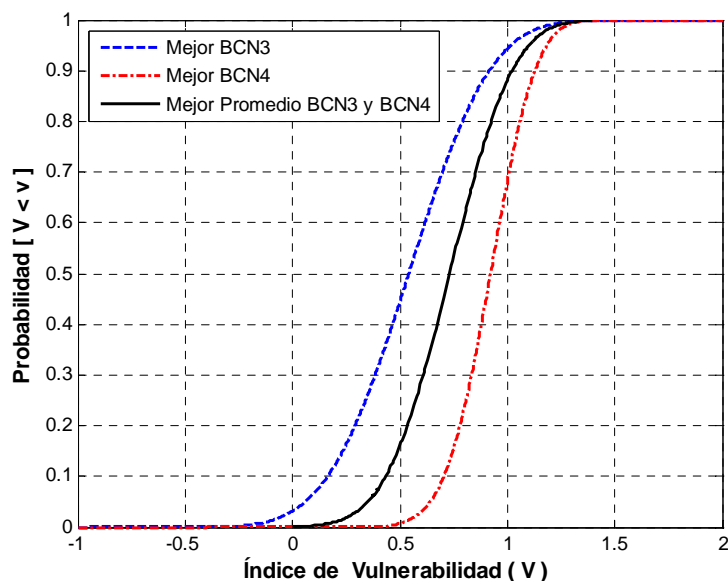


Figura 6-20. Curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente, y curva Mejor promedio de los edificios BCN3 y BCN4.

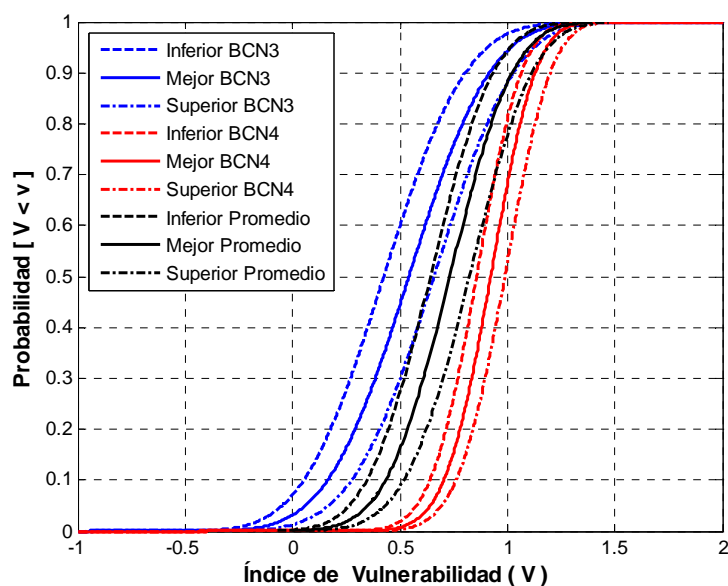


Figura 6-21. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente, y curvas de vulnerabilidad promedio representativas de ambos edificios.

Tabla 6-17. Valores de α y β que definen a cada una de las curvas promedio que representan a la vulnerabilidad sísmica de los edificios BCN3 y BCN4, y sus respectivos valor medio y desviación estándar.

Curva promedio de vulnerabilidad sísmica	α	β	\bar{V}	σ
Inferior	26.01	21.41	0.65	0.21
Mejor	25.89	18.71	0.74	0.22
Superior	26.09	16.61	0.83	0.22

6.5.2 Vulnerabilidad de Barcelona

En el presente apartado se muestran y comentan los principales resultados que se obtienen al estimar, mediante USERISK 2011, la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona. Es importante destacar que a pesar de que se obtienen resultados de vulnerabilidad sísmica por edificio, los resultados de vulnerabilidad se expresan principalmente en función de superficies que incluyen a grupos de edificios. Se utilizan, principalmente, los distritos y los barrios. La razón para escoger esta forma de presentar los resultados, obedece fundamentalmente a razones de confidencialidad. De hecho, tanto el método LM1_P como la calidad de los datos disponibles permite realizar el análisis de vulnerabilidad y daño, edificio a edificio. Con todo, el carácter probabilista del método LM1, pero particularmente del método LM1_P, exige precaución en la interpretación y representación de los resultados. Lantada (2007) observó que el nivel de distrito puede ser adecuado si bien en distritos heterogéneos con parques y jardines, como por ejemplo Sarriá-Sant Gervasi, o con amplias zonas industriales, como por ejemplo Sants-Montjuïc, se pierde resolución. El nivel de ZRP llega a un importante nivel de detalle y tiene la ventaja de la homogeneidad de las zonas; este nivel de detalle se consideró útil para los servicios de protección civil. Con todo, quizás la división territorial que mejor concilia la simplicidad con la resolución de los resultados es el nivel de Barrio. Este es el nivel que ha aconsejado el Ayuntamiento para estudios recientes (Lantada et al, 2009b).

Al estimar la vulnerabilidad sísmica de la totalidad de los edificios de Barcelona considerados en el presente estudio, mediante el mismo proceso que el seguido para los edificios BCN3 y BCN4 descrito anteriormente, es posible obtener los resultados de vulnerabilidad para cada edificio de Barcelona. Tales resultados pueden emplearse para obtener las curvas de vulnerabilidad promedio de Barcelona que se muestran en la Figura 6-22, y cuyos parámetros se incluyen en la Tabla 6-18. De acuerdo con dichos resultados la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad en Barcelona sea mayor que 0.5 varía entre el 79.05% y el 93.21%, con un valor medio del 87.91%. De manera similar es posible estimar la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.8 y 1.0 (Tabla 6-19). Es importante señalar, que si se estuviese aplicando el método LM1 de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), entonces, la vulnerabilidad sísmica de Barcelona estaría representada por un índice de vulnerabilidad promedio igual a 0.75, valor que en el presente trabajo, corresponde al valor medio de la curva Mejor promedio de la vulnerabilidad sísmica (Tabla 6-18).

De manera similar a como se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad promedio de Barcelona, es posible obtener curvas de vulnerabilidad por tipologías, como las mostradas en la Figura 6-23, que corresponden a las curvas de vulnerabilidad promedio de los 48822 edificios de mampostería y de los 18354 edificios

de hormigón, en Barcelona. Los parámetros que definen a cada una de dichas curvas de vulnerabilidad se indican en la Tabla 6-20.

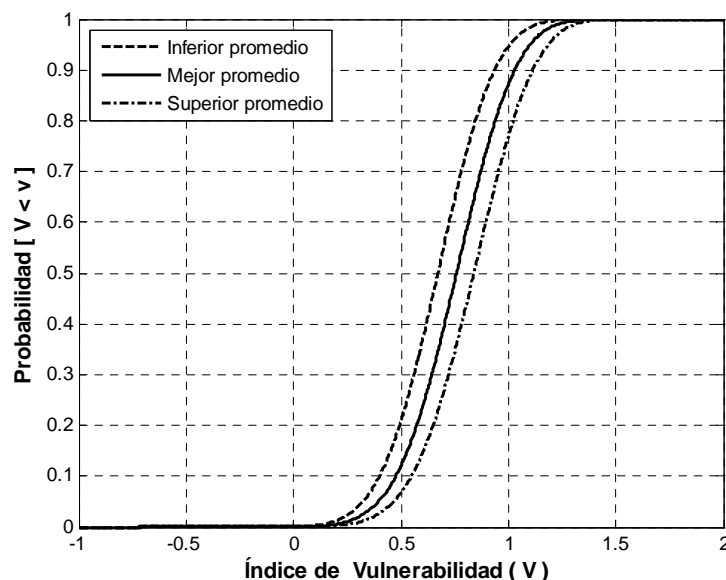


Figura 6-22. Curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de Barcelona.

Tabla 6-18. Parámetros que definen a cada una de las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de Barcelona.

Curva Inferior promedio				Curva Mejor Promedio				Curva Superior promedio			
α_L	β_L	$\overline{V_{I_L}}$	σ_L	α_m	β_m	$\overline{V_I}$	$\sigma_{\overline{V}}$	α_U	β_U	$\overline{V_{I_U}}$	σ_U
28.1	22.41	0.67	0.21	27.2	19.31	0.75	0.21	26.74	17.01	0.83	0.22

Tabla 6-19. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de la ciudad.

$P(V > 0.5)$			$P(V > 0.8)$			$P(V > 1.0)$		
Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior
79.05	87.91	93.21	26.88	42.35	56.89	5.39	12.7	22.93

De acuerdo con las curvas de vulnerabilidad promedio de la Figura 6-23 (a), hay una probabilidad entre el 94.53% y el 99.0%, con un valor medio del 97.61%, de que el índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería en Barcelona sea mayor que 0.5. Mientras que de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad promedio de la Figura 6-23 (b), hay una probabilidad entre el 43.13% y el 74.05%, con un valor medio del 59.64%, de que el índice de vulnerabilidad de los edificios de hormigón en Barcelona sea mayor que 0.5. De manera similar, en la Tabla 6-21 se indica la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería y de hormigón de Barcelona tome valores mayores a 0.8 y 1.0. A partir de

estos resultados, y al considerar que el número de edificios de mampostería en Barcelona es más del doble de los edificios de hormigón, es posible concluir que los edificios de mampostería son los que contribuyen en mayor medida a los altos niveles de vulnerabilidad sísmica que tiene la ciudad.

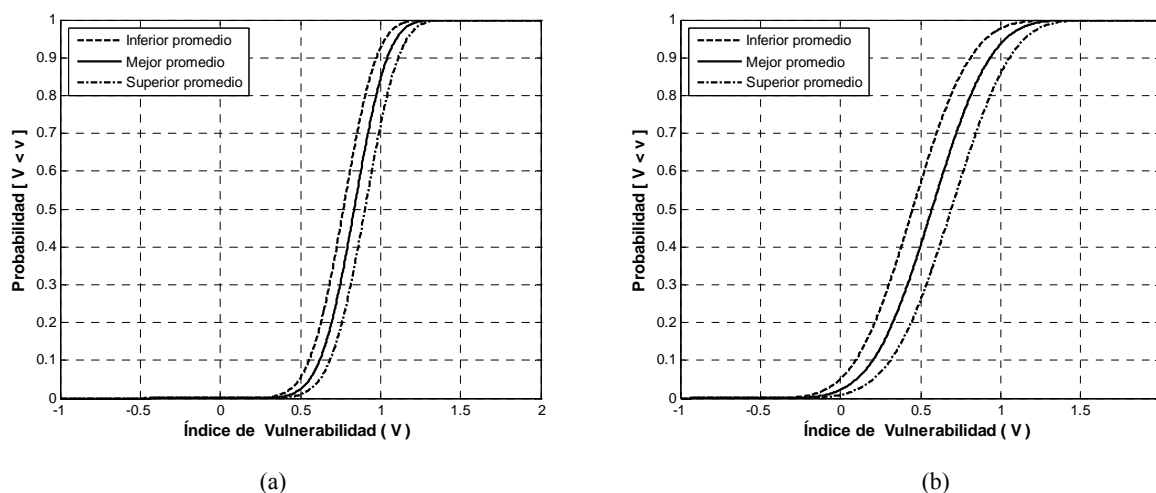


Figura 6-23. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería (a) y de hormigón (b) de Barcelona.

Tabla 6-20. Parámetros que definen a las curvas de vulnerabilidad sísmica promedio de los edificios de mampostería y de hormigón de Barcelona.

Tipología	Curva Inferior promedio				Curva Mejor Promedio				Curva Superior promedio			
	α_L	β_L	$\overline{V_{I-L}}$	σ_L	α_m	β_m	$\overline{V_I}$	$\sigma_{\overline{V}}$	α_U	β_U	$\overline{V_{I-U}}$	σ_U
1 Mampostería	47.48	33.21	0.77	0.16	47.73	30.41	0.83	0.16	47.30	27.41	0.90	0.17
2 Hormigón	13.70	14.61	0.45	0.28	14.16	12.91	0.57	0.28	14.53	11.31	0.69	0.29

Tabla 6-21. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los grupos de edificios pertenecientes a la tipología de hormigón y de mampostería, respectivamente.

Tipología	$P(V > 0.5)$			$P(V > 0.8)$			$P(V > 1.0)$		
	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior
1 Mampostería	94.53	97.61	99.00	42.15	58.41	72.78	7.37	15.54	27.85
2 Hormigón	43.13	59.64	74.05	10.76	21.29	35.61	2.36	6.39	14.13

Por otra parte, se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad de cada distrito de Barcelona (Figura 6-24 y Figura 6-25), las cuales están definidas mediante los parámetros que se indican en la Tabla 6-22. De acuerdo con los resultados obtenidos, la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad en el distrito de Ciutat Vella sea mayor que 0.8 varía entre el 55.96% y el 79.15%, con un valor medio del 68.65%. En forma similar, la probabilidad de que en el distrito de Nou Barris el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.8 varía entre el 18.05% y el 45.41%, con un valor medio del 31.41%. Este mismo tipo de resultados se encuentra resumido en la Tabla 6-23 para cada distrito. Adicionalmente, en la Figura 6-27 y en Figura

6-28, se muestran mapas con las probabilidades de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5 y 0.8, respectivamente, en cada distrito de Barcelona. De acuerdo con dichos mapas los distritos de Ciutat Vella y del Eixample, en conjunto, constituyen la región de mayor vulnerabilidad sísmica de la ciudad. Siendo el distrito de Ciutat Vella el de mayor vulnerabilidad. Esta conclusión coincide con la obtenida por Lantada et al (2009b), y con los resultados obtenidos por Mena (2002). La alta vulnerabilidad de los distritos de Ciutat Vella y del Eixample se puede identificar también al analizar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada distrito (Figura 6-24, Figura 6-25, Figura 6-26), y los resultados asociados a dichas curvas (Tabla 6-22, Tabla 6-23).

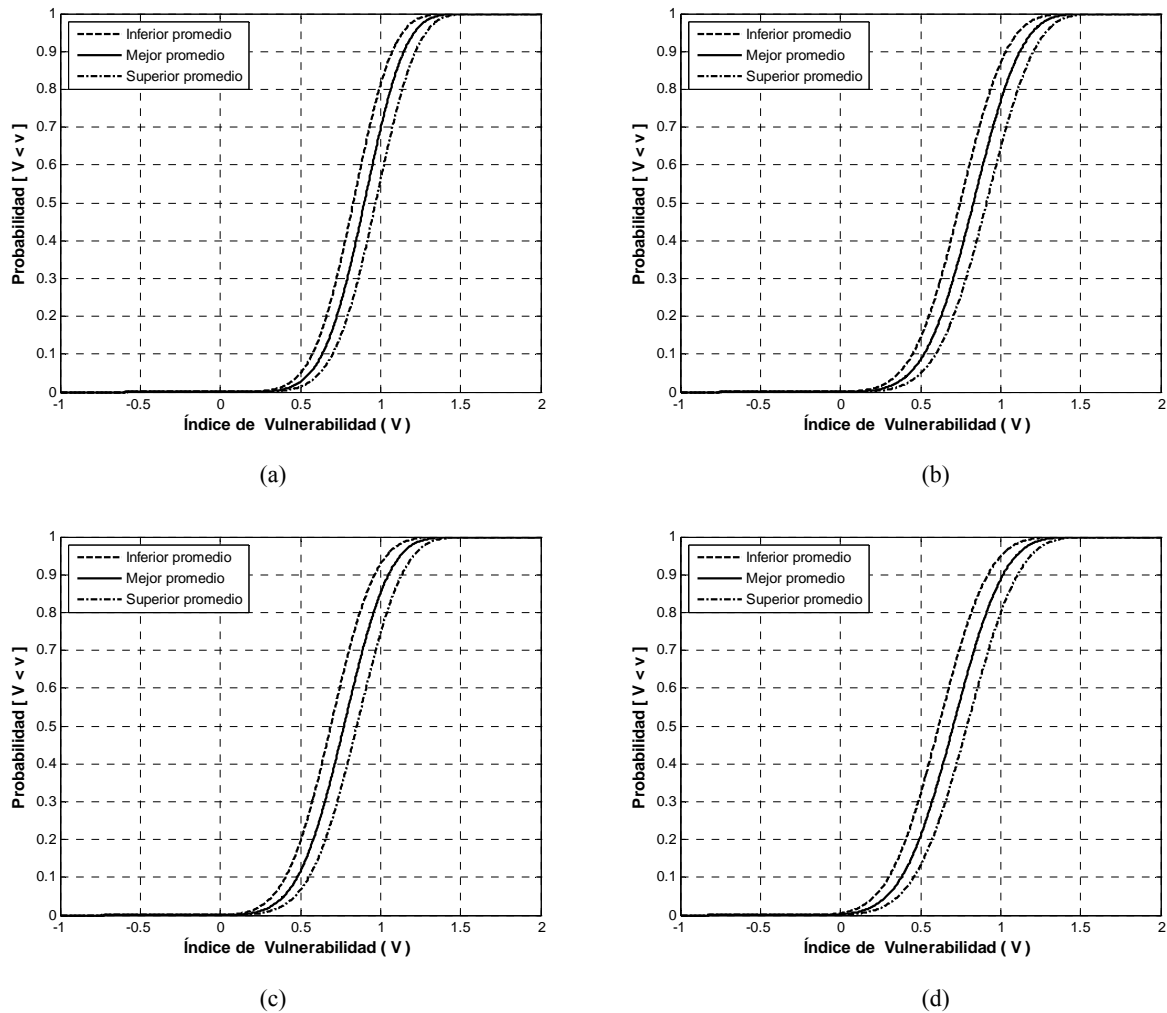


Figura 6-24. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los distritos Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d).

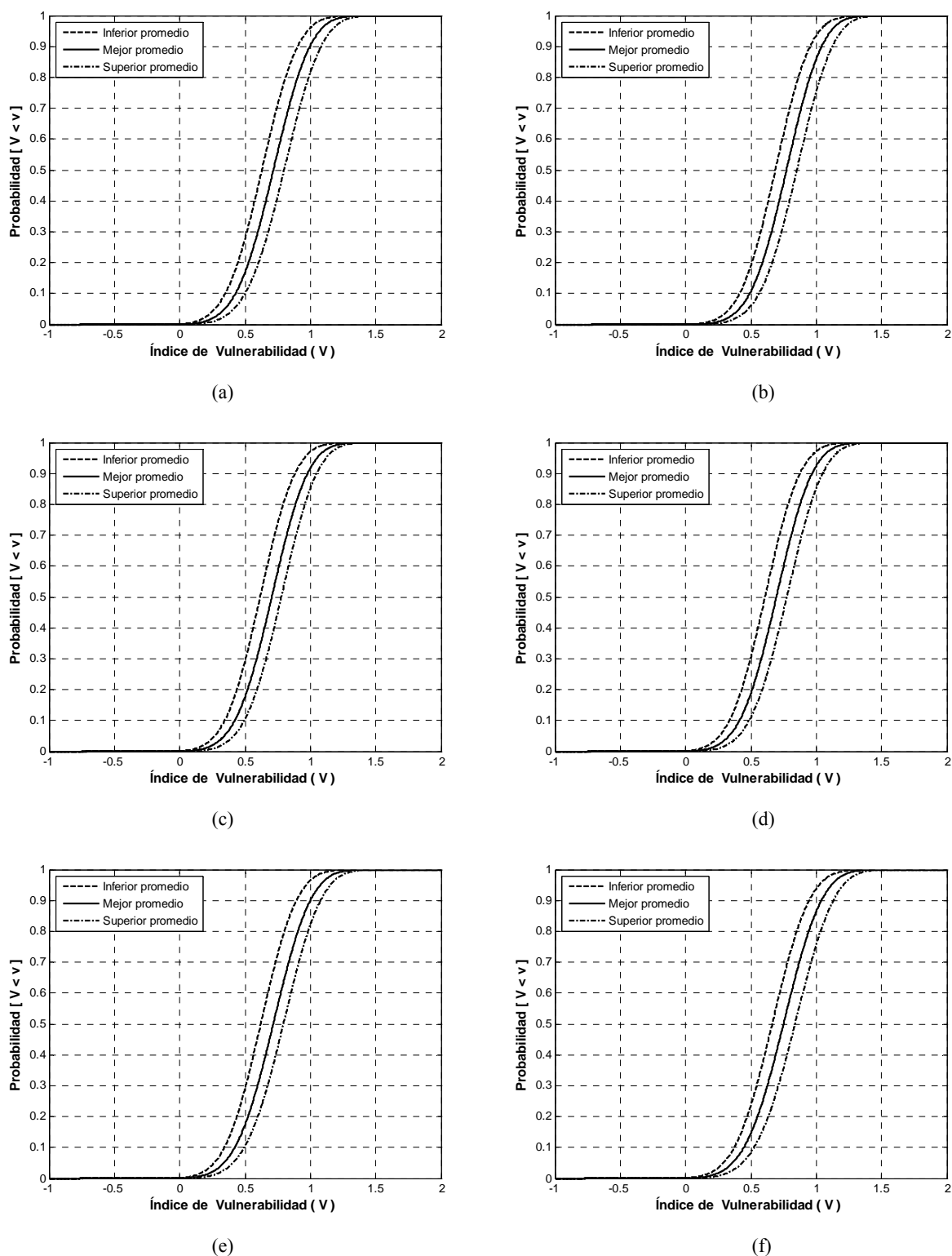


Figura 6-25. Curvas de vulnerabilidad sísmica de los distritos Sarrià-Sant Gervasi (a) y Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f).

Tabla 6-22. Parámetros que definen a cada una de las curvas de la vulnerabilidad sísmica de los distritos de Barcelona.

Distrito	Curva Inferior promedio				Curva Mejor Promedio				Curva Superior promedio			
	α_L	β_L	$\overline{V_{I-L}}$	σ_L	α_m	β_m	$\overline{V_I}$	$\sigma_{\overline{V}}$	α_U	β_U	$\overline{V_{I-U}}$	σ_U
1 Ciutat Vella	34.06	21.91	0.83	0.19	33.05	19.31	0.89	0.2	32.2	17.01	0.96	0.2
2 Eixample	24.31	17.51	0.74	0.23	23.61	15.21	0.82	0.23	23.15	13.31	0.9	0.24
3 Sants-Montjuïc	26.07	20.31	0.69	0.22	25.67	17.91	0.77	0.22	25.29	15.81	0.85	0.22
4 Les Corts	20.34	17.51	0.61	0.24	20.16	15.41	0.7	0.25	19.85	13.51	0.79	0.25
5 Sarrià-Sant Gervasi	25.7	21.71	0.63	0.21	25.3	19.01	0.71	0.22	24.83	16.71	0.79	0.23
6 Gràcia	27.79	21.71	0.68	0.21	27.57	19.21	0.77	0.21	27.05	16.91	0.85	0.22
7 Horta-Guinardó	27.12	23.31	0.61	0.21	26.33	20.11	0.7	0.22	27.17	18.81	0.77	0.22
8 Nou Barris	26.75	23.21	0.61	0.21	26.27	20.31	0.69	0.22	26.51	18.41	0.77	0.22
9 Sant Andreu	25.87	22.11	0.62	0.21	24.47	18.41	0.71	0.22	24.65	16.71	0.79	0.23
10 Sant Martí	24.29	19.61	0.66	0.22	23.51	16.91	0.74	0.23	23.04	14.71	0.83	0.24

Tabla 6-23. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los distritos de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada distrito.

Distritos	P($V > 0.5$)			P($V > 0.8$)			P($V > 1.0$)		
	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior
1 Ciutat Vella	94.98	97.29	98.62	55.96	68.65	79.15	18.76	30.43	44.00
2 Eixample	85.65	91.44	95.15	40.99	55.07	67.76	13.00	23.14	35.59
3 Sants-Montjuïc	80.36	88.30	93.33	30.53	44.89	58.88	7.23	14.81	25.43
4 Les Corts	67.92	79.02	86.76	22.14	35.02	48.57	5.19	11.23	20.18
5 Sarrià-Sant Gervasi	72.07	83.04	89.92	21.30	35.34	49.65	3.93	9.63	18.35
6 Gràcia	80.86	89.19	93.96	29.57	44.83	59.12	6.45	14.02	24.65
7 Horta-Guinardó	70.58	82.18	89.39	18.84	32.93	45.75	3.02	8.21	14.73
8 Nou Barris	69.33	81.12	88.94	18.05	31.41	45.41	2.85	7.56	14.78
9 Sant Andreu	70.81	82.54	89.46	19.99	35.43	48.72	3.51	9.94	17.79
10 Sant Martí	76.23	85.35	91.57	26.97	41.34	56.10	6.20	13.53	24.34

En la Figura 6-26 es posible apreciar claramente que la vulnerabilidad sísmica del distrito de Ciutat Vella es significativamente mayor que la del resto de los distritos. Se puede observar también que los distritos de Nou Barris, Les-Corts, Horta-Guinardó, Sant Andreu y Sarrià-Sant Gervasi tienen curvas Mejor de la vulnerabilidad sísmica muy similares y además son curvas que representan, en general, una vulnerabilidad sísmica menor que la que representan el resto de las curvas de vulnerabilidad correspondientes a los otros 5 distritos de Barcelona. De manera que sería posible clasificar a estos cinco distritos como los de menor vulnerabilidad sísmica de Barcelona, afirmación que se confirma al observar los mapas de vulnerabilidad sísmica de la Figura 6-27 y la Figura 6-28.

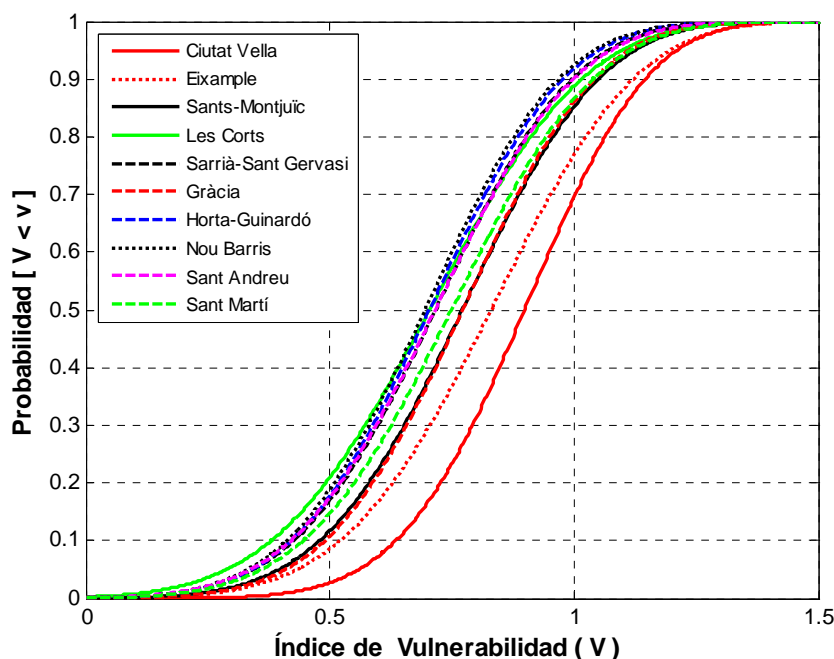
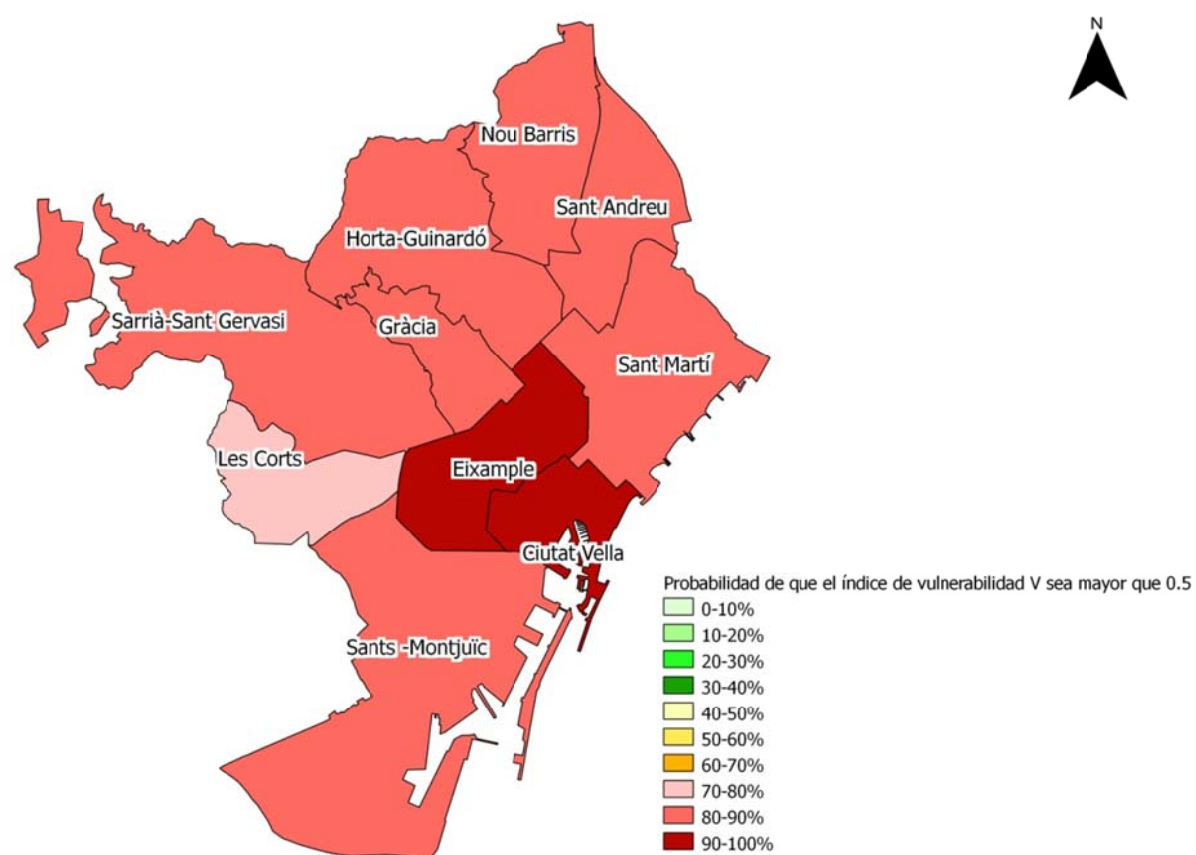


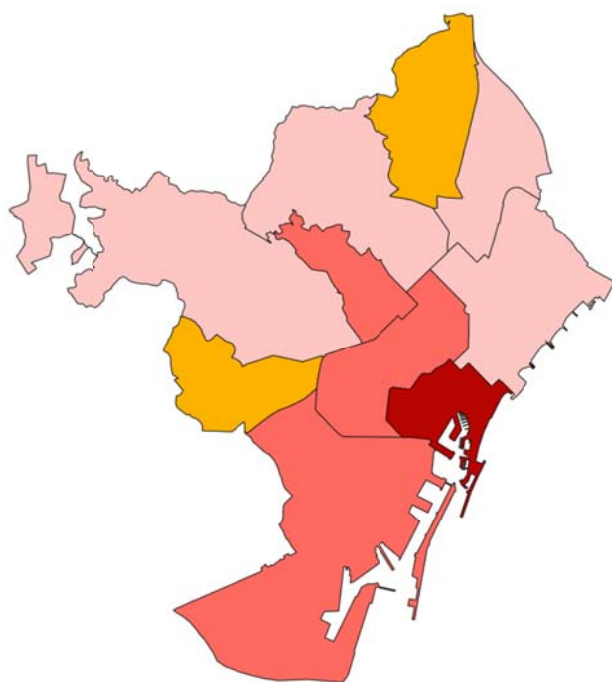
Figura 6-26. Curvas Mejor promedio de la vulnerabilidad sísmica de los distritos de Barcelona.

Para cada distrito es posible obtener también las curvas de vulnerabilidad de sus edificios de mampostería y la de sus edificios de hormigón. Por ejemplo, en la Figura 6-29 se muestran las curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería y los de hormigón del distrito de Ciutat Vella, del Eixample y de Nou Barris, respectivamente.

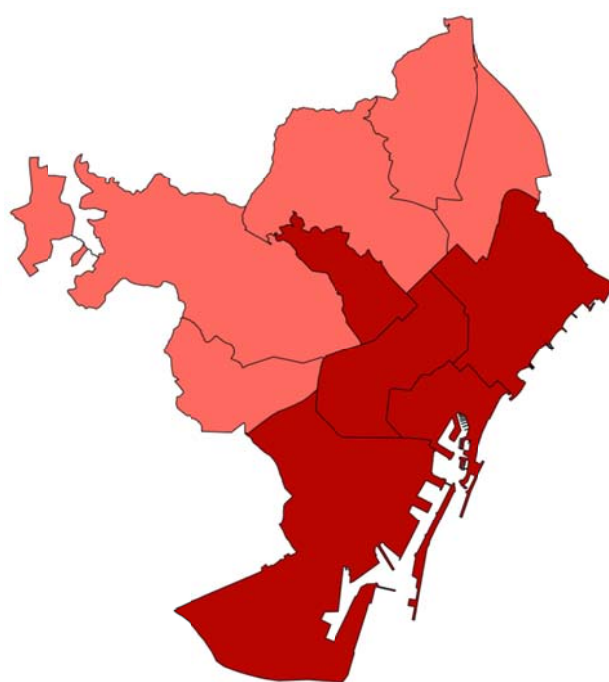
En la Tabla 6-24 se muestran los parámetros que definen a las curvas de vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería y de hormigón de cada distrito de la ciudad. Adicionalmente, en la Tabla 6-25 se muestran algunas de las probabilidades de que el índice de vulnerabilidad sísmica en los edificios de mampostería y hormigón de cada barrio sea mayor que 0.5, 0.8 y 1. De acuerdo con los resultados (Tabla 6-24 y Tabla 6-25), es posible observar que, por ejemplo, en el distrito de Ciutat Vella la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad de sus edificios de hormigón sea mayor que 0.5, varía entre el 37.20% y el 69.32%, con un valor medio del 53.85%. Mientras que en el distrito del Eixample la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad de sus edificios de hormigón sea mayor que 0.5, varía entre el 47.16% y el 76.97%, con un valor medio del 63.45%. Por lo tanto, es posible concluir que en promedio los edificios de hormigón del distrito del Eixample tienen mayor vulnerabilidad sísmica que los edificios de hormigón del distrito de Ciutat Vella. Sin embargo, la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería de este último distrito es muy similar a la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería del distrito del Eixample. Por ejemplo, la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería en ambos distritos sea mayor que 0.5, es aproximadamente 98.5% (Tabla 6-25).



(a)

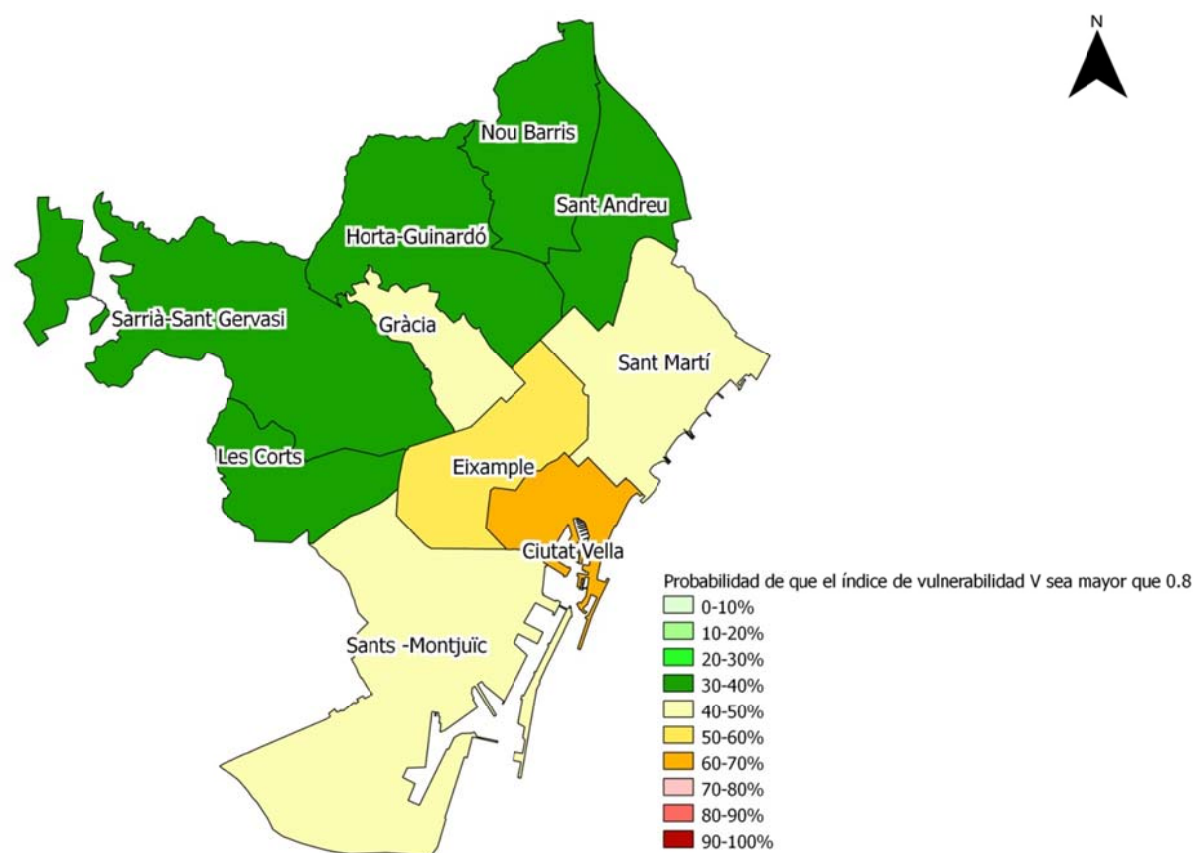


(b)

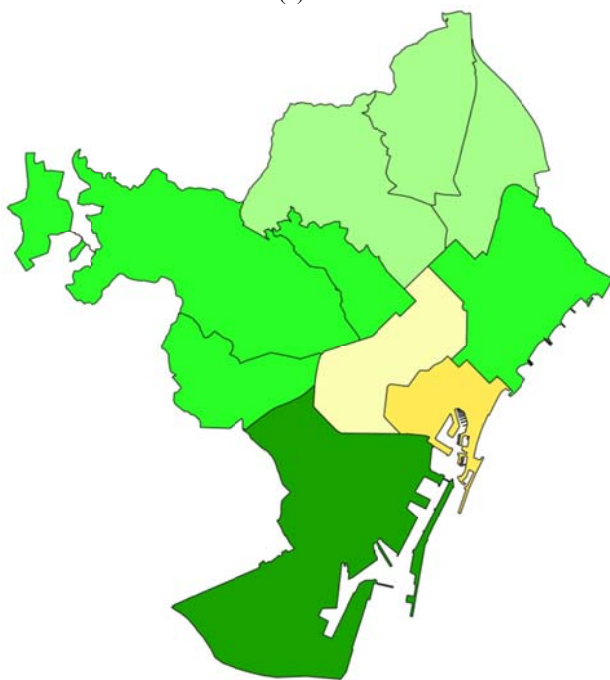


(c)

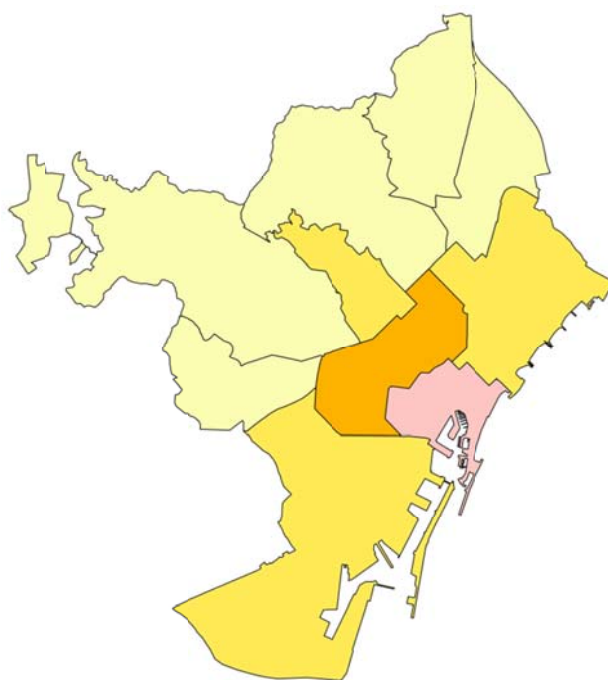
Figura 6-27. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5 en cada distrito de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).



(a)

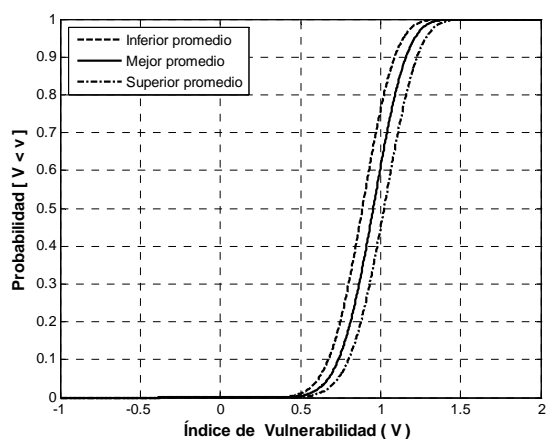


(b)

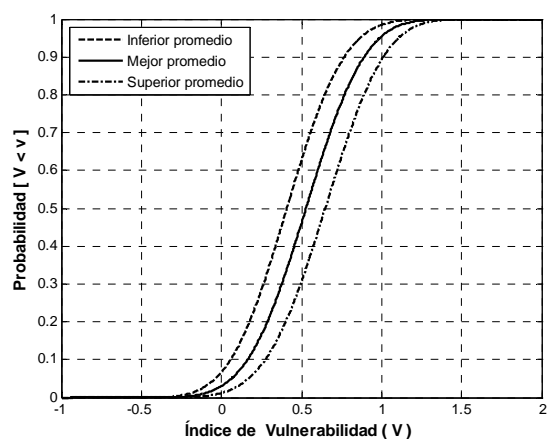


(c)

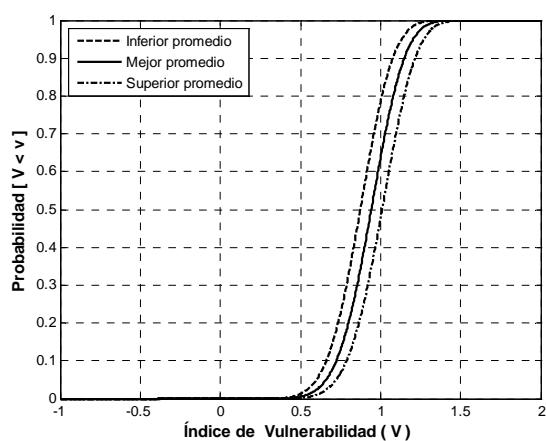
Figura 6-28. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 en cada distrito de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).



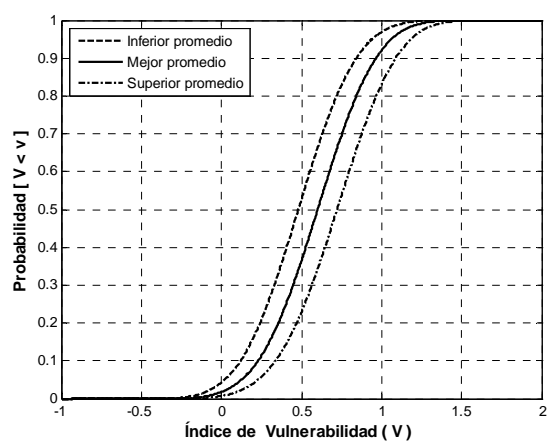
(a.1)



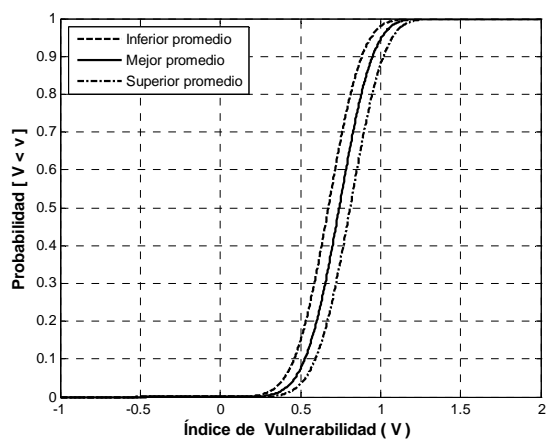
(b.1)



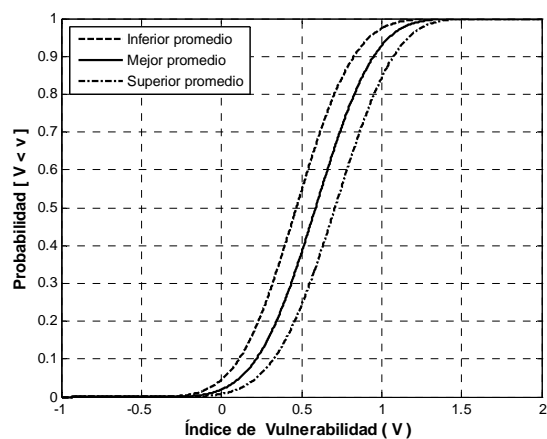
(a.2)



(b.2)



(a.3)



(b.3)

Figura 6-29. Curvas de vulnerabilidad sísmica promedio de los edificios de mampostería (a) y hormigón (b) de los distritos de Ciutat Vella (1), del Eixample (2) y de Nou Barris (3).

Tabla 6-24. Parámetros que definen a cada una de las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería y de hormigón de cada distrito de Barcelona.

Distrito	Tipología	Curva Inferior promedio				Curva Mejor Promedio				Curva Superior promedio			
		α_L	β_L	$\overline{V_{I-L}}$	σ_L	α_m	β_m	$\overline{V_I}$	$\sigma_{\overline{V}}$	α_U	β_U	$\overline{V_{I-U}}$	σ_U
Ciutat Vella	1 Mampostería	50.27	29.81	0.88	0.16	48.69	26.21	0.95	0.16	47.20	23.01	1.02	0.17
	2 Hormigón	13.58	15.31	0.41	0.27	14.01	13.51	0.53	0.28	14.57	12.01	0.64	0.28
Eixample	1 Mampostería	49.87	30.11	0.87	0.16	48.03	26.31	0.94	0.17	47.35	23.51	1.00	0.17
	2 Hormigón	13.74	14.11	0.48	0.28	14.26	12.51	0.60	0.28	14.45	10.81	0.72	0.29
Sants-Montjuïc	1 Mampostería	48.57	32.21	0.80	0.16	48.55	29.31	0.87	0.16	47.59	26.11	0.94	0.17
	2 Hormigón	13.57	14.91	0.43	0.28	14.06	13.21	0.55	0.28	14.46	11.61	0.66	0.29
Les Corts	1 Mampostería	47.02	33.91	0.74	0.16	47.77	31.41	0.81	0.16	47.78	28.61	0.88	0.17
	2 Hormigón	13.71	14.21	0.47	0.28	14.23	12.61	0.59	0.28	14.44	10.91	0.71	0.29
Sarrià-Sant Gervasi	1 Mampostería	46.06	34.01	0.73	0.16	46.96	31.61	0.79	0.16	46.86	28.71	0.86	0.17
	2 Hormigón	13.64	14.71	0.44	0.28	14.11	13.01	0.56	0.28	14.48	11.41	0.68	0.29
Gràcia	1 Mampostería	48.13	32.81	0.78	0.16	48.49	30.11	0.85	0.16	47.66	26.91	0.92	0.17
	2 Hormigón	13.65	14.91	0.43	0.28	14.03	13.11	0.55	0.28	14.42	11.51	0.67	0.29
Horta-Guinardó	1 Mampostería	44.56	35.31	0.67	0.17	45.82	33.11	0.74	0.17	46.19	30.41	0.81	0.17
	2 Hormigón	13.66	14.91	0.43	0.28	14.04	13.11	0.55	0.28	14.56	11.61	0.67	0.29
Nou Barris	1 Mampostería	45.11	35.81	0.67	0.16	46.41	33.61	0.74	0.16	46.98	31.01	0.81	0.17
	2 Hormigón	13.91	14.51	0.47	0.28	14.25	12.71	0.59	0.28	14.47	11.01	0.70	0.29
Sant Andreu	1 Mampostería	45.01	34.71	0.69	0.17	46.24	32.51	0.76	0.17	46.25	29.61	0.83	0.17
	2 Hormigón	13.71	14.61	0.45	0.28	14.17	12.91	0.57	0.28	14.55	11.31	0.69	0.29
Sant Martí	1 Mampostería	49.05	32.21	0.81	0.16	49.17	29.41	0.88	0.16	48.20	26.21	0.94	0.17
	2 Hormigón	13.75	14.41	0.46	0.28	14.19	12.71	0.58	0.28	14.41	11.01	0.70	0.29

En la Figura 6-30 se muestra la probabilidad de que en cada distrito de Barcelona el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.8 en los edificios de mampostería y en los de hormigón, respectivamente. Al observar dicha figura es posible confirmar la mayor vulnerabilidad de los edificios de mampostería con respecto a los de hormigón. Es posible observar también que si únicamente se consideran los mapas de vulnerabilidad correspondientes a los edificios de mampostería, entonces, los distritos de Nou Barris, Les-Corts, Horta-Guinardó, Sant Andreu y Sarrià-Sant Gervasi son los de menor vulnerabilidad, con lo cual se obtiene una conclusión similar a la obtenida a analizar la vulnerabilidad generada por todos los edificios de cada distrito (Figura 6-27 y Figura 6-28). Sin embargo, al observar los mapas de vulnerabilidad debidos a los edificios de hormigón, es posible identificar que las diferencias entre la vulnerabilidad de un distrito y otro es mínima (Figura 6-30), por ejemplo, de acuerdo con las curvas Mejor de la vulnerabilidad en los distritos de Nou Barris, Sant Andreu, Sant Martí, Eixample, Sarrià-Sant Gervasi y Les Corts, la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.8 está entre el 20% y el 30%, mientras que para los cinco distritos restantes dicha probabilidad está entre el 10% y 20%.

Por otra parte, se obtuvieron curvas de vulnerabilidad sísmica por barrio. Por ejemplo, en la Figura 6-31 se muestran las curvas de vulnerabilidad sísmica de los barrios de Parc y de Sagrera. De acuerdo con dicha figura, en el barrio de Sagrera hay una probabilidad entre el 53.12% y el 77.79%, con un valor medio del 66.9% de que el índice de vulnerabilidad sísmica sea mayor que 0.5. Mientras que en el caso

del barrio Parc la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5, está entre el 95.28% y el 98.66%, con un valor medio del 97.38%. Al mismo tiempo, en el barrio de Sagrera hay una probabilidad entre el 1.51% y el 8.17%, con un valor medio del 4.08% de que el índice de vulnerabilidad sísmica sea mayor que 1. Mientras que en el caso del barrio de Parc la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 1, está entre el 21.07% y el 45.78%, con un valor medio del 32.86%. Por otra parte, si se hace este análisis extensivo al resto de los barrios, es posible concluir que el barrio de Parc es uno de los barrios de la ciudad con mayor vulnerabilidad sísmica, y el de Sagrera es uno de los barrios de menor vulnerabilidad sísmica en la ciudad. En la Tabla 6-26 se incluyen los parámetros que definen a cada una de las curvas de vulnerabilidad sísmica de los barrios de Barcelona, y en la Tabla 6-27, se indican probabilidades de que en cada barrio de Barcelona el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8 y 1.0. Tal información permite identificar, por ejemplo, que hay distritos cuyos barrios tienen diferencias importantes en sus niveles de vulnerabilidad sísmica. Por ejemplo, en el distrito de Gràcia, en el barrio del mismo nombre hay una probabilidad entre el 9.2% y el 30.21%, con un valor medio del 18.46% de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 1, mientras que en el otro barrio denominado Vallcarca, dicha probabilidad varía entre el 3.41% y el 14.56%, con un valor medio de 7.99% (Tabla 6-27).

Tabla 6-25. Probabilidades en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los edificios de mampostería y hormigón de los distritos de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica.

Distrito	Tipología	P($V > 0.5$)			P($V > 0.8$)			P($V > 1.0$)		
		Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior
Ciutat Vella	1 Mampostería	98.96	99.58	99.83	70.09	81.93	89.90	23.88	39.04	55.12
	2 Hormigón	37.20	53.85	69.32	8.01	17.02	29.99	1.55	4.58	10.72
Eixample	1 Mampostería	98.72	99.47	99.80	67.32	79.89	88.68	21.52	36.33	52.23
	2 Hormigón	47.16	63.45	76.97	12.96	24.50	39.61	3.10	7.90	16.85
Sants-Montjuïc	1 Mampostería	96.68	98.62	99.44	51.53	67.14	79.61	11.31	21.86	36.15
	2 Hormigón	39.94	56.56	71.49	9.27	18.96	32.60	1.91	5.38	12.29
Les Corts	1 Mampostería	92.90	96.82	98.67	36.89	53.02	68.24	5.61	12.31	23.14
	2 Hormigón	46.17	62.46	76.24	12.42	23.64	38.62	2.91	7.49	16.18
Sarrià-Sant Gervasi	1 Mampostería	91.25	95.97	98.26	33.07	48.93	64.63	4.59	10.41	20.38
	2 Hormigón	41.92	58.49	73.04	10.19	20.41	34.42	2.18	6.01	13.40
Gràcia	1 Mampostería	95.70	98.19	99.25	46.66	62.71	76.24	9.10	18.30	31.67
	2 Hormigón	40.54	57.12	71.95	9.50	19.41	33.20	1.97	5.59	12.67
Horta-Guinardó	1 Mampostería	85.12	92.53	96.56	22.58	36.73	52.77	2.26	5.74	12.60
	2 Hormigón	40.62	57.19	72.13	9.53	19.46	33.21	1.98	5.61	12.61
Nou Barris	1 Mampostería	85.09	92.53	96.60	22.18	36.27	52.34	2.15	5.50	12.15
	2 Hormigón	45.45	61.84	75.74	11.85	23.06	37.90	2.69	7.20	15.67
Sant Andreu	1 Mampostería	87.72	94.06	97.31	26.42	41.38	57.49	3.02	7.31	15.41
	2 Hormigón	43.19	59.71	74.16	10.79	21.34	35.73	2.36	6.41	14.20
Sant Martí	1 Mampostería	97.03	98.79	99.51	53.27	68.63	80.74	12.11	22.95	37.48
	2 Hormigón	44.98	61.41	75.38	11.72	22.75	37.52	2.66	7.07	15.45

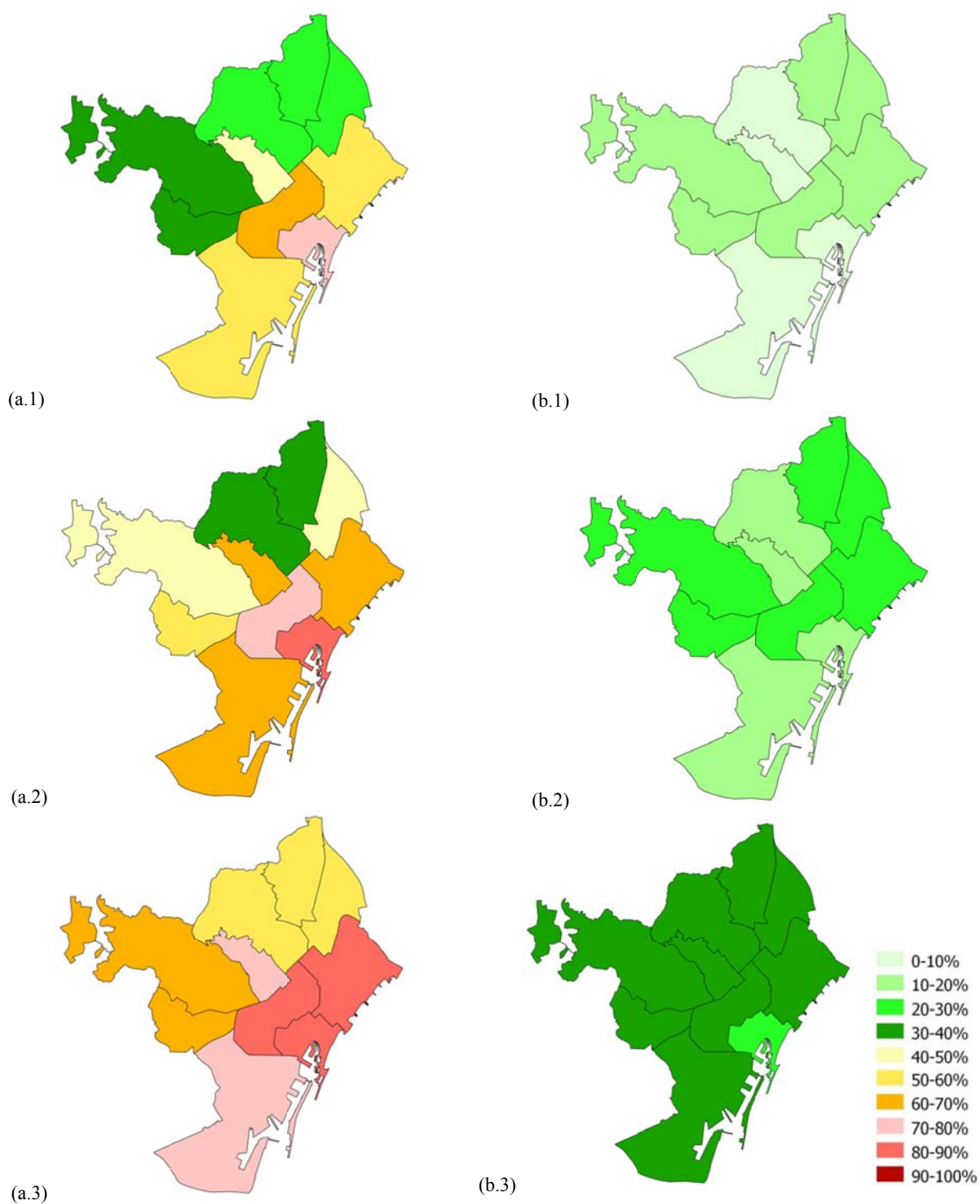


Figura 6-30. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 en los edificios de mampostería (a) y en los de hormigón (b) de los distritos de Barcelona, de acuerdo con sus respectivas curvas de vulnerabilidad Inferior (1), Mejor (2), y Superior (3) .

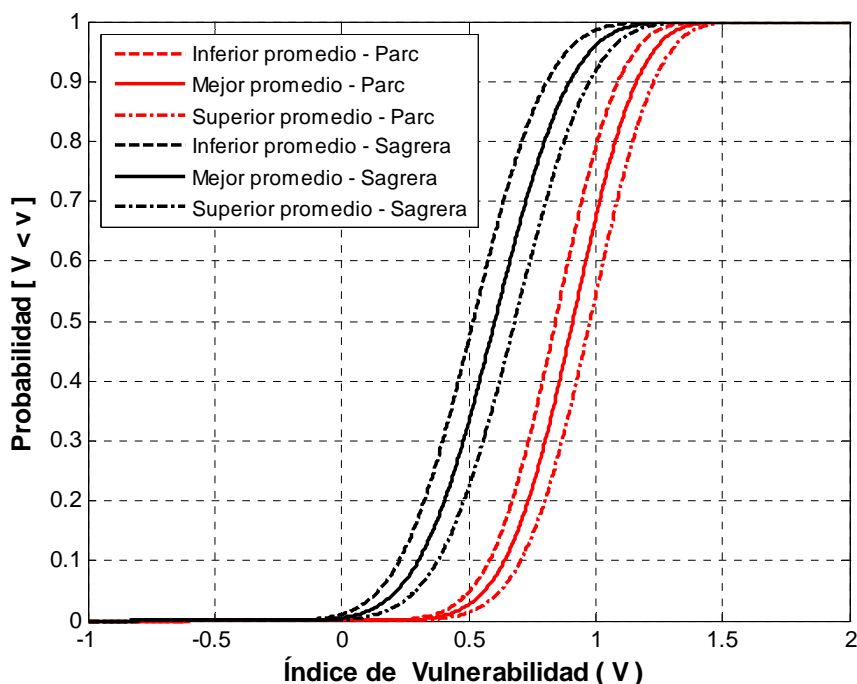


Figura 6-31. Curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica del barrio de Parc del distrito de Ciutat Vella, y del barrio de Sagrera del distrito de Sant Andreu.

Para facilitar la comparación entre los barrios de cada distrito es posible dibujar sus correspondientes curvas de vulnerabilidad, como en el caso de la Figura 6-32, en la que se muestran las curvas de vulnerabilidad de los barrios del distrito del Eixample. De acuerdo con dichas curvas, en el barrio de Sant Antoni hay una probabilidad entre el 90.2% y el 96.8%, con un valor medio del 94.2% de que el índice de vulnerabilidad sísmica sea mayor que 0.5. Mientras que en el barrio de Dreta Eixample hay una probabilidad entre el 73.84% y el 89.92%, con un valor medio del 82.91% de que el índice de vulnerabilidad sísmica sea mayor que 0.5.

Por otra parte, al analizar las curvas de vulnerabilidad de la Figura 6-32, se puede concluir que dentro del distrito del Eixample el barrio con mayor vulnerabilidad sísmica es el de Sant Antoni, y el de menor vulnerabilidad sísmica es el de Dreta Eixample.

Tabla 6-26. Parámetros que definen a cada una de las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de los barrios de Barcelona.

Distrito	Barrio	Curva Inferior promedio				Curva Mejor Promedio				Curva Superior promedio			
		α_L	β_L	$\overline{V_{I_L}}$	σ_L	α_m	β_m	$\overline{V_I}$	$\sigma_{\overline{V}}$	α_U	β_U	$\overline{V_{I_U}}$	σ_U
Ciutat Vella	01 Barceloneta	29.98	21.21	0.76	0.20	29.80	19.11	0.83	0.21	29.21	17.01	0.90	0.21
	02 Parc	32.92	20.81	0.84	0.2	31.85	18.31	0.9	0.2	31.46	16.41	0.97	0.2
	03 Gòtic	33.39	21.21	0.83	0.2	32.42	18.71	0.9	0.2	31.89	16.71	0.97	0.2
	04 Raval	31.79	20.21	0.83	0.2	30.84	17.81	0.9	0.21	30.4	15.91	0.97	0.21
Eixample	05 Sant Antoni	25.91	17.51	0.79	0.22	25.13	15.31	0.86	0.23	25.02	13.71	0.94	0.23
	06 Esquerra Eixample	22.38	16.21	0.74	0.24	21.77	14.11	0.82	0.24	21.56	12.51	0.9	0.24
	07 Dreta Eixample	19.00	15.31	0.66	0.25	18.36	13.11	0.75	0.26	18.74	11.81	0.84	0.26
	08 Estació Nord	21.55	16.71	0.69	0.24	21.34	14.81	0.77	0.24	21.24	13.21	0.85	0.24
	09 Sagrada Família	23.62	16.51	0.77	0.23	22.87	14.21	0.85	0.24	22.48	12.51	0.93	0.24
Sants-Montjuïc	10 Poble –sec	24.06	18.91	0.68	0.22	23.59	16.61	0.76	0.23	23.51	14.91	0.84	0.23
	11 Montjuïc	21.56	17.61	0.65	0.24	20.96	15.21	0.74	0.24	20.7	13.51	0.82	0.25
	12 Zona Franca-Port	20.09	17.31	0.61	0.24	19.65	15.01	0.7	0.25	19.56	13.41	0.78	0.25
	13 Font de la Guatlla	26.36	18.41	0.77	0.22	25.61	16.11	0.84	0.22	25.41	14.41	0.91	0.23
	14 Bordeta-Hostafrancs	26.76	20.41	0.7	0.21	26.67	18.31	0.78	0.22	26.41	16.31	0.85	0.22
	15 Sants	16.41	16.31	0.5	0.26	16.24	14.21	0.6	0.27	16.72	13.01	0.69	0.27
Les Corts	16 Les Corts	19.23	16.21	0.63	0.25	19.31	14.51	0.71	0.25	19.22	12.91	0.79	0.26
	17 Pedralbes	18.01	16.61	0.56	0.25	17.8	14.51	0.65	0.26	18.03	13.11	0.74	0.26
Sarrià-Sant Gervasi	18 Sant Gervasi	22.64	18.91	0.63	0.23	22.39	16.61	0.72	0.23	22.05	14.61	0.8	0.24
	19 Sarrià	25.61	21.51	0.63	0.22	25.18	18.91	0.71	0.22	25.21	17.01	0.79	0.22
	20 Vallvidrera-Les Planes	26.39	23.71	0.58	0.21	26.46	21.41	0.66	0.21	27.23	20.01	0.73	0.21
Gràcia	21 Gràcia	27.53	20.51	0.72	0.21	27.29	18.11	0.8	0.22	26.71	15.91	0.88	0.22
	22 Vallcarca	22.89	20.21	0.59	0.23	22.68	17.91	0.68	0.23	23.05	16.41	0.75	0.23
Horta-Guinardó	23 Guinardó	24.51	20.91	0.62	0.22	23.79	18.01	0.71	0.23	23.83	16.21	0.79	0.23
	24 Horta	26.72	22.81	0.62	0.21	25.73	19.51	0.71	0.22	27.34	19.01	0.77	0.21
	25 Vall d'Hebron	23.17	21.11	0.57	0.22	23.18	18.91	0.65	0.23	23.63	17.41	0.73	0.23
Nou Barris	26 Viliapicina-Turó de la Peira	26.6	22.71	0.62	0.21	26.54	20.41	0.7	0.21	27.12	18.91	0.77	0.22
	27 Roquetes-Verdum	23.11	21.11	0.57	0.22	22.82	18.51	0.66	0.23	23.13	16.81	0.74	0.23
	28 Ciutat Meridiana-Vallbona	26.94	22.21	0.64	0.21	26.48	19.51	0.73	0.22	26.39	17.51	0.8	0.22
Sant Andreu	29 Sagrera	21.92	21.41	0.52	0.23	21.88	19.11	0.6	0.23	22.62	17.81	0.68	0.23
	30 Congrés	22.9	19.41	0.62	0.23	22.82	17.21	0.71	0.23	23.37	15.81	0.79	0.23
	31 Sant Andreu	19.68	17.01	0.61	0.24	19.83	15.31	0.69	0.25	19.96	13.81	0.77	0.25
	32 Bon Pastor	27.9	22.01	0.68	0.21	24.59	16.81	0.78	0.23	24.6	15.21	0.85	0.23
	33 Trinitat Vella	24.57	22.51	0.57	0.22	24.57	20.21	0.65	0.22	25.25	18.81	0.72	0.22
Sant Martí	34 Fort Pius	20.65	18.81	0.57	0.24	20.26	16.51	0.65	0.24	21.09	15.31	0.74	0.24
	35 Poblenou	25.19	19.01	0.71	0.22	24.85	16.81	0.79	0.23	23.98	14.51	0.87	0.23
	36 Barris Besòs	16.59	15.11	0.57	0.26	16.32	13.11	0.66	0.27	16.23	11.61	0.75	0.28
	37 Clot	25.8	20.51	0.67	0.22	25.18	17.91	0.75	0.22	25.07	16.01	0.83	0.23
	38 Verneda	12.65	12.31	0.52	0.29	12.3	10.41	0.62	0.31	12.55	9.11	0.74	0.31

Tabla 6-27. Probabilidad en porcentaje de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5, 0.8, y 1.0, en los barrios de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada barrio.

Distrito	Barrio	P($V > 0.5$)			P($V > 0.8$)			P($V > 1.0$)		
		Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior	Inferior	Mejor	Superior
Ciutat Vella	01 Barceloneta	89.23	93.92	96.58	42.40	56.10	68.09	11.78	20.76	32.04
	02 Parc	95.28	97.38	98.66	58.33	70.27	80.03	21.07	32.86	45.78
	03 Gòtic	95.24	97.41	98.66	57.70	69.96	79.78	20.36	32.20	45.13
	04 Raval	94.80	97.10	98.49	57.44	69.48	79.37	20.88	32.57	45.46
Eixample	05 Sant Antoni	90.17	94.16	96.79	49.05	61.92	73.16	17.43	28.30	40.64
	06 Esquerra Eixample	84.29	90.30	94.29	40.73	54.24	66.33	13.62	23.53	35.16
	07 Dreta Eixample	73.84	82.91	89.92	29.69	43.34	57.09	8.86	17.22	27.98
	08 Estació Nord	78.59	86.47	91.80	32.81	46.12	58.88	9.57	17.60	27.92
	09 Sagrada Família	87.23	92.58	95.71	44.93	59.25	70.75	15.71	27.21	39.51
Sants-Montjuïc	10 Poble –sec	78.65	86.76	92.06	30.22	44.01	56.94	7.61	15.14	24.78
	11 Montjuïc	73.84	83.38	89.42	26.94	40.85	53.38	6.84	14.31	23.47
	12 Zona Franca-Port	67.72	78.78	86.17	22.20	35.29	47.76	5.27	11.58	19.73
	13 Font de la Guatlla	88.54	93.22	96.19	44.67	58.17	69.89	14.39	24.62	36.44
	14 Bordeta-Hostafrances	82.49	89.65	94.16	32.97	46.92	60.53	8.11	15.68	26.25
	15 Sants	50.71	64.55	75.52	12.94	23.24	34.55	2.68	6.67	12.39
Les Corts	16 Les Corts	69.62	79.87	87.11	24.88	37.28	50.12	6.57	12.87	21.74
	17 Pedralbes	59.52	72.14	81.48	17.40	29.12	41.39	3.91	8.99	16.07
Sarrià-Sant Gervasi	18 Sant Gervasi	72.07	82.57	89.39	23.99	37.80	51.64	5.40	11.92	21.28
	19 Sarrià	72.67	83.02	89.95	21.96	35.44	49.29	4.15	9.72	17.92
	20 Vallvidrera-Les Planes	64.87	76.94	85.59	14.93	25.79	37.71	2.11	5.31	10.22
Gràcia	21 Gràcia	84.70	91.62	95.35	35.81	51.42	64.87	9.20	18.46	30.21
	22 Valldaroca	66.00	77.56	85.79	18.28	30.23	42.72	3.41	7.99	14.56
Horta-Guinardó	23 Guinardó	70.52	81.71	88.89	20.83	34.87	48.34	3.97	9.87	17.91
	24 Horta	71.25	82.51	89.22	19.72	34.04	45.14	3.32	8.88	14.29
	25 Vall d'Hebron	62.27	74.71	83.72	15.31	26.29	38.29	2.53	6.18	11.73
Nou Barris	26 Vilapicena-Turó de la Peira	71.19	81.70	88.96	19.77	31.99	44.79	3.35	7.74	14.16
	27 Roquetes-Verdum	61.93	75.11	84.44	15.13	27.10	40.13	2.49	6.60	12.96
	28 Ciutat Meridiana-Vallbona	75.21	85.07	91.28	23.43	37.55	51.44	4.42	10.37	18.89
Sant Andreu	29 Sagrera	53.12	66.90	77.79	10.68	19.86	30.59	1.51	4.08	8.17
	30 Congrés	70.62	81.53	88.97	22.31	35.66	49.06	4.74	10.60	18.65
	31 Sant Andreu	67.22	78.02	85.87	22.14	34.01	46.66	5.33	10.81	18.70
	32 Bon Pastor	80.00	88.98	93.47	28.30	47.65	60.10	5.94	17.08	26.92
	33 Trinitat Vella	61.90	74.48	83.68	14.12	24.73	36.45	2.09	5.29	10.20
Sant Martí	34 Fort Pius	61.64	73.44	83.43	16.76	27.84	40.77	3.27	7.59	14.20
	35 Poblenou	82.64	89.66	93.96	34.82	48.98	62.47	9.41	17.88	29.54
	36 Barris Besòs	60.50	72.60	81.35	19.46	31.46	43.65	4.97	10.79	18.66
	37 Clot	78.39	86.89	92.42	28.16	42.45	56.25	6.33	13.52	23.30
	38 Verneda	52.76	65.70	77.50	17.62	29.25	43.26	5.18	11.34	20.81

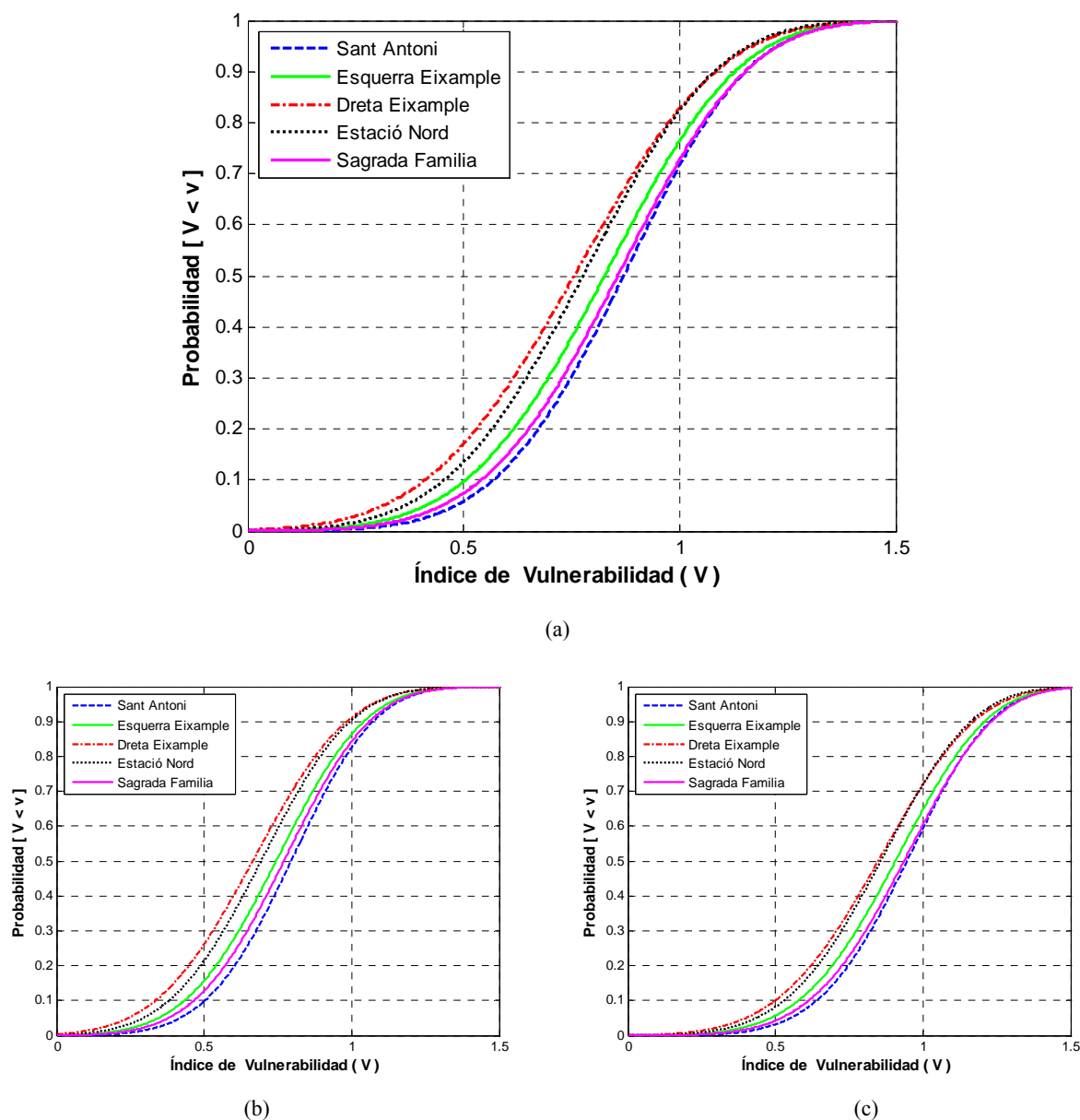


Figura 6-32. Curvas Mejores promedio (a), Inferiores promedio (b) y Superiores promedio (c) de la vulnerabilidad sísmica de cada uno de los 5 barrios del distrito del Eixample.

Por otra parte, a partir de la definición de las curvas de la vulnerabilidad de cada barrio es posible generar mapas como el de la Figura 6-34 y la Figura 6-35, en las que se indica la probabilidad de que en cada barrio el índice de vulnerabilidad sísmica promedio sea mayor que 0.5 y 0.8, respectivamente. A partir de dichos mapas, es posible observar que existen distritos en los que la vulnerabilidad sísmica de sus barrios es homogénea, tal es el caso del distrito de Ciutat Vella, en la que en general sus cuatro barrios tienen una alta vulnerabilidad sísmica. Por ejemplo, de acuerdo con la Figura 6-34 (a) todos los barrios de este distrito tienen una probabilidad entre el 90 y el 100% de que su índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5.

Adicionalmente, es posible observar distritos como el de Sants-Montjuïc en el que hay barrios que tienen diferencias importantes con respecto a la vulnerabilidad sísmica de otros barrios del mismo distrito. Por ejemplo, de acuerdo con la Figura 6-34 (a) en este distrito hay un barrio que tiene una probabilidad entre el 60 y 70% de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5, pero también hay un barrio que tiene una probabilidad entre el 90 y el 100% de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5.

Para completar el análisis de la vulnerabilidad sísmica de Barcelona, es posible hacer un análisis a escala de edificio. Para tal fin, es posible generar mapas como el de la Figura 6-36, que en este caso muestran la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5, en cada edificio del distrito del Eixample. En dicha figura se muestran tres mapas, los cuales surgen al considerar por separado la curva Inferior, la curva Mejor y la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio. Es posible observar en los tres mapas que predominan los edificios en los que hay una probabilidad entre el 90 y el 100% de que tengan un índice de vulnerabilidad mayor a 0.5, razón por la cual el distrito del Eixample es uno de los distritos con mayor vulnerabilidad sísmica en Barcelona. Sin embargo, es posible observar también que en dicho distrito existen algunos edificios en los que hay una probabilidad entre el 20 y el 40% de que tengan un índice de vulnerabilidad mayor a 0.5. En la Figura 6-33 se muestran las curvas de vulnerabilidad sísmica de uno de los edificios de mayor vulnerabilidad en el distrito del Eixample, y también las curvas de vulnerabilidad sísmica de uno de los edificios de menor vulnerabilidad en dicho distrito. El de mayor vulnerabilidad corresponde a un edificio de mampostería no reforzada y el de menor vulnerabilidad a uno de hormigón armado.

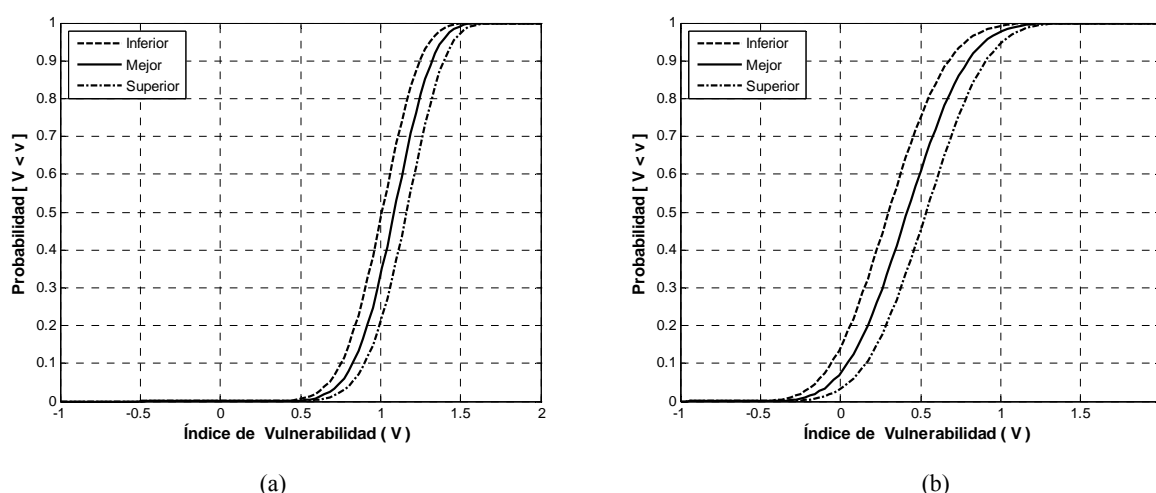


Figura 6-33. Curvas de vulnerabilidad sísmica de uno de los edificios de mayor vulnerabilidad sísmica (a), y uno de los edificios de menor vulnerabilidad sísmica (b), del distrito del Eixample.

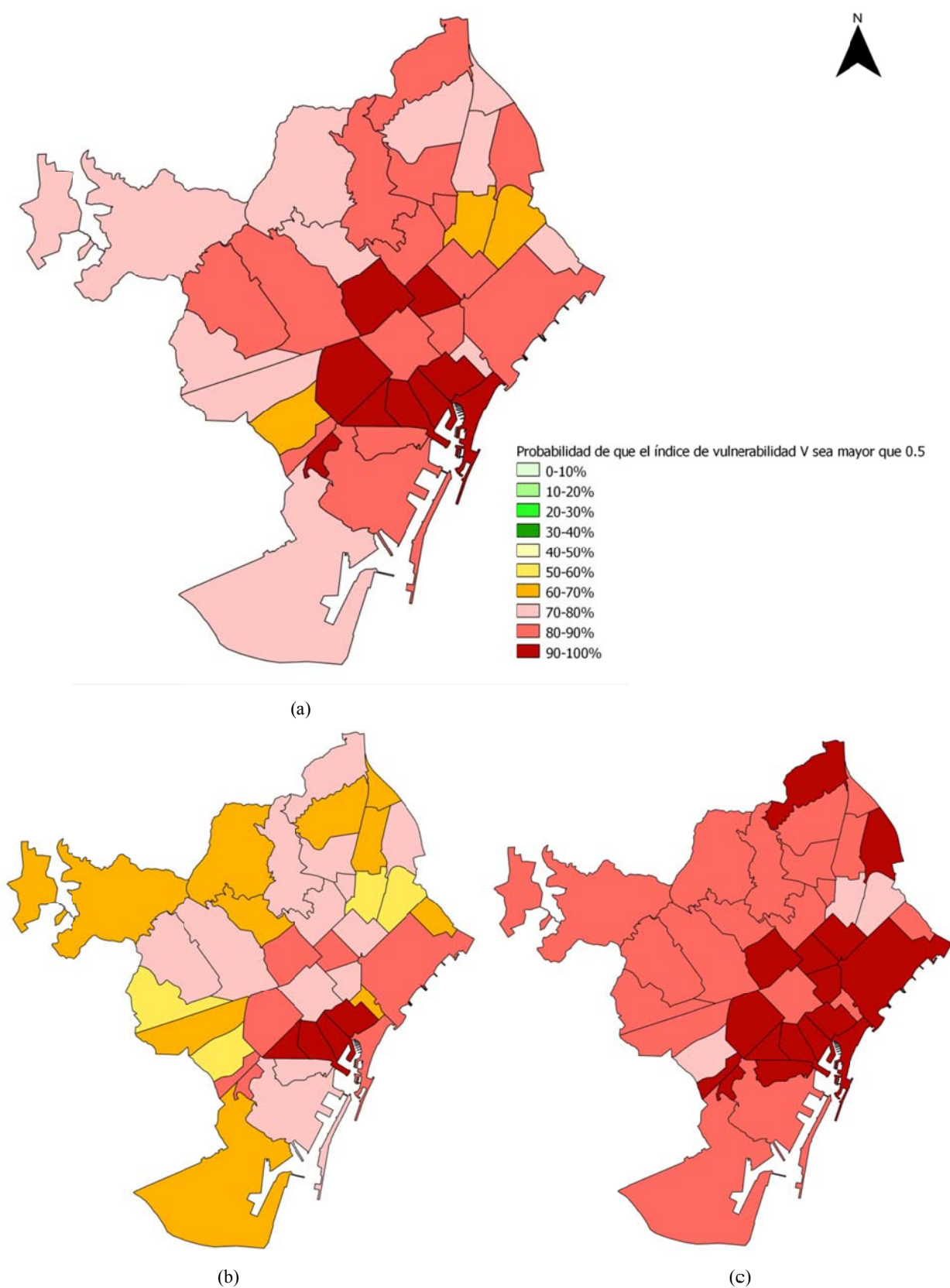


Figura 6-34. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.5 en cada barrio de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).

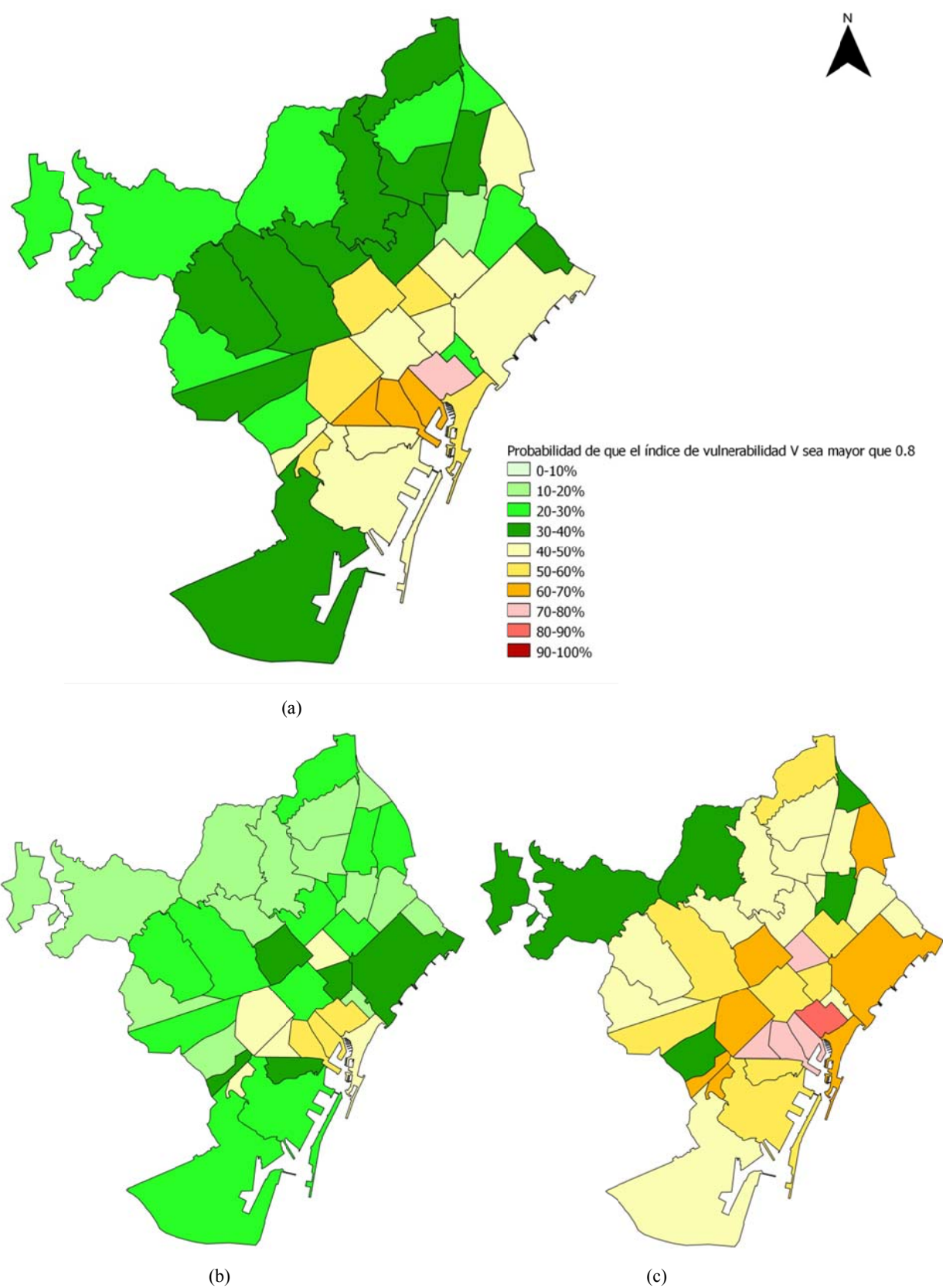


Figura 6-35. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad V sea mayor que 0.8 en cada barrio de Barcelona, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c).

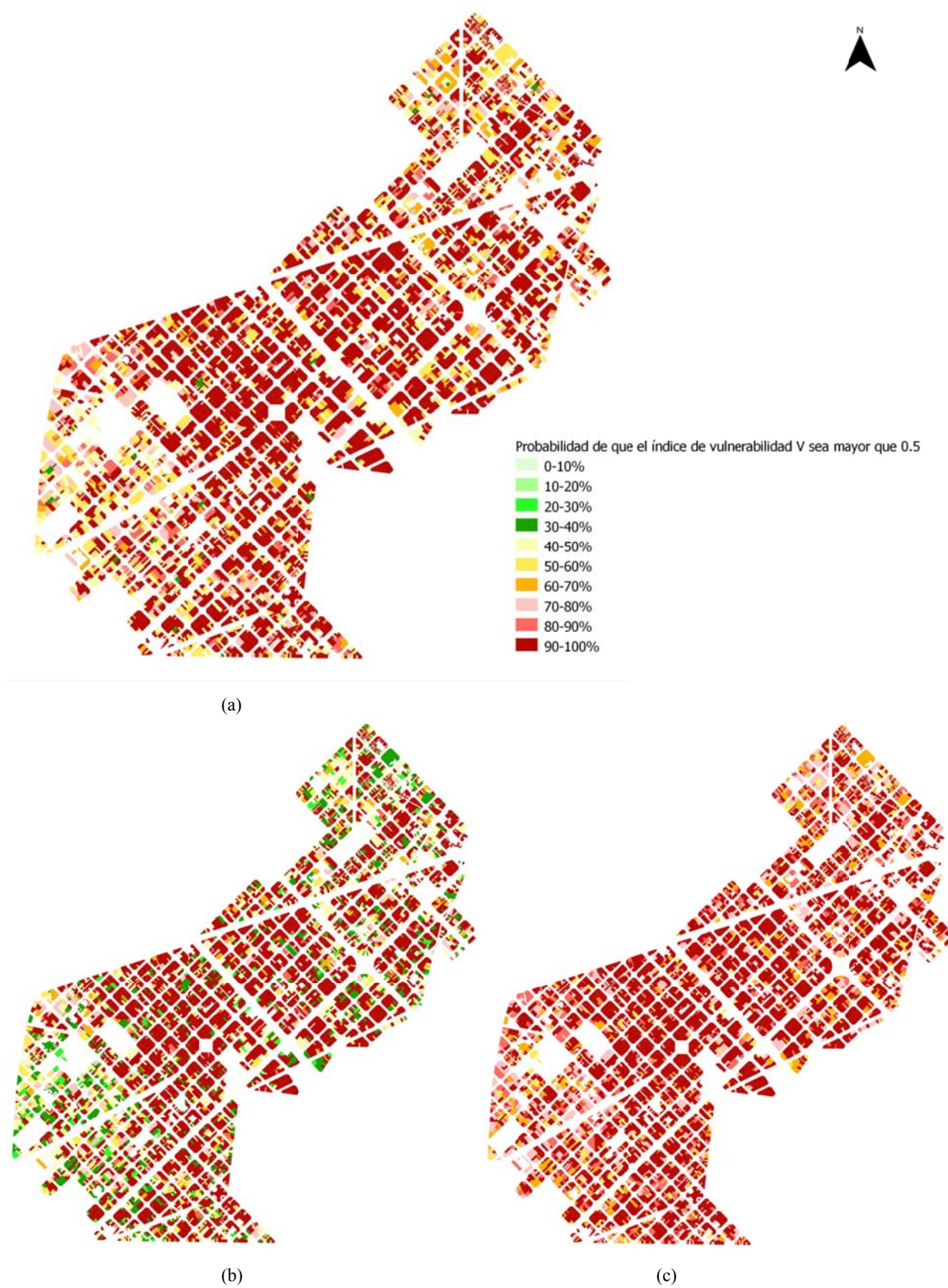


Figura 6-36. Probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 0.5 en cada edificio del distrito del Eixample, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad sísmica Mejor (a), Inferior (b), y Superior (c).

6.6 Discusión

En el presente capítulo ha sido posible observar que el método LM1_P ofrece una mejora importante con respecto al método LM1, porque mientras en este último método la vulnerabilidad sísmica de los edificios se representa mediante un valor único del índice de vulnerabilidad, en el método LM1_P la vulnerabilidad sísmica de los edificios se representa mediante tres curvas de vulnerabilidad que describen la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad tome diferentes valores. Dichas curvas de vulnerabilidad corresponden a funciones de probabilidad beta y por lo tanto se definen mediante los parámetros α y β . Por lo tanto, la diferencia en la forma en que es representada la vulnerabilidad sísmica de los edificios en el método LM1 con respecto al método LM1_P es relevante, porque mediante las curvas de vulnerabilidad es posible considerar incertidumbres presentes en la estimación de la vulnerabilidad sísmica, y además representar los resultados de vulnerabilidad con sus respectivos niveles de incertidumbre. Esto último es muy importante porque es un modelo que permite hacer una representación adecuada de la vulnerabilidad sísmica de los edificios a nivel de zonas urbanas. Por ejemplo, al aplicar el método LM1 la vulnerabilidad sísmica de Barcelona se representa mediante un valor promedio del índice de vulnerabilidad igual a 0.75. Mientras que al aplicar el método LM1_P la vulnerabilidad sísmica se representa mediante las curvas promedio de la vulnerabilidad sísmica de la Figura 6-22, una de las cuales corresponde a la curva Mejor promedio. Esta última curva está definida por los parámetros de α igual a 27.2 y β igual a 19.31, y además se caracteriza por tener un valor medio igual a 0.75, y una desviación estándar igual a 0.21.

En el presente estudio se confirmó que el distrito de Ciutat Vella es el de mayor vulnerabilidad sísmica de Barcelona, debido a que el porcentaje de edificios de mampostería del distrito es del 88.5%, los cuales tienen en general una vulnerabilidad sísmica alta. Por ejemplo, en dichos edificios hay una probabilidad que varía entre el 70.09% y el 89.90%, con un valor medio del 81.93% de que el índice de vulnerabilidad sísmica sea mayor que 0.8 (Tabla 6-25). Al mismo tiempo, es posible identificar que uno de los distritos con menor vulnerabilidad es el de Nou Barris, distrito en el que los edificios de mampostería representan el 70.6% del total de edificios, y en los cuales hay una probabilidad que varía entre el 22.18% y el 52.34%, con un valor medio del 36.27% de que el índice de vulnerabilidad sísmica sea mayor que 0.8 (Tabla 6-25).

Por otra parte, en función de los resultados obtenidos es posible afirmar que la edad de los edificios es un factor que tiene una influencia importante en los niveles de su vulnerabilidad sísmica. Por ejemplo, en el distrito del Eixample, Sant Antoni es el barrio que tiene la mayor antigüedad promedio y también es el barrio que tiene la mayor vulnerabilidad sísmica en dicho distrito, y uno de los barrios de mayor vulnerabilidad sísmica de la ciudad. Además, como se mencionó anteriormente, el barrio de Sant Antoni es uno de los barrios con mayor densidad de población de la ciudad, por lo tanto en este sitio confluyen

diversos factores que deben ser considerados durante la gestión del riesgo sísmico de la ciudad. De manera similar se identificó que el barrio de Sagrera es uno de los barrios con menor vulnerabilidad sísmica de la ciudad.

Al comparar los resultados del presente estudio con los de Lantada (2007) es posible identificar similitudes con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Por ejemplo, Lantada (2007) estimó un índice de vulnerabilidad promedio de 0.89 para los edificios de mampostería de Barcelona, con índices que iban desde 0.7 hasta valores máximos de 1. Mientras que para los edificios de hormigón armado, estimó un índice de vulnerabilidad promedio de 0.66, a partir de índices de vulnerabilidad que variaban entre 0.4 y 0.9. En el caso del presente trabajo los resultados indican que la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería está representada por tres curvas de vulnerabilidad promedio, Inferior, Mejor y Superior, cuyos valores medios son 0.77, 0.83 y 0.90, respectivamente, con desviaciones estándar de 0.16. Mientras que la vulnerabilidad sísmica de los edificios de hormigón está representada por tres curvas de vulnerabilidad promedio, Inferior, Mejor y Superior, cuyos valores medios son 0.45, 0.57, y 0.69, respectivamente, con desviaciones estándar de 0.28. Es posible concluir, que los valores medios obtenidos por Lantada (2007) están contenidos dentro de los intervalos de valores medios de las curvas de vulnerabilidad obtenidas en el presente trabajo. Además, es conveniente tener presente que el estudio de Lantada (2007) se basó en una base de datos ligeramente distinta a la base de datos empleada en el presente trabajo. A diferencia del trabajo realizado por Lantada et al (2009b), en el que ya se empleó la misma base de datos de los edificios que la utilizada en el presente trabajo. Por tal motivo, las similitudes de los resultados obtenidos por Lantada et al (2009b), con los resultados de vulnerabilidad estimados en el presente trabajo son importantes.

Por otra parte, es importante señalar que la metodología LM1_P considera la posibilidad de que el índice de vulnerabilidad de los edificios pueda ser mayor que 1 y menor que 0, lo cual se ve reflejado en las curvas de vulnerabilidad sísmica obtenidas en el presente trabajo. Específicamente, en dichas curvas el intervalo de valores posibles del índice de vulnerabilidad está delimitado por -1 y 2. Intervalo de valores que permite hacer una adecuada representación de edificios con muy poca o nula vulnerabilidad sísmica y edificios con una alta vulnerabilidad sísmica, siendo este último caso el que más se presenta en Barcelona. Es importante destacar que en el método LM1_P los valores del índice de vulnerabilidad sísmica de 0 y 1 tienen el mismo significado que el establecido en el método LM1 de Risk-UE. Sin embargo, la ampliación del intervalo de valores del índice de vulnerabilidad realizada para el caso de Barcelona, se apoya en el hecho de que en los documentos base del método LM1 (Giovinazzi, 2005; Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Grünthal, 1998) se reconoce que habrá edificios con índices de vulnerabilidad mayor a 1 y también edificios con índices de vulnerabilidad menor a 0.

6.7 Resumen y conclusiones

En el presente capítulo se describió el proceso seguido para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona mediante la metodología LM1_P. Dicha estimación incluyó la identificación de las principales características de Barcelona y de sus edificios. Respecto a los edificios de la ciudad es posible desatacar que los dos principales tipos de edificios son los de mampostería no reforzada y los de hormigón armado.

Al aplicar la metodología LM1_P mediante el apoyo del código USERISK 2011, se obtuvieron curvas de vulnerabilidad sísmica por cada edificio estudiado. A partir de tales curvas se determinaron curvas promedio representativas de la vulnerabilidad sísmica de barrios y distritos, mediante el procedimiento descrito en el presente capítulo. Adicionalmente, se incluyeron los principales resultados obtenidos al estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona. A partir de dichos resultados se puede concluir que en promedio los edificios de la ciudad de Barcelona tienen una vulnerabilidad sísmica alta. Siendo los edificios de mampostería no reforzada los que presentan los mayores niveles de vulnerabilidad sísmica.

Los resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos en el presente estudio para la ciudad de Barcelona están de acuerdo con estudios previos como el de Lantada et al (2010) y el de Mena (2002). Sin embargo, los resultados de vulnerabilidad sísmica generados en el presente trabajo se obtienen a partir de un enfoque probabilista que permite incorporar los niveles de incertidumbre asociados a la estimación de la vulnerabilidad y por lo tanto, dichos resultados ofrecen mayor información respecto a la vulnerabilidad sísmica de Barcelona. En otras palabras, se han obtenido resultados de vulnerabilidad sísmica que no se habían generado antes y que por lo tanto, constituyen un elemento adicional para facilitar el análisis de la vulnerabilidad sísmica de Barcelona, y para realizar estimaciones del riesgo sísmico de Barcelona mediante un enfoque probabilista.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el método LM1_P es un avance significativo en los métodos y técnicas de evaluación de vulnerabilidad y riesgo al uso y, en consecuencia, se propone como una alternativa adecuada para estimar la vulnerabilidad sísmica de zonas urbanas. Por otra parte, la metodología del método LM1_P puede ser fácilmente empleada para estimar la vulnerabilidad sísmica de los numerosos edificios que existen en las zonas urbanas susceptibles de estudio. En el presente trabajo tal metodología se implementó en el código de ordenador USERISK 2011, y en el presente capítulo se describieron los aspectos más relevantes en la estimación de la vulnerabilidad sísmica de una zona urbana mediante dicho código.

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO EN EL MÉTODO LM1_P

7.1 Introducción

En este capítulo se estudia el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona, cuya vulnerabilidad sísmica se estimó de acuerdo con lo señalado en el capítulo anterior. En ese mismo capítulo se mencionó que la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la ciudad han sido estudiados mediante diferentes técnicas y métodos (Mañà, 1997; Caicedo, 1993; Yépez, 1996; Mena, 2002; Lantada, 2007; Lantada et al, 2009a). Siendo el estudio de riesgo sísmico más reciente el realizado por Lantada et al (2009b). En dicho estudio emplearon la base de datos de los edificios actualizada al año 2008, para estimar escenarios de daño sísmico de Barcelona mediante la metodología LM1 de Risk-UE. En el presente trabajo a diferencia de los estudios previos de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de Barcelona, se incorporan importantes consideraciones probabilistas tanto en la estimación de la peligrosidad sísmica, como en la determinación de la vulnerabilidad sísmica, lo cual permite obtener resultados de riesgo sísmico en términos de curvas de frecuencias de excedencia versus grado de daño. Por lo tanto, en este capítulo se incluyen resultados del riesgo sísmico de Barcelona que no habían sido obtenidos en estudios previos, y al mismo tiempo se destacan los principales resultados que se pueden obtener al aplicar la metodología LM1_P propuesta en el presente trabajo.

7.2 Riesgo sísmico

En este apartado se describen las consideraciones más importantes realizadas para estimar el riesgo sísmico de Barcelona mediante la metodología LM1_P, y se incluyen los principales resultados obtenidos.

7.2.1 USERISK 2011: un caso de aplicación

Estimación del riesgo sísmico de los edificios de Barcelona

Para estimar las curvas de riesgo sísmico de los edificios de Barcelona se emplea el código USERISK 2011, el cual fue descrito en el capítulo 4. Particularmente, se estima el riesgo sísmico de los edificios de

Barcelona, cuyas características principales fueron mencionadas en el capítulo 6. En ese mismo capítulo se eligieron dos edificios para ejemplificar el procedimiento empleado por USERISK, para estimar la vulnerabilidad sísmica de cada uno de los edificios de Barcelona. Por lo tanto, en el presente capítulo se usan los mismos edificios BCN3 y BCN4, para indicar el proceso empleado por USERISK, para estimar el riesgo sísmico de cada edificio de Barcelona.

Archivos de datos requeridos en USERISK 2011 para estimar el riesgo sísmico

Para estimar el riesgo sísmico de edificios en Barcelona USERISK 2011 requiere información de carácter general (archivo con extensión “.data”), datos de los edificios (archivo con extensión “.csv”), y datos sobre la peligrosidad sísmica (archivo con extensión “.hz”). De tal forma que para estimar mediante USERISK el riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4 se emplean los tres archivos siguientes: 1) el archivo de datos generales (datos_generales.data), que contiene la información indicada en la Tabla 6-13; 2) el archivo de los datos de los edificios (edificios_BCN.csv), que contiene los datos indicados en la Tabla 6-14, y; 3) el archivo de la peligrosidad sísmica (peligro_sismico_BCN.hz), con los datos indicados en la Tabla 4-4, que corresponden a las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona mostradas en la Figura 3-4.

Cálculo del riesgo sísmico mediante USERISK 2011

A partir de la información contenida en los tres archivos señalados anteriormente, USERISK 2011 calcula la vulnerabilidad sísmica de los edificios como se describió en el capítulo anterior, y posteriormente emplea la Ec. 3-1 para obtener el riesgo sísmico de los edificios en términos de frecuencias de excedencia de los diferentes estados de daño. Por ejemplo, en la estimación del riesgo sísmico del edificio BCN3, el primer término de la Ec. 3-1 es evaluado por USERISK mediante la función de daño descrita en el capítulo 3, mientras que el segundo término de la Ec. 3-1 se evalúa a partir de las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Tabla 6-15; Figura 6-19, a), y finalmente, el tercer término de la Ec. 3-1 se evalúa a partir de las curvas de peligrosidad sísmica de la Figura 3-4.

Los resultados del riesgo sísmico generados por USERISK se incluyen en diversos archivos (Anexo C), siendo uno de ellos el que tiene extensión “.dam1”, en el cual se concentra la información descrita en la Tabla 4-7. De tal forma que en el caso de los edificios BCN3 y BCN4 los resultados de riesgo sísmico guardados por USERISK en el archivo “edificios_BCN.dam1”, se indican en la Tabla 7-1 y en la Tabla 7-2, respectivamente. A partir de estos últimos resultados es posible generar las curvas de riesgo sísmico de la Figura 7-1 y de la Figura 7-2, que corresponden a los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente.

De acuerdo con los resultados de riesgo sísmico del edificio BCN3 (Tabla 7-1), asociados a la curva Mejor de vulnerabilidad (Mejor - σ , Mejor, Mejor + σ), el grado de daño moderado en el edificio BCN3

tiene un periodo de retorno que varía entre 249 y 413 años, con un valor medio de 326 años. Al mismo tiempo, si se consideran las curvas de riesgo sísmico asociadas a la curva Superior de la vulnerabilidad (Superior - σ , Superior, Superior + σ), el grado de daño moderado en el edificio BCN3 tiene un periodo de retorno que varía entre 156 y 239 años, con un valor medio de 196 años. De manera similar los resultados de riesgo sísmico del edificio BCN4 asociados a la curva Mejor de vulnerabilidad (Tabla 7-2), indican que el grado de daño moderado en este edificio tiene un periodo de retorno que varía entre 71 y 104 años, con un valor medio de 87 años. Mientras que si se consideran las curvas de riesgo sísmico asociadas a la curva Superior de la vulnerabilidad (Tabla 7-2), entonces el grado de daño moderado en el edificio BCN4 tiene un periodo de retorno que varía entre 59 y 80 años, con un valor medio de 70 años.

Tabla 7-1. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN3 de Barcelona, obtenidas al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a), y las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4).

Curva de riesgo sísmico	$\nu(D1)$	$\nu(D2)$	$\nu(D3)$	$\nu(D4)$	$\nu(D5)$
Inferior - σ	3.54E-03	1.31E-03	4.52E-04	1.28E-04	2.18E-05
Inferior	4.32E-03	1.72E-03	6.42E-04	1.98E-04	3.80E-05
Inferior + σ	5.43E-03	2.33E-03	9.35E-04	3.11E-04	6.57E-05
Mejor - σ	5.65E-03	2.42E-03	9.60E-04	3.11E-04	6.24E-05
Mejor	6.69E-03	3.07E-03	1.31E-03	4.60E-04	1.03E-04
Mejor + σ	8.12E-03	4.01E-03	1.83E-03	6.94E-04	1.72E-04
Superior - σ	8.44E-03	4.18E-03	1.90E-03	7.04E-04	1.67E-04
Superior	9.69E-03	5.11E-03	2.47E-03	9.94E-04	2.63E-04
Superior + σ	1.14E-02	6.42E-03	3.32E-03	1.43E-03	4.16E-04

Tabla 7-2. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN4 de Barcelona, obtenidas al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b), y las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4).

Curva de riesgo sísmico	$\nu(D1)$	$\nu(D2)$	$\nu(D3)$	$\nu(D4)$	$\nu(D5)$
Inferior - σ	1.43E-02	7.11E-03	2.87E-03	8.39E-04	1.28E-04
Inferior	1.62E-02	8.84E-03	3.96E-03	1.31E-03	2.36E-04
Inferior + σ	1.86E-02	1.12E-02	5.57E-03	2.05E-03	4.24E-04
Mejor - σ	1.71E-02	9.61E-03	4.39E-03	1.47E-03	2.66E-04
Mejor	1.88E-02	1.15E-02	5.80E-03	2.18E-03	4.63E-04
Mejor + σ	2.09E-02	1.41E-02	7.81E-03	3.28E-03	7.97E-04
Superior - σ	1.96E-02	1.24E-02	6.48E-03	2.53E-03	5.59E-04
Superior	2.10E-02	1.43E-02	8.16E-03	3.55E-03	9.13E-04
Superior + σ	2.27E-02	1.68E-02	1.05E-02	5.06E-03	1.49E-03

Por otra parte, es posible comparar únicamente los resultados de riesgo sísmico asociados a las curvas Inferior, Mejor y Superior de cada edificio. En este caso es posible observar que el grado de daño moderado en el edificio BCN3 tiene un periodo de retorno que varía entre 196 y 582 años, con un valor medio de 326 años (Tabla 7-3). Mientras que bajo este mismo criterio el grado de daño moderado en el

edificio BCN4 tiene un periodo de retorno que varía entre 70 y 113 años, con un valor medio de 87 años (Tabla 7-4). Es importante destacar que las curvas de riesgo sísmico Inferior, Mejor y Superior (Tabla 7-3, Tabla 7-4), son un ejemplo del tipo y número máximo de curvas de riesgo que se obtienen cuando la peligrosidad sísmica de un sitio se representa mediante una sola curva de peligrosidad sísmica. Por ejemplo, si en lugar de estimar el riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4 mediante las tres curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona de la Figura 3-4, se estima mediante la curva única de peligrosidad sísmica de Barcelona de la Figura 5-16, entonces, se obtienen las frecuencias de excedencia de los estados de daño indicadas en la Tabla 7-5, y en la Tabla 7-6. A partir de dichos resultados es posible generar las curvas de riesgo sísmico de la Figura 7-3 y de la Figura 7-4. De acuerdo con estos últimos resultados, el grado de daño moderado en el edificio BCN3 tiene un periodo de retorno que varía entre 196 y 622 años, con un valor medio de 338 años (Tabla 7-7). Mientras que el grado de daño moderado en el edificio BCN4 tiene un periodo de retorno que varía entre 66 y 117 años, con un valor medio de 86 años (Tabla 7-8).

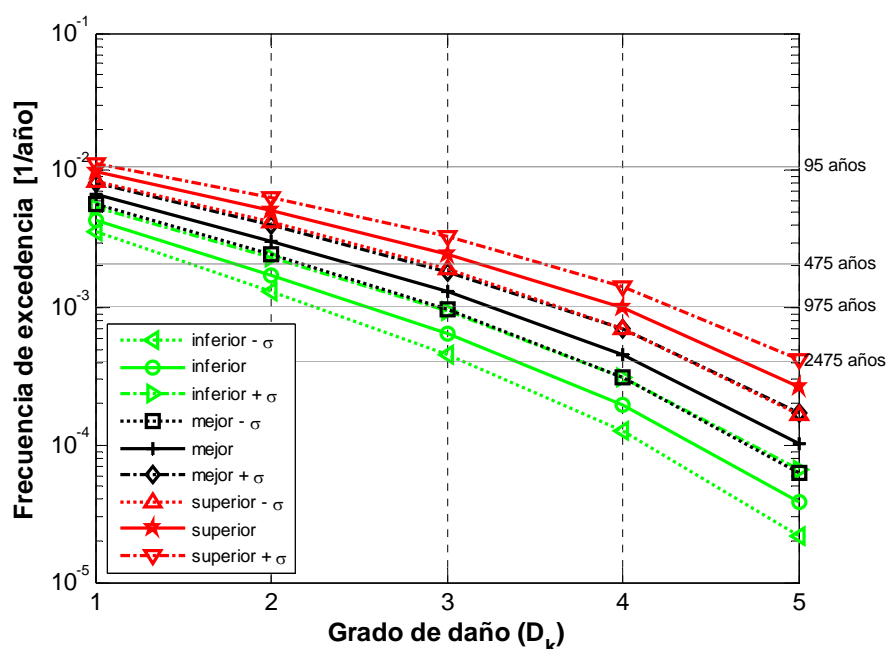


Figura 7-1. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN3, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a).

Tabla 7-3. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN3 de Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-1.

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior	231	582	1557	5060	26328
Mejor	150	326	764	2174	9668
Superior	103	196	404	1006	3809

Tabla 7-4. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN4 de Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-2.

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior	62	113	252	764	4243
Mejor	53	87	172	458	2158
Superior	48	70	123	282	1095

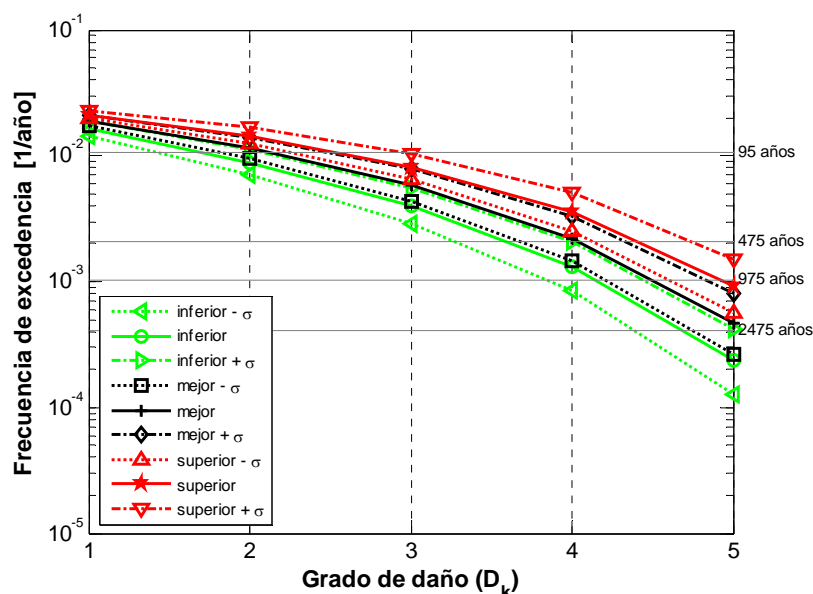


Figura 7-2. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN4, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona (Secanell et al, 2004) (Figura 3-4), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b).

Tabla 7-5. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN3 de Barcelona, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a), y la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16).

Curva de riesgo sísmico	$\nu(D1)$	$\nu(D2)$	$\nu(D3)$	$\nu(D4)$	$\nu(D5)$
Inferior	4.33E-03	1.61E-03	5.67E-04	1.67E-04	3.11E-05
Mejor	6.90E-03	2.96E-03	1.19E-03	3.95E-04	8.49E-05
Superior	1.03E-02	5.09E-03	2.32E-03	8.77E-04	2.18E-04

Tabla 7-6. Frecuencias anuales de excedencia de cada estado de daño en el edificio BCN4 de Barcelona, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b), y la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16).

Curva de riesgo sísmico	$\nu(D1)$	$\nu(D2)$	$\nu(D3)$	$\nu(D4)$	$\nu(D5)$
Inferior	1.74E-02	8.57E-03	3.51E-03	1.08E-03	1.88E-04
Mejor	2.09E-02	1.16E-02	5.31E-03	1.84E-03	3.69E-04
Superior	2.41E-02	1.50E-02	7.81E-03	3.09E-03	7.35E-04

Tabla 7-7. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN3 en Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-5.

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior	231	622	1762	6002	32155
Mejor	145	338	842	2530	11776
Superior	97	196	431	1140	4582

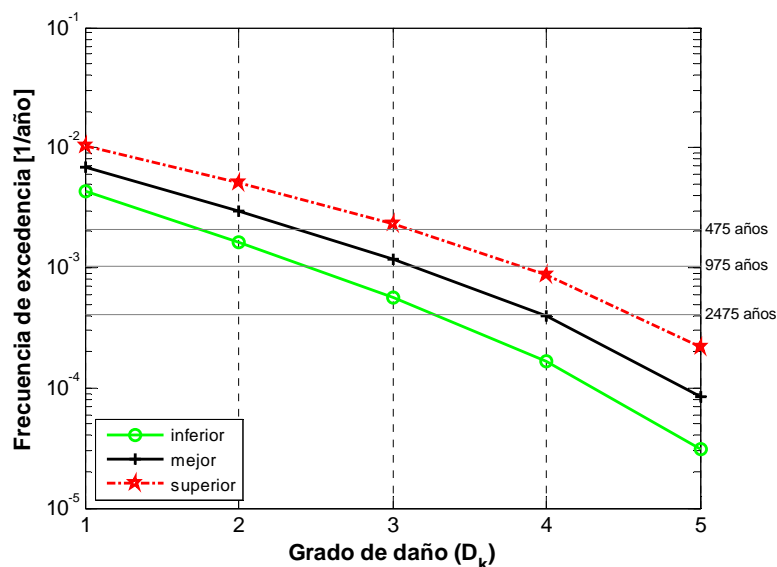


Figura 7-3. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN3, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN3 (Figura 6-19, a).

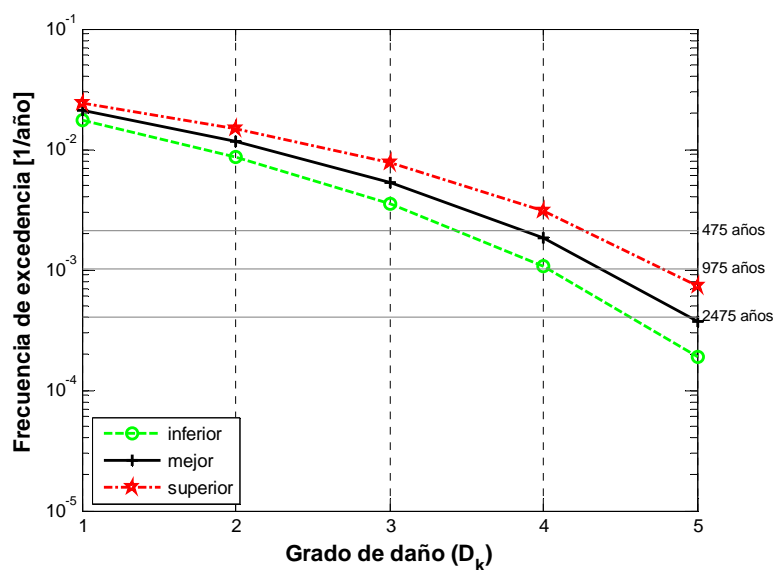


Figura 7-4. Curvas de riesgo sísmico del edificio BCN4, obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16), y las curvas de vulnerabilidad sísmica del edificio BCN4 (Figura 6-19, b).

Tabla 7-8. Periodos de retorno en años de cada estado de daño del edificio BCN4 en Barcelona, obtenidos de las frecuencias anuales de excedencia de la Tabla 7-6.

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior	57	117	285	929	5307
Mejor	48	86	188	545	2713
Superior	41	66	128	323	1361

Estimación de curvas promedio de riesgo sísmico de un grupo de edificios

Los resultados de riesgo sísmico de cada edificio pueden utilizarse para obtener curvas que representen el riesgo sísmico de un grupo de edificios (barrio, distrito, etc.). Para ello, es posible considerar que una curva promedio del riesgo sísmico, es aquella que surge al promediar las frecuencias de excedencia asociadas al mismo grado de daño sísmico. Por ejemplo, la frecuencia de excedencia promedio del grado de daño moderado de los edificios BCN3 y BCN4, se obtiene al promediar sus respectivas frecuencias de excedencia asociadas al grado de daño moderado. A manera de ejemplo, en la Figura 7-5, se muestra la curva Mejor promedio del riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4 (Tabla 7-9), obtenida a partir de la curva Mejor del riesgo sísmico del edificio BCN3 (Tabla 7-1), y de la curva Mejor del riesgo sísmico del edificio BCN4 (Tabla 7-2).

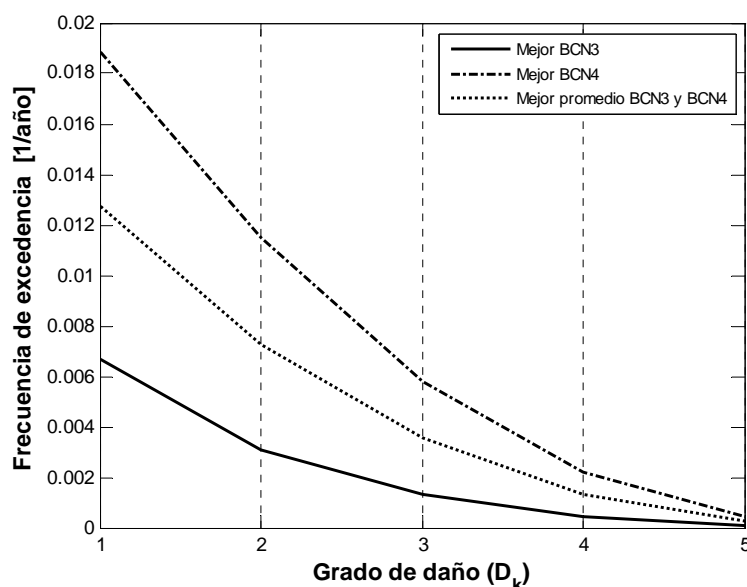


Figura 7-5. Curvas Mejor de riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4, respectivamente, y curva Mejor promedio del riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4.

El procedimiento descrito anteriormente para estimar las curvas de riesgo sísmico promedio de dos edificios, puede generalizarse para obtener curvas de riesgo sísmico promedio de mayor número de edificios. Más adelante, se muestran algunas de las curvas estimadas mediante este procedimiento para representar el riesgo sísmico promedio de barrios y distritos de Barcelona.

Tabla 7-9. Frecuencias anuales de excedencia que definen a la curva Mejor de riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4, y a la curva Mejor promedio que representa el riesgo sísmico de ambos edificios.

Curva de riesgo sísmico	$v(D1)$	$v(D2)$	$v(D3)$	$v(D4)$	$v(D5)$
Mejor BCN3.	6.69E-03	3.07E-03	1.31E-03	4.60E-04	1.03E-04
Mejor BCN4.	1.88E-02	1.15E-02	5.80E-03	2.18E-03	4.63E-04
Mejor promedio BCN3 y BCN4.	1.27E-02	7.29E-03	3.56E-03	1.32E-03	2.83E-04

7.2.2 Riesgo sísmico de Barcelona

En este apartado se muestran y comentan los principales resultados que se obtienen al estimar, mediante USERISK 2011, el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona. Particularmente, se estiman, mediante el mismo proceso que el descrito anteriormente para estimar el riesgo sísmico de los edificios BCN3 y BCN4, las curvas de riesgo sísmico de cada uno de los 69982 edificios de Barcelona. Tales curvas se obtienen al considerar las respectivas curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio, y las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona. Para fines de comparación, se analizan diversos casos, siendo los más relevantes el caso en el que se obtiene el riesgo sísmico a partir de la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16), y el caso en el que el riesgo sísmico se estima considerando las curvas de peligrosidad sísmica de Barcelona obtenidas por Secanell et al (2004) (Figura 3-4).

Riesgo sísmico de Barcelona mediante la peligrosidad sísmica estimada en el presente trabajo.

Las curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, se obtuvieron a partir de las curvas de riesgo sísmico de cada edificio de la ciudad, y para estimar el riesgo sísmico de cada edificio se empleó la peligrosidad sísmica de Barcelona estimada en el presente trabajo (Figura 5-16). Las curvas promedio estimadas expresan el riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia versus grados de daño (Figura 7-6), o en términos de periodos de retorno versus grados de daño (Figura 7-7). De acuerdo con los resultados (Tabla 7-10 y Tabla 7-11), el grado de daño moderado en Barcelona tiene un periodo de retorno que varía entre 101 y 196 años, con un valor medio de 138 años. De manera similar el grado de daño muy grande (4) en Barcelona tiene un periodo de retorno que varía entre 463 y 1452 años, con un valor medio de 798 años (Tabla 7-11). También se puede observar que de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico (Figura 7-6), el grado de daño promedio en Barcelona asociado a un periodo de retorno de 475 años es un valor que varía entre 3 y 4, con un valor medio de 3.5.

Tabla 7-10. Frecuencias anuales de excedencia promedio de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico de la Figura 7-6.

Curva de riesgo sísmico	$v(D1)$	$v(D2)$	$v(D3)$	$v(D4)$	$v(D5)$
Inferior promedio	1.08E-02	5.09E-03	2.12E-03	6.89E-04	1.35E-04
Mejor promedio	1.37E-02	7.26E-03	3.39E-03	1.25E-03	2.89E-04
Superior promedio	1.69E-02	9.92E-03	5.15E-03	2.16E-03	5.82E-04

Tabla 7-11. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico de la Figura 7-7.

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior promedio	93	196	473	1452	7397
Mejor promedio	73	138	295	798	3456
Superior promedio	59	101	194	463	1717

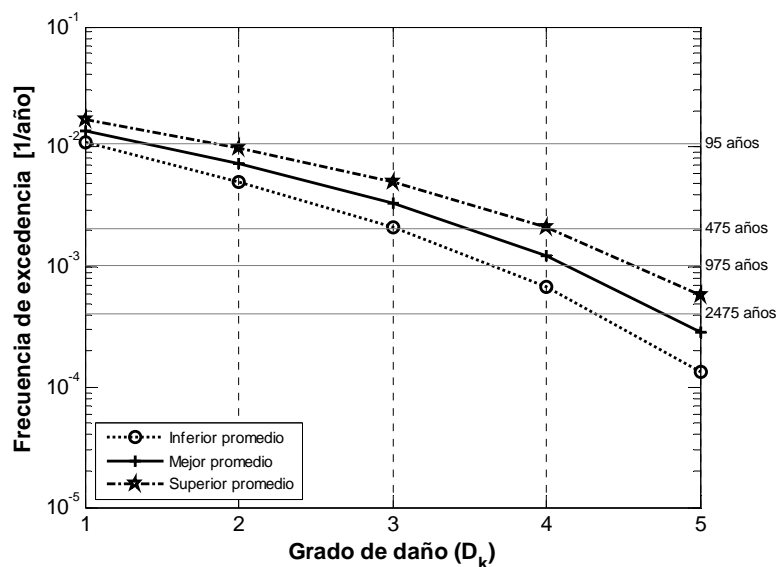


Figura 7-6. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (frecuencias de excedencia versus grado de daño), obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16).

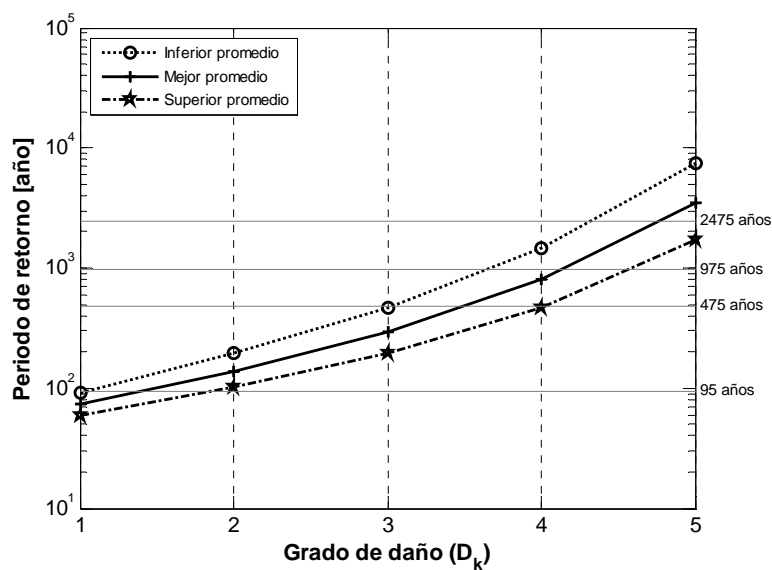


Figura 7-7. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (periodo de retorno versus grado de daño), obtenidas mediante USERISK 2011 al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16).

Con la finalidad de ampliar la información referente al riesgo sísmico de Barcelona, es posible hacer cálculos complementarios a los que se realizaron para obtener las curvas de riesgo sísmico de la Figura 7-6. Por ejemplo, es posible estimar mediante USERISK el riesgo sísmico de Barcelona, mediante una curva de peligrosidad sísmica truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8). Al hacerlo, se obtienen las curvas de riesgo sísmico indicadas en la Figura 7-9. De acuerdo con dichas curvas, el grado de daño moderado en Barcelona tiene un periodo de retorno que varía entre 116 y 238 años, con un valor medio de 162 años (Tabla 7-12). De manera que las curvas de riesgo sísmico de la Figura 7-9, representan el riesgo sísmico asociado a todos los sismos que tienen un periodo de retorno menor o igual a 475 años y que pueden generar en Barcelona una intensidad macrosísmica mayor o igual al grado IV-V. Por esa razón, los niveles de riesgo sísmico indicados en las curvas de la Figura 7-9, son menores que los niveles de riesgo sísmico de las curvas de riesgo de la Figura 7-6, las cuales se obtuvieron al considerar sismos que incluso tienen un periodo de retorno mayor a 475 años. Por ejemplo, de acuerdo con la curva Mejor promedio de la Figura 7-6, el periodo de retorno del grado de daño moderado en Barcelona es de 138 años, mientras que si sólo se consideran los sismos que tienen un periodo de retorno menor o igual a 475 años, entonces, el periodo de retorno del grado de daño moderado es igual a 162 años (Figura 7-9). También se puede observar que de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico (Figura 7-9), obtenidas mediante la curva de peligrosidad sísmica truncada, el grado de daño promedio en Barcelona asociado a un periodo de retorno de 475 años, es un valor que varía entre 2.8 y 3.8, con un valor medio de 3.2.

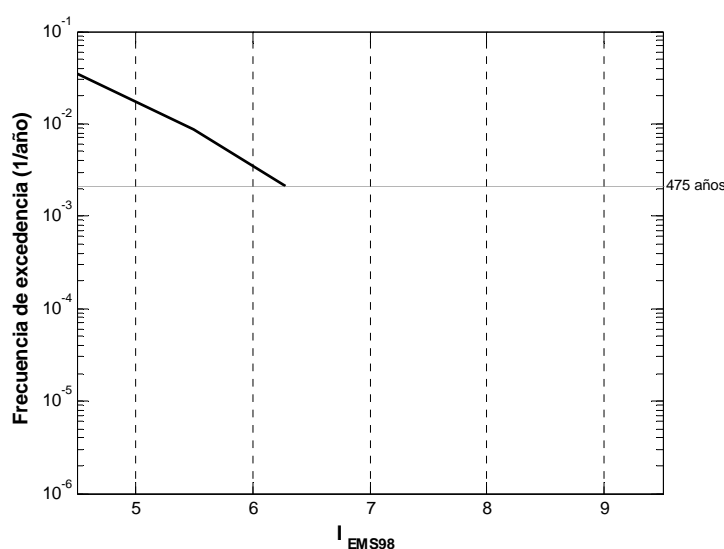


Figura 7-8. Curva de peligrosidad sísmica obtenida al truncar a una frecuencia de excedencia igual a $1/(475 \text{ años})$, la curva de peligrosidad sísmica obtenida en el presente trabajo (Figura 5-16).

Al comparar las curvas de riesgo sísmico de Barcelona obtenidas mediante la curva de peligrosidad sísmica completa, con las curvas de riesgo sísmico obtenidas mediante la curva de peligrosidad sísmica

truncada (Figura 7-10), es posible observar que las diferencias entre las frecuencias de excedencia del daño entre uno y otro caso aumentan en forma importante a medida que crece el grado de daño (Tabla 7-13). Esto último se debe en gran medida a que al considerar la curva de peligrosidad sísmica truncada a 475 años se están omitiendo las intensidades sísmicas mayores a 6.5 (VI-VII), las cuales son las que pueden contribuir en mayor medida a que se presenten en los edificios grados de daño mayores al grado moderado.

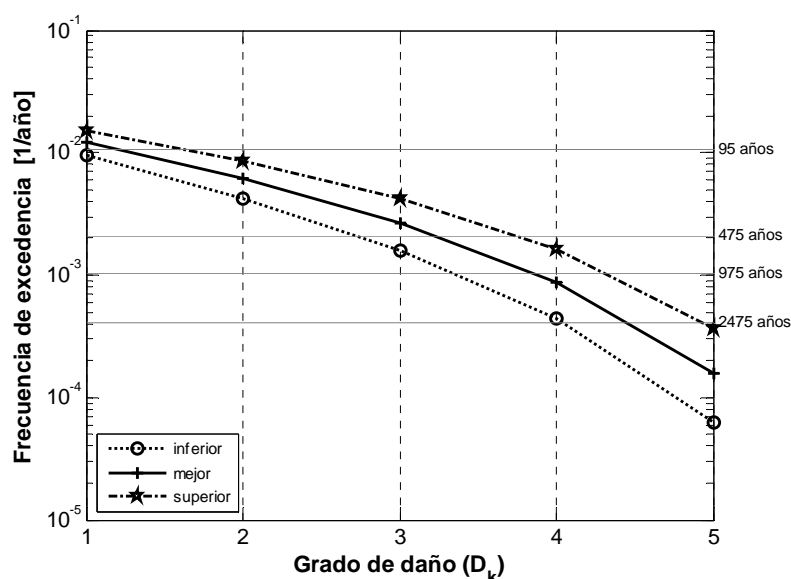


Figura 7-9. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, obtenidas mediante USERISK al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8).

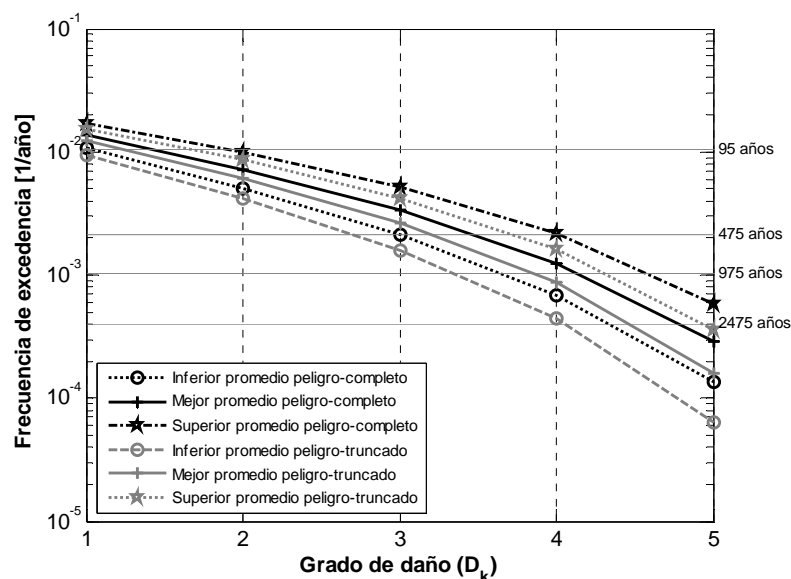


Figura 7-10. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, obtenidas al considerar: 1) la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona estimada mediante el CRISIS2008 (Figura 5-16) (curvas de riesgo sísmico en color negro); y 2) la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8) (curvas de riesgo sísmico en color gris).

Tabla 7-12. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico obtenidas mediante la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8).

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior promedio	106	238	628	2254	15777
Mejor promedio	82	162	373	1136	6275
Superior promedio	66	116	236	617	2751

Tabla 7-13. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio Mejor del riesgo sísmico obtenidas mediante: a) la curva completa de la peligrosidad sísmica de Barcelona (Figura 5-16); y b) la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona truncada a un periodo de retorno de 475 años (Figura 7-8).

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Mejor promedio – peligrosidad sísmica completa.	73	138	295	798	3456
Mejor promedio – peligrosidad sísmica truncada.	82	162	373	1136	6275
Diferencia	9	24	78	338	2819

Riesgo sísmico de Barcelona sin considerar efectos de sitio

Las curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona de la Figura 7-6 se obtuvieron al considerar los efectos de sitio de acuerdo con el criterio establecido en el capítulo 5, según el cual el valor de la intensidad macrosísmica en las zonas de suelo blando (I, II, III y A), será igual al valor de la intensidad macrosísmica correspondiente a la zona de roca más medio grado de intensidad (Figura 5-10). Sin embargo, con la finalidad de identificar la magnitud de la influencia de los efectos de sitio en el riesgo sísmico de Barcelona, es posible obtener también las curvas de riesgo sísmico de Barcelona sin considerar los efectos de sitio (Figura 7-11). De acuerdo con estos últimos resultados del riesgo sísmico de Barcelona, es posible señalar que el periodo de retorno del grado de daño moderado pasa de un valor de 193 años en el caso en el que los efectos de sitio no son considerados (Tabla 7-14), a un valor de 138 años en el caso en el que los efectos de sitio sí son considerados (Tabla 7-11). También se puede observar que de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico en las que los efectos locales no son considerados, el grado de daño promedio en Barcelona que tiene un periodo de retorno de 475 años es un valor que varía entre 2.5 y 3.5, con un valor medio de 3.

Riesgo sísmico de los edificios de mampostería y de hormigón.

A partir de los resultados de riesgo sísmico de cada edificio de Barcelona obtenidos al considerar la peligrosidad sísmica de la Figura 5-16, se han estimado también las curvas del riesgo sísmico promedio de los edificios de mampostería (Figura 7-12), y de los edificios de hormigón armado de la ciudad (Figura 7-13). De acuerdo con dichas curvas el grado de daño moderado en los edificios de mampostería tiene un periodo de retorno que varía entre 86 y 156 años, con un valor medio de 113 años. Mientras que el grado

de daño moderado en los edificios de hormigón tiene un periodo de retorno que varía entre 161 y 466 años, con un valor medio de 263 años. De acuerdo con esas mismas curvas de riesgo sísmico el grado de daño sísmico promedio que tiene un periodo de retorno de 475 años en los edificios de mampostería es un valor entre 3.2 y 4.2, con un valor medio de 3.7. De manera similar el grado de daño sísmico promedio que tiene un periodo de retorno de 475 años en los edificios de hormigón armado es un valor entre 2.0 y 3.5, con un valor medio de 2.8. Es decir, si se considera el periodo de retorno de 475 años, entonces, en promedio, los edificios de mampostería tendrán un daño sísmico de 3.7, el cual es un daño promedio que supera en aproximadamente un grado el estado de daño promedio que tendrán los edificios de hormigón armado (2.8).

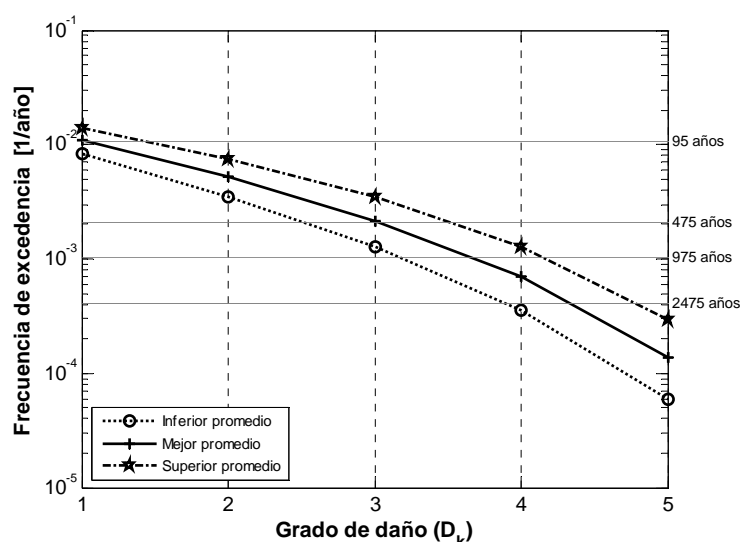


Figura 7-11. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, sin considerar efectos de sitio.

Tabla 7-14. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona, obtenidos al no considerar efectos de sitio.

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior promedio	120	289	791	2782	16667
Mejor promedio	91	193	466	1433	7269
Superior promedio	71	134	289	780	3372

Riesgo sísmico de los distritos de Barcelona

En el presente trabajo se han obtenido también curvas promedio del riesgo sísmico de cada distrito de Barcelona (Figura 7-14 y Figura 7-15). De acuerdo con dichas curvas el grado de daño moderado en el distrito del Eixample tiene un periodo de retorno que varía entre 73 y 133 años, con un valor medio de 96 años (Figura 7-14, b). Es posible identificar también que en el distrito del Eixample el grado de daño promedio que tiene asociada un periodo de retorno de 475 años es un valor que varía entre 3.5 y 4.5, con un valor medio de 4. De manera similar es posible observar que el grado de daño moderado en el distrito

de Nou Barris tiene un periodo de retorno que varía entre 144 y 315 años, con un valor medio de 209 (Figura 7-15, b). En este mismo distrito el grado de daño promedio asociado a un periodo de retorno de 475 años es un valor que varía entre 2.5 y 3.5, con un valor medio de 3.

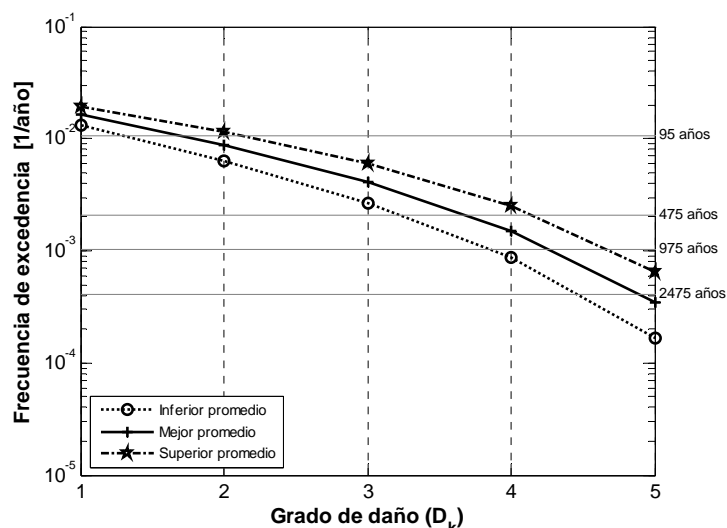


Figura 7-12. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

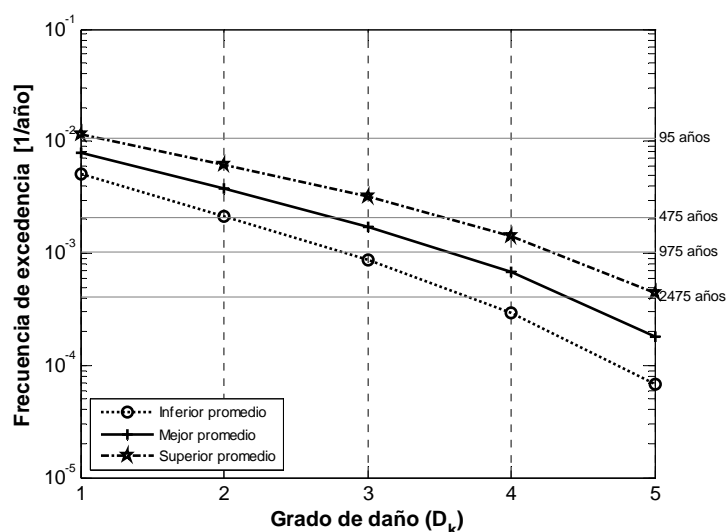


Figura 7-13. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de hormigón de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

Por otra parte, al comparar las curvas de los diez distritos de Barcelona (Figura 7-16) es posible identificar que los distritos con los menores niveles de riesgo sísmico de Barcelona son el de Horta-Guinardó y Nou Barris, y los distritos con los mayores niveles de riesgo sísmico son Ciutat Vella y el Eixample. Para facilitar el análisis de los resultados de riesgo sísmico es posible generar mapas como los de la Figura 7-17. En este caso el mapa muestra el periodo de retorno del grado de daño moderado que le corresponde a cada distrito de Barcelona. En dicho mapa es posible observar que la región con los niveles

más altos de riesgo sísmico de la ciudad, está formada por los distritos de Ciutat Vella y el Eixample. En cambio, una de las regiones con los niveles más bajos de riesgo sísmico en la ciudad es la formada por los distritos de Horta-Guinardó y Nou Barris.

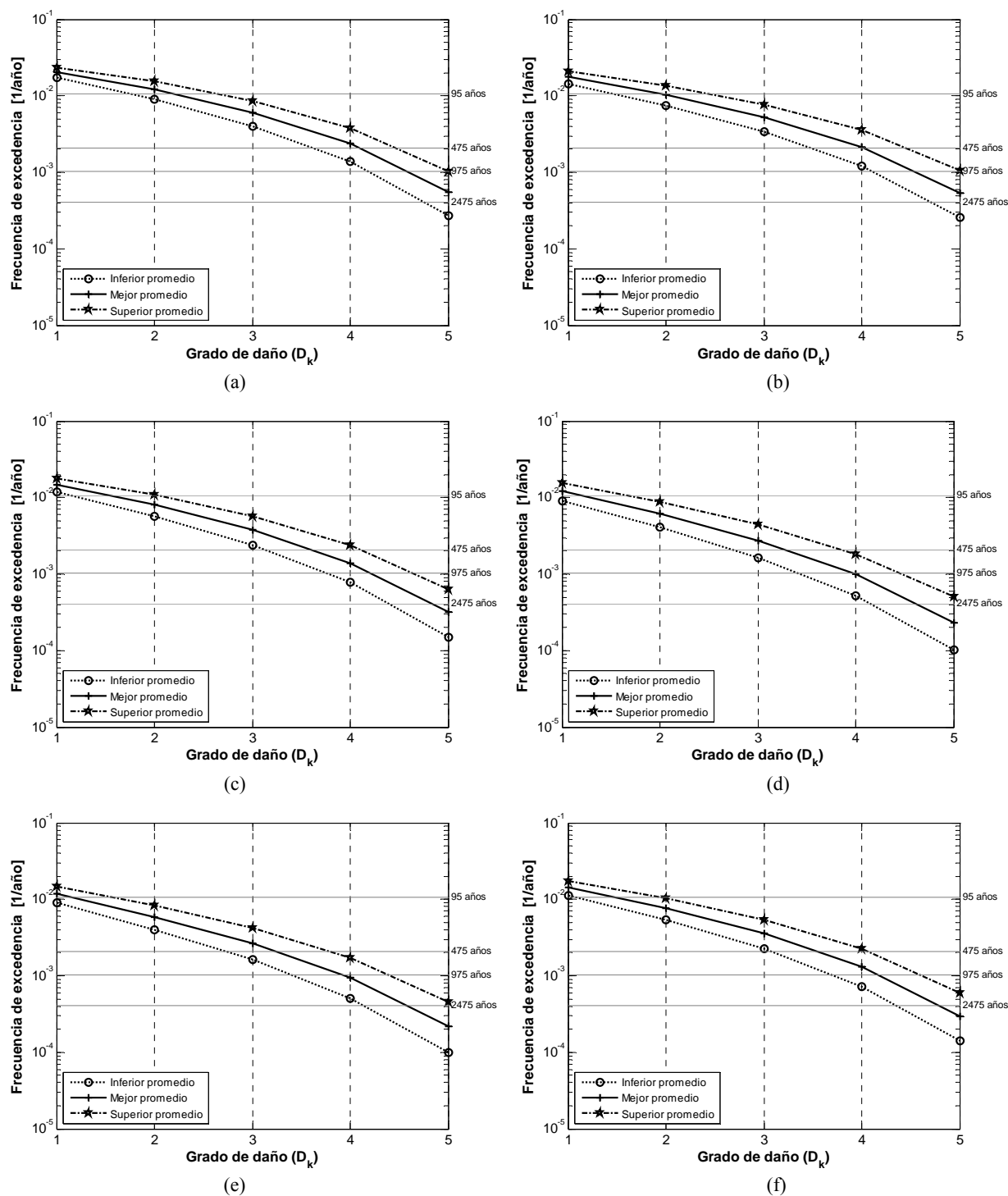


Figura 7-14. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c), Les Corts (d), Sarrià-Sant Gervasi (e) y Gràcia (f) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

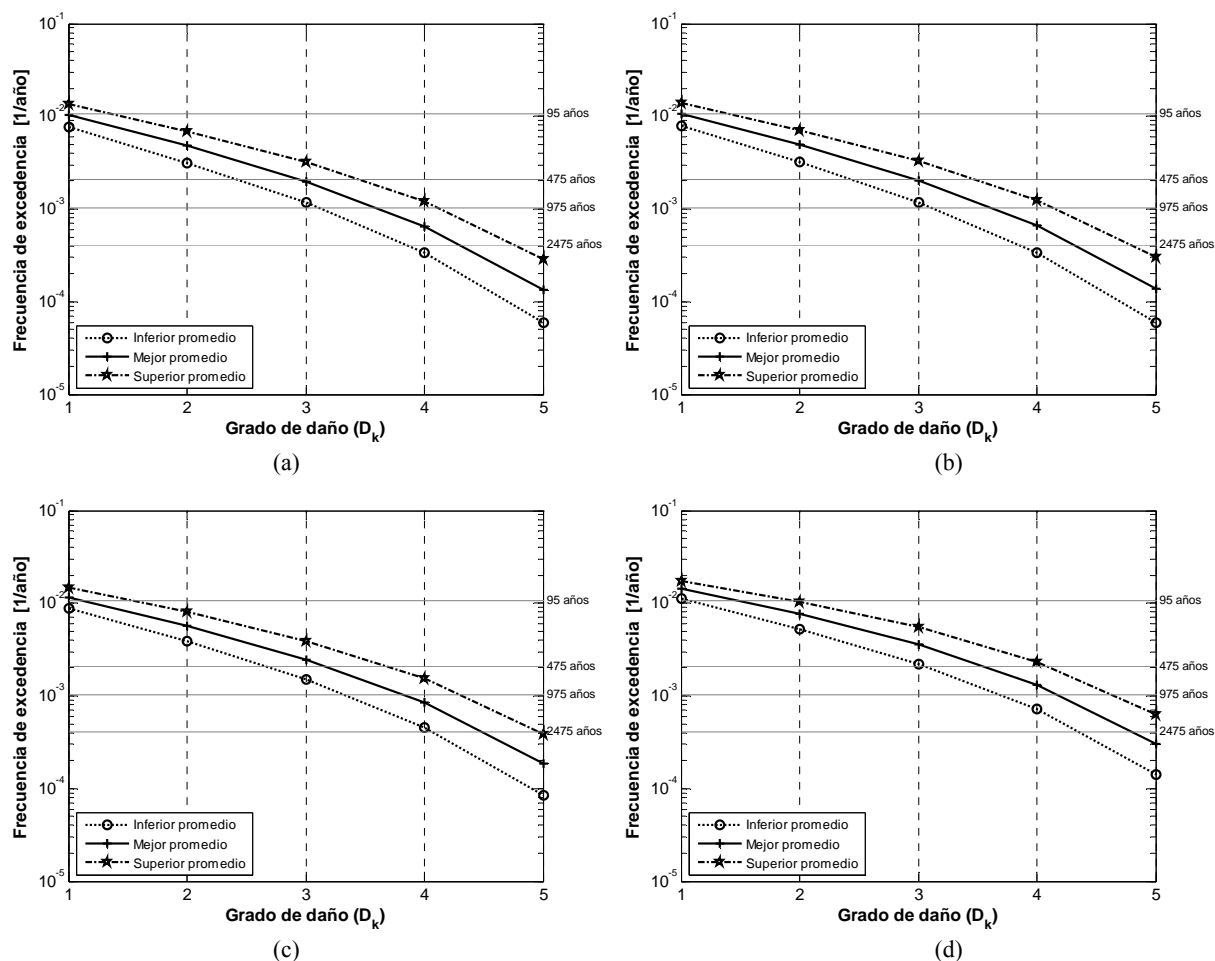


Figura 7-15. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Horta-Guinardó (a), Nou Barris (b), Sant Andreu (c) y Sant Martí (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

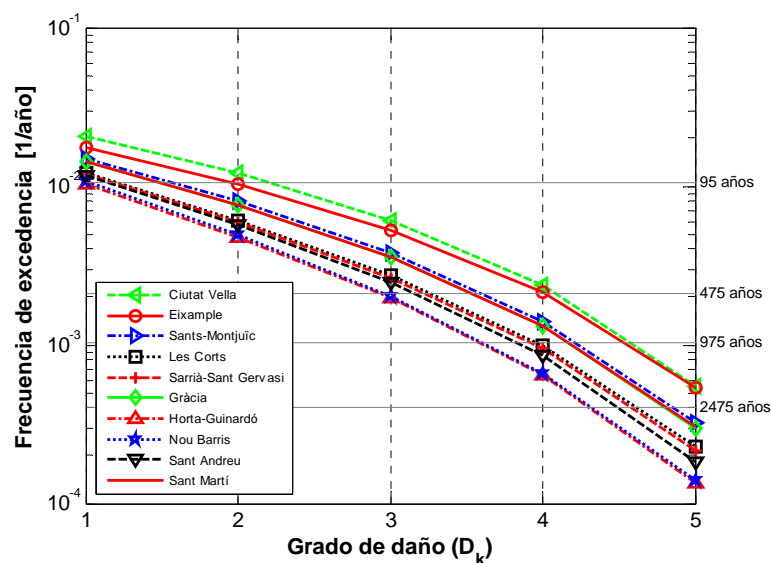


Figura 7-16. Curvas promedio Mejor del riesgo sísmico de los distritos de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

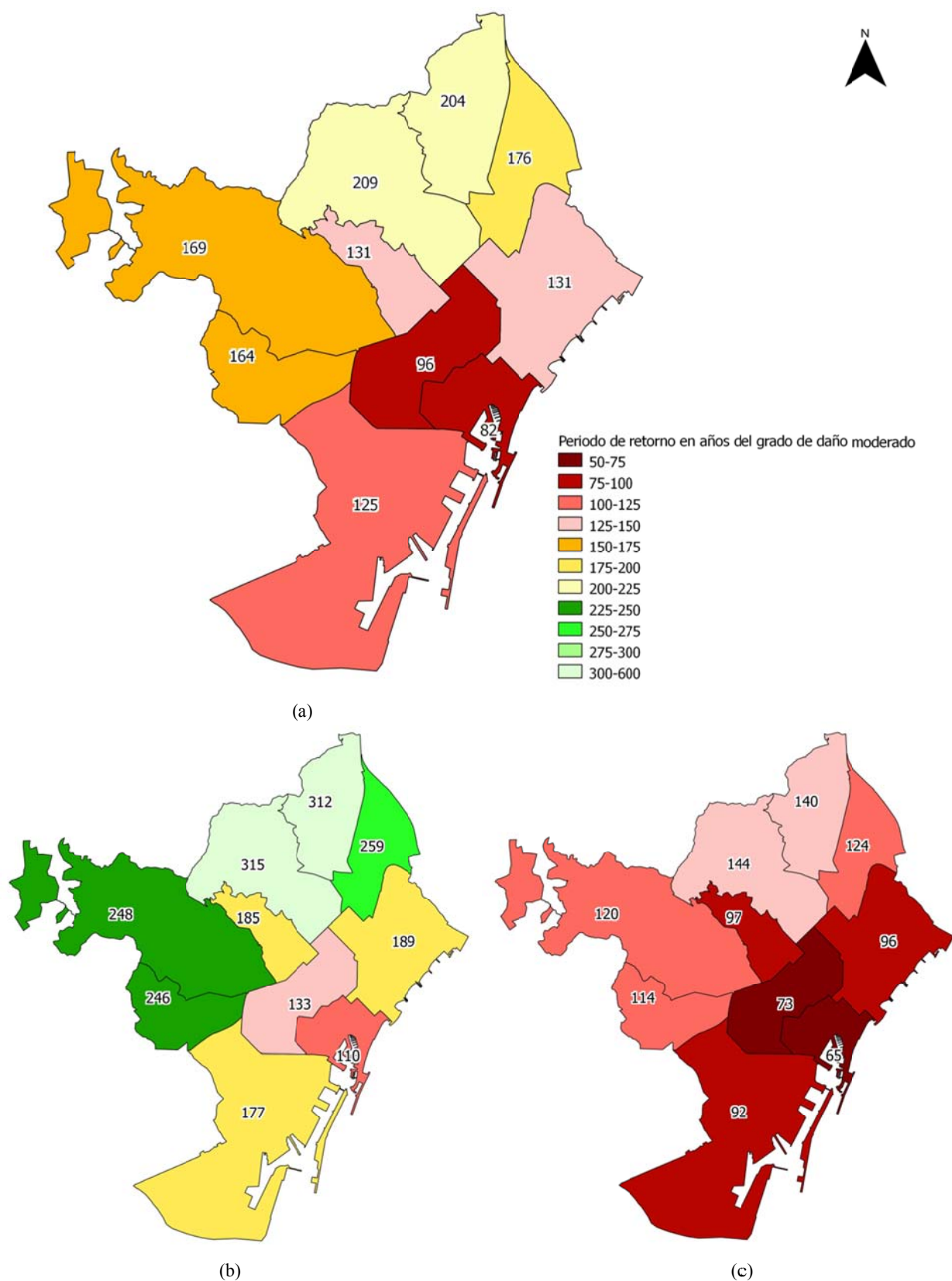


Figura 7-17. Periodos de retorno en años del grado de daño moderado en cada distrito de Barcelona, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c), estimadas mediante la curva de peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

Riesgo sísmico de los distritos de Barcelona sin efectos de sitio

De manera similar a como se obtuvieron las curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona sin considerar efectos de sitio (Figura 7-11), es posible obtener las curvas promedio de riesgo sísmico por distrito sin considerar efectos de sitio (Figura 7-18 y Figura 7-19). De acuerdo con dichas curvas el grado de daño moderado en el distrito del Eixample, tiene un periodo de retorno que varía entre 96 y 195 años, con un valor medio de 134 años (Figura 7-18,b). Por otra parte, es posible identificar, por ejemplo, que de acuerdo con la curva Mejor promedio el grado de daño promedio del distrito del Eixample, para un periodo de retorno de 475 años es igual a 3.5 si no se consideran efectos de sitio (Figura 7-18, b), pero igual a 4 si los efectos de sitio son considerados (Figura 7-14, b).

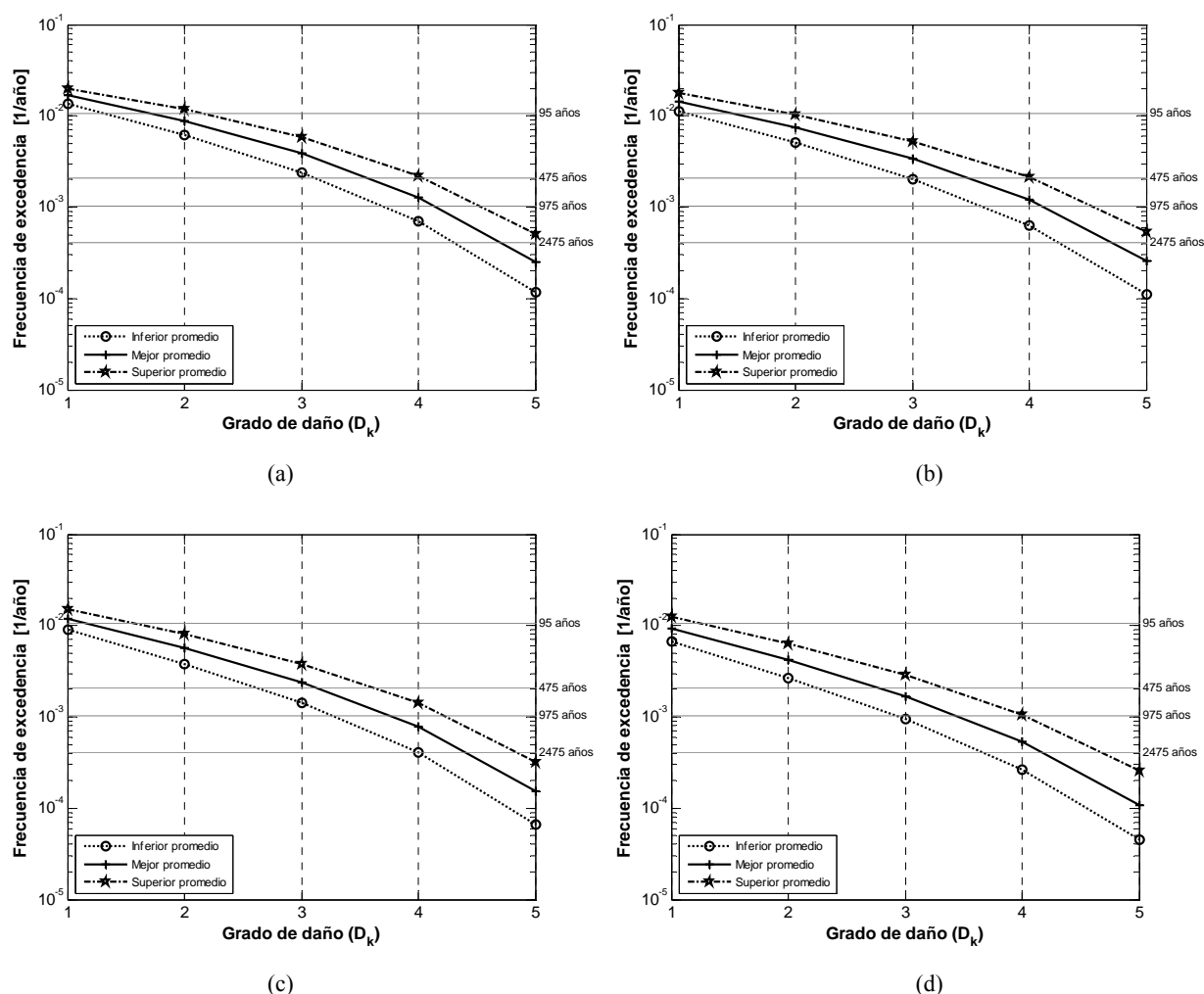


Figura 7-18. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16), y sin considerar efectos de sitio.

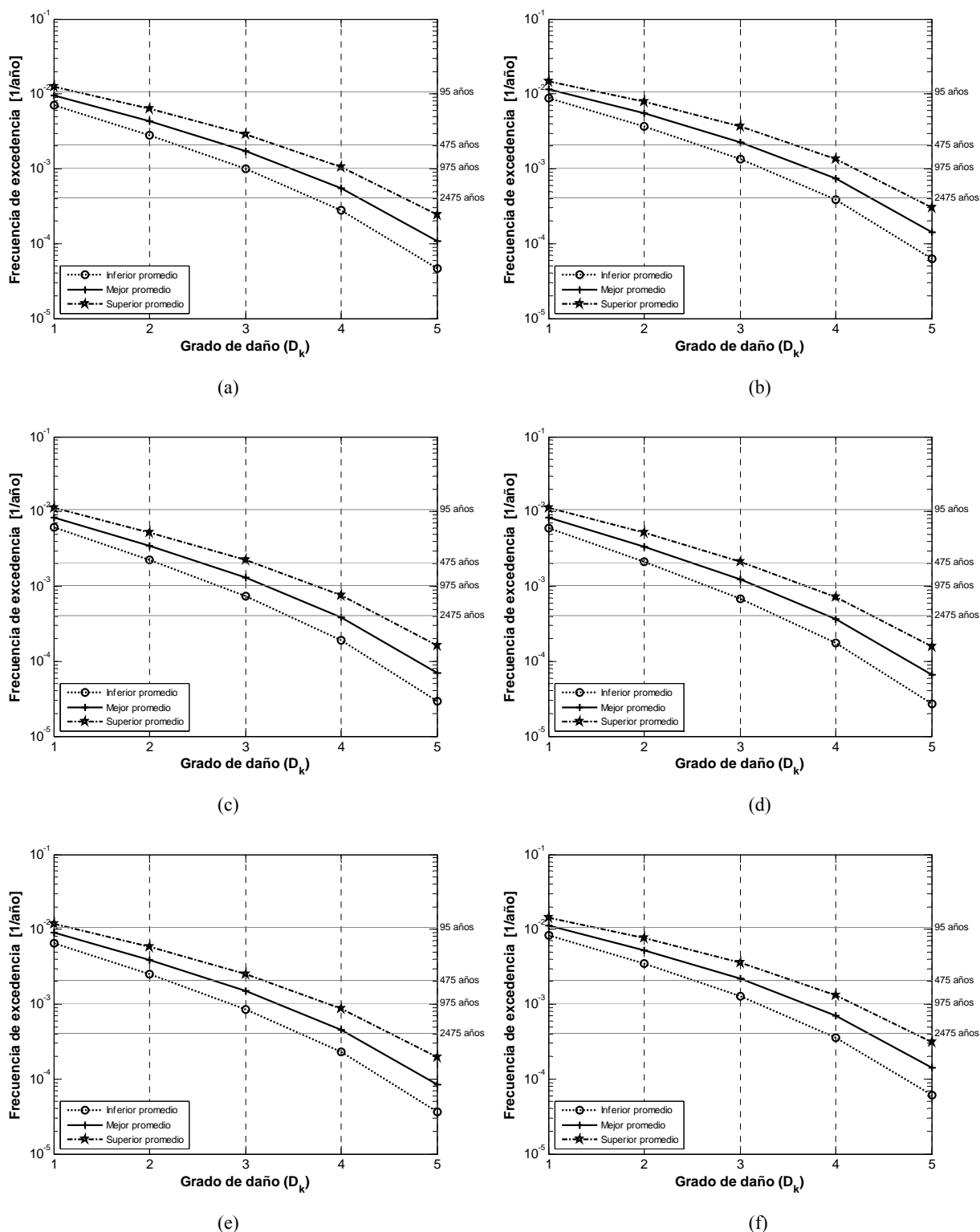


Figura 7-19. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Sarrià-Sant Gervasi (a), Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16), y sin considerar efectos de sitio.

Riesgo sísmico de los edificios de mampostería y de hormigón por distrito

En la Figura 7-20 y en la Figura 7-21 se muestran las curvas de riesgo sísmico promedio de los edificios de mampostería por cada distrito de Barcelona. De acuerdo con dichas curvas promedio el grado de daño moderado de los edificios de mampostería del distrito del Eixample tiene un periodo de retorno que varía entre 60 y 102 años, con un valor medio de 76 años (Figura 7-20, b). Mientras que el grado de daño moderado de los edificios de mampostería del distrito de Nou Barris tiene un periodo de retorno que varía entre 133 y 275 años, con un valor medio de 188 años (Figura 7-21, d). De manera similar, es posible identificar que el grado de daño sísmico promedio que tiene un periodo de retorno de 475 años en los edificios de mampostería del Eixample, varía entre 3.8 y 4.6, con un valor medio de 4.2. Mientras que en los edificios de mampostería del distrito de Nou Barris, el grado de daño sísmico promedio que tiene un periodo de retorno de 475 años varía entre 2.5 y 3.4, con un valor medio de 3.

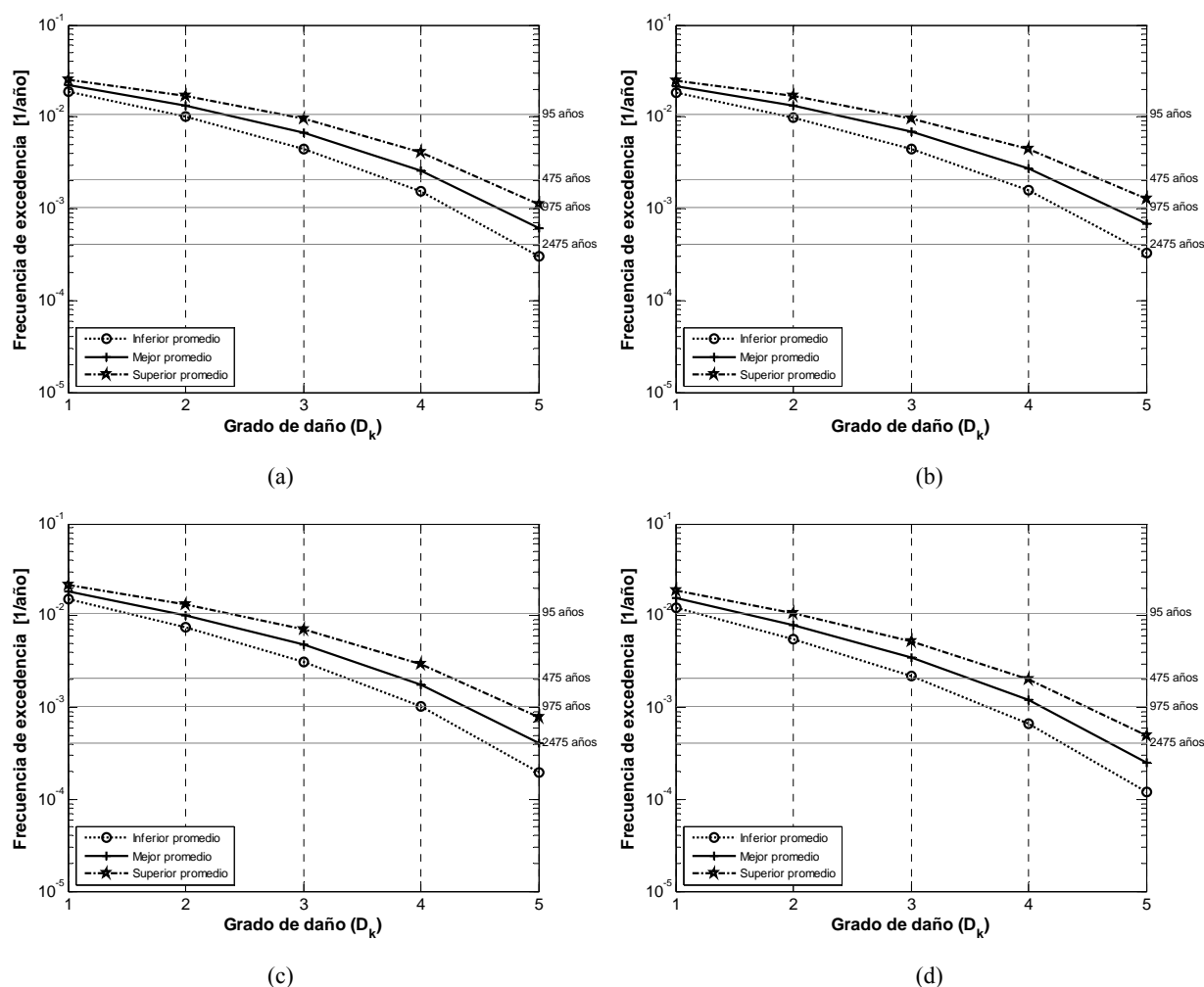


Figura 7-20. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

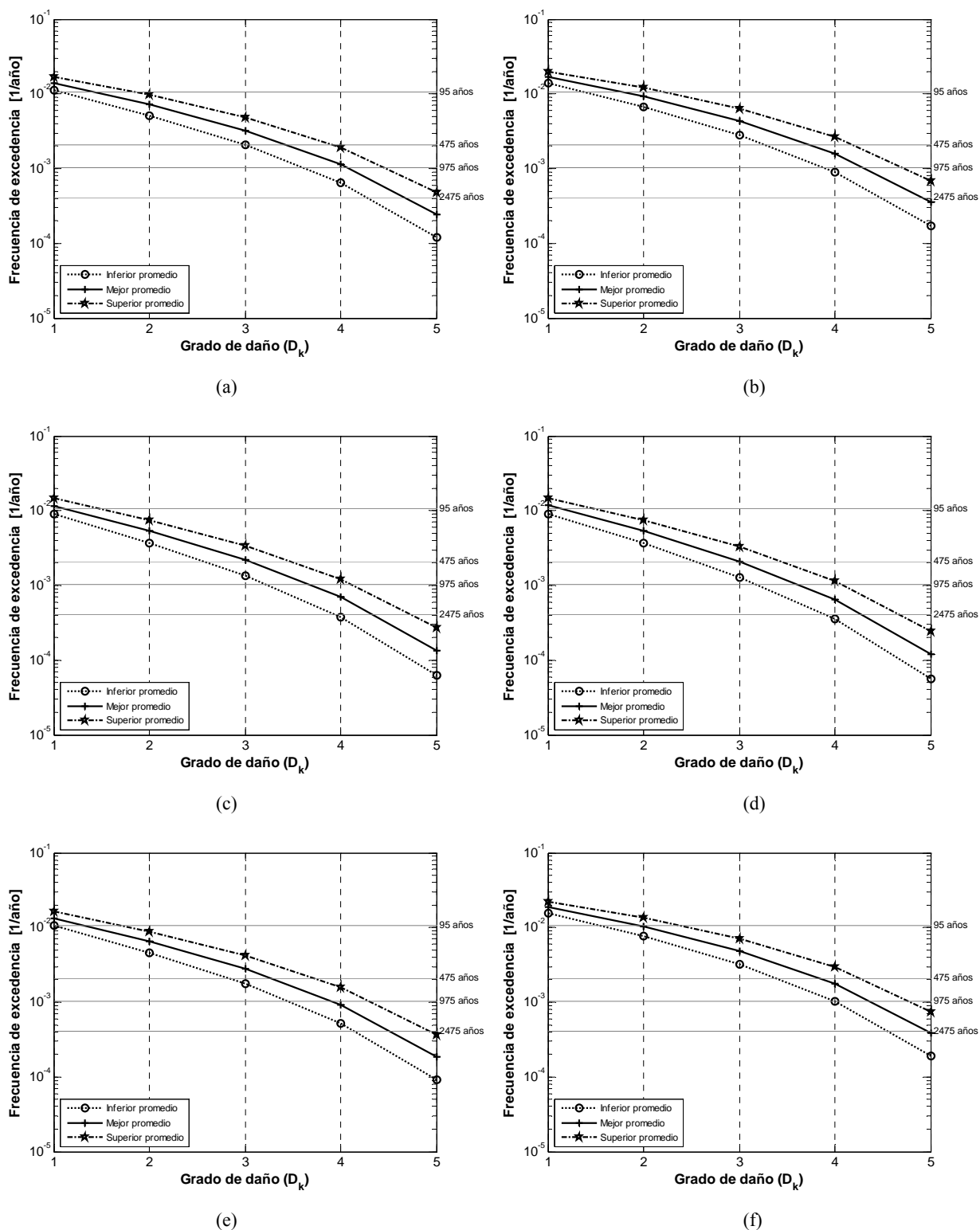


Figura 7-21. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de los distritos de Sarrià-Sant Gervasi (a), Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

De manera similar al caso de los edificios de mampostería se obtuvieron las curvas de riesgo sísmico promedio de los edificios de hormigón de cada distrito de Barcelona (Figura 7-22 y Figura 7-23). De acuerdo con dichas curvas promedio, el grado de daño moderado de los edificios de hormigón del distrito del Eixample tiene un periodo de retorno que varía entre 141 y 392 años, con un valor medio de 226 años (Figura 7-22, b). Mientras que el grado de daño moderado de los edificios de mampostería del distrito de Nou Barris tiene un periodo de retorno que varía entre 150 y 431 años, con un valor medio de 243 años (Figura 7-23, d). De manera similar, es posible identificar que en los edificios de hormigón del distrito del Eixample el grado de daño sísmico promedio que tiene un periodo de retorno de 475 años varía entre 2.2 y 3.7, con un valor medio de 3. Mientras que en los edificios de hormigón del distrito de Nou Barris el grado de daño sísmico promedio que tiene un periodo de retorno de 475 años varía entre 2.1 y 3.6, con un valor medio de 2.9.

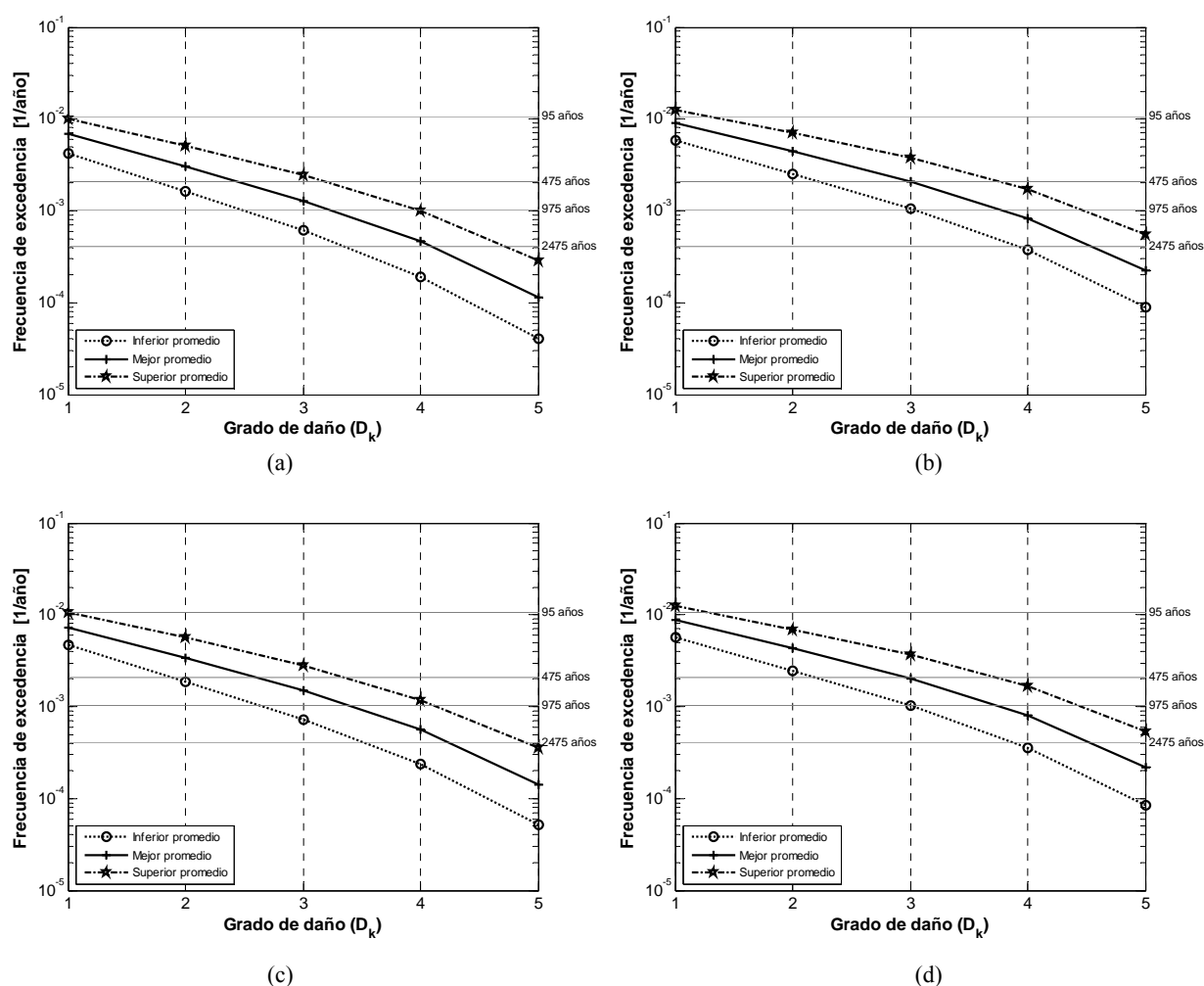


Figura 7-22. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de hormigón de los distritos de Ciutat Vella (a), Eixample (b), Sants-Montjuïc (c) y Les Corts (d) de Barcelona, obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

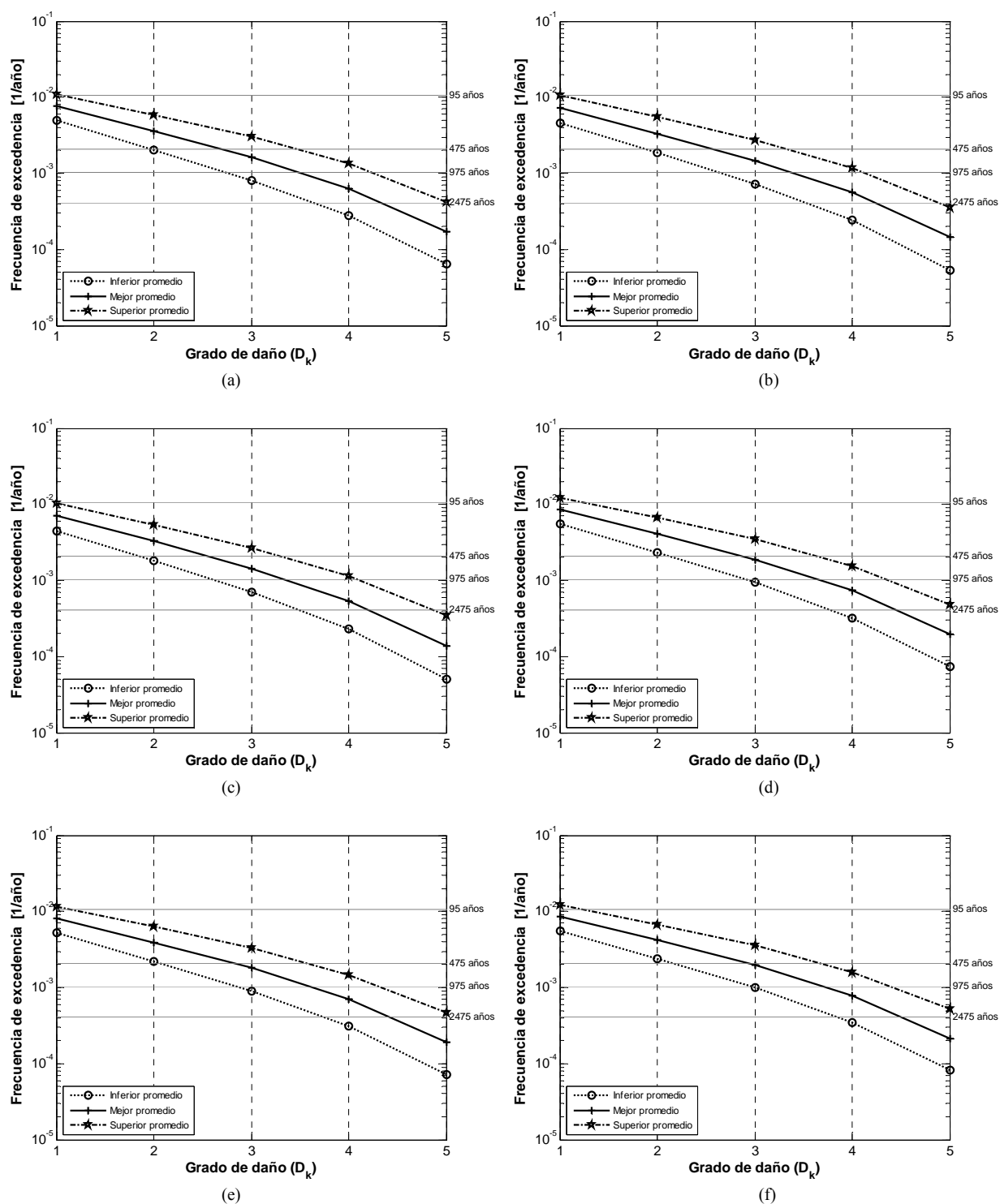


Figura 7-23. Curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de los distritos de Sarrià-Sant Gervasi (a), Gràcia (b), Horta-Guinardó (c), Nou Barris (d), Sant Andreu (e) y Sant Martí (f), obtenidas al considerar la curva de peligrosidad sísmica de Barcelona calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

Riesgo sísmico de los barrios de Barcelona

En la Tabla 7-15 y en la Tabla 7-16 se muestran los principales resultados del riesgo sísmico que se han estimado para cada barrio de Barcelona. De acuerdo con estos resultados, uno de los barrios con mayores niveles de riesgo sísmico es el del Raval, en el que el estado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 62 y 104 años, con un valor medio de 79 años.

Tabla 7-15. Frecuencias anuales de excedencia promedio de los estados de daño de cada barrio de Barcelona, de acuerdo con la curva Mejor promedio.

Distrito	Barrio	$\nu(D1)$	$\nu(D2)$	$\nu(D3)$	$\nu(D4)$	$\nu(D5)$
Ciutat Vella	01 Barceloneta	1.76E-02	9.75E-03	4.61E-03	1.68E-03	3.69E-04
	02 Parc	2.08E-02	1.24E-02	6.29E-03	2.46E-03	5.83E-04
	03 Gòtic	2.10E-02	1.26E-02	6.32E-03	2.45E-03	5.71E-04
	04 Raval	2.11E-02	1.27E-02	6.46E-03	2.53E-03	5.96E-04
Eixample	05 Sant Antoni	1.94E-02	1.17E-02	6.05E-03	2.46E-03	6.19E-04
	06 Esquerra Eixample	1.76E-02	1.05E-02	5.39E-03	2.19E-03	5.59E-04
	07 Dreta Eixample	1.47E-02	8.39E-03	4.22E-03	1.70E-03	4.34E-04
	08 Estació Nord	1.54E-02	8.58E-03	4.17E-03	1.61E-03	3.88E-04
	09 Sagrada Família	1.88E-02	1.13E-02	5.90E-03	2.42E-03	6.16E-04
Sants-Montjuïc	10 Poble –sec	1.45E-02	7.71E-03	3.58E-03	1.31E-03	2.93E-04
	11 Montjuïc	1.37E-02	7.32E-03	3.42E-03	1.27E-03	2.95E-04
	12 Zona Franca-Port	1.18E-02	5.92E-03	2.61E-03	9.13E-04	1.96E-04
	13 Font de la Guatlla	1.84E-02	1.07E-02	5.34E-03	2.08E-03	4.99E-04
	14 Bordeta-Hostafrancs	1.51E-02	8.11E-03	3.77E-03	1.37E-03	3.06E-04
Les Corts	15 Sants	8.45E-03	3.88E-03	1.64E-03	5.75E-04	1.31E-04
	16 Les Corts	1.28E-02	6.58E-03	3.00E-03	1.10E-03	2.57E-04
Sarrià-Sant Gervasi	17 Pedralbes	9.86E-03	4.61E-03	1.95E-03	6.66E-04	1.46E-04
	18 Sant Gervasi	1.27E-02	6.63E-03	3.07E-03	1.14E-03	2.68E-04
	19 Sarrià	1.22E-02	6.10E-03	2.70E-03	9.41E-04	2.02E-04
Gràcia	20 Vallvidrera-Les Planes	7.23E-03	2.82E-03	9.82E-04	2.69E-04	4.34E-05
	21 Gràcia	1.65E-02	9.13E-03	4.37E-03	1.63E-03	3.76E-04
	22 Vallcarca	9.14E-03	4.08E-03	1.65E-03	5.34E-04	1.09E-04
Horta-Guinardó	23 Guinardó	1.14E-02	5.50E-03	2.37E-03	8.17E-04	1.77E-04
	24 Horta	1.02E-02	4.62E-03	1.85E-03	5.88E-04	1.14E-04
	25 Vall d'Hebron	8.32E-03	3.55E-03	1.39E-03	4.50E-04	9.54E-05
Nou Barris	26 Vilapicina-Turó de la Peira	7.99E-03	3.05E-03	1.03E-03	2.75E-04	4.38E-05
	27 Roquetes-Verdum	9.79E-03	4.38E-03	1.79E-03	6.00E-04	1.32E-04
	28 Ciutat Meridiana-Vallbona	1.28E-02	6.25E-03	2.66E-03	8.94E-04	1.85E-04
Sant Andreu	29 Sagrera	7.56E-03	3.02E-03	1.13E-03	3.51E-04	7.23E-05
	30 Congrés	1.22E-02	5.93E-03	2.56E-03	8.77E-04	1.88E-04
	31 Sant Andreu	1.19E-02	6.01E-03	2.73E-03	1.01E-03	2.41E-04
	32 Bon Pastor	1.42E-02	7.27E-03	3.23E-03	1.12E-03	2.36E-04
	33 Trinitat Vella	7.87E-03	3.17E-03	1.16E-03	3.40E-04	6.21E-05
Sant Martí	34 Fort Pius	1.01E-02	4.75E-03	2.04E-03	7.22E-04	1.69E-04
	35 Poblenou	1.61E-02	8.92E-03	4.26E-03	1.60E-03	3.69E-04
	36 Barris Besòs	1.11E-02	5.72E-03	2.66E-03	1.00E-03	2.43E-04
	37 Clot	1.45E-02	7.67E-03	3.51E-03	1.25E-03	2.72E-04
	38 Verneda	1.02E-02	5.23E-03	2.52E-03	1.04E-03	2.93E-04

Por otra parte, es posible identificar que los dos barrios del distrito del Eixample con mayores niveles de riesgo sísmico son el de Sant Antoni y el de Sagrada Família. Por ejemplo, en el primer barrio el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 66 y 116 años, con un valor medio de 86 años (Tabla 7-16). Mientras que uno de los barrios con menores niveles de riesgo sísmico en Barcelona es el de Vallvidrera-Les Planes en el distrito de Sarrià-Sant Gervasi. En este barrio el grado de daño moderado

tiene un periodo de retorno que varía entre 236 y 552 años, con un valor medio de 355 años (Tabla 7-16). Los resultados de riesgo sísmico por barrio de Barcelona permiten generar mapas como los de la Figura 7-24, en los que es posible observar, por ejemplo, que la región de la ciudad formada por los barrios de Parc, Gòtic, Raval, Sant Antoni y Esquerra Eixample es una zona que tiene uno de los mayores niveles de riesgo sísmico de Barcelona. Por otra parte, es posible también emplear los resultados de riesgo sísmico de los edificios de la ciudad para generar mapas de riesgo sísmico a escala de edificios. Por ejemplo, en la Figura 7-25 se muestran tres mapas que indican los valores del periodo de retorno del grado de daño moderado, que de acuerdo con las curvas del riesgo sísmico Mejor, Inferior y Superior le corresponden a cada edificio del distrito del Eixample.

Tabla 7-16. Periodos de retorno promedio del estado de daño moderado de cada barrio de Barcelona, de acuerdo con las curvas Inferior promedio, Mejor promedio y Superior promedio.

Distrito	Barrio	Periodo de retorno (años)		
		Curva promedio		
		Inferior	Mejor	Superior
Ciutat Vella	01 Barceloneta	140	103	78
	02 Parc	107	80	63
	03 Gòtic	106	80	63
	04 Raval	104	79	62
Eixample	05 Sant Antoni	116	86	66
	06 Esquerra Eixample	132	96	73
	07 Dreta Eixample	170	119	88
	08 Estació Nord	165	117	86
	09 Sagrada Família	121	88	68
Sants-Montjuïc	10 Poble –sec	184	130	96
	11 Montjuïc	197	137	99
	12 Zona Franca-Port	250	169	119
	13 Font de la Guatlla	128	93	72
	14 Bordeta-Hostafrancs	174	123	91
	15 Sants	413	258	169
Les Corts	16 Les Corts	226	152	107
	17 Pedralbes	341	217	145
Sarrià-Sant Gervasi	18 Sant Gervasi	221	151	108
	19 Sarrià	238	164	117
	20 Vallvidrera-Les Planes	552	355	236
Gràcia	21 Gràcia	153	110	82
	22 Vallcarca	374	245	167
Horta-Guinardó	23 Guinardó	273	182	126
	24 Horta	326	217	150
	25 Vall d'Hebron	439	282	188
Nou Barris	26 Viliapicina-Turó de la Peira	527	328	213
	27 Roquetes-Verdum	361	228	152
	28 Ciutat Meridiana-Vallbona	236	160	113
Sant Andreu	29 Sagrera	537	331	213
	30 Congrés	252	169	118
	31 Sant Andreu	249	166	117
	32 Bon Pastor	197	138	100
	33 Trinitat Vella	496	316	209
Sant Martí	34 Fort Pius	322	211	144
	35 Poblenou	157	112	83
	36 Barris Besòs	265	175	120
	37 Clot	185	130	96
	38 Verneda	317	191	124

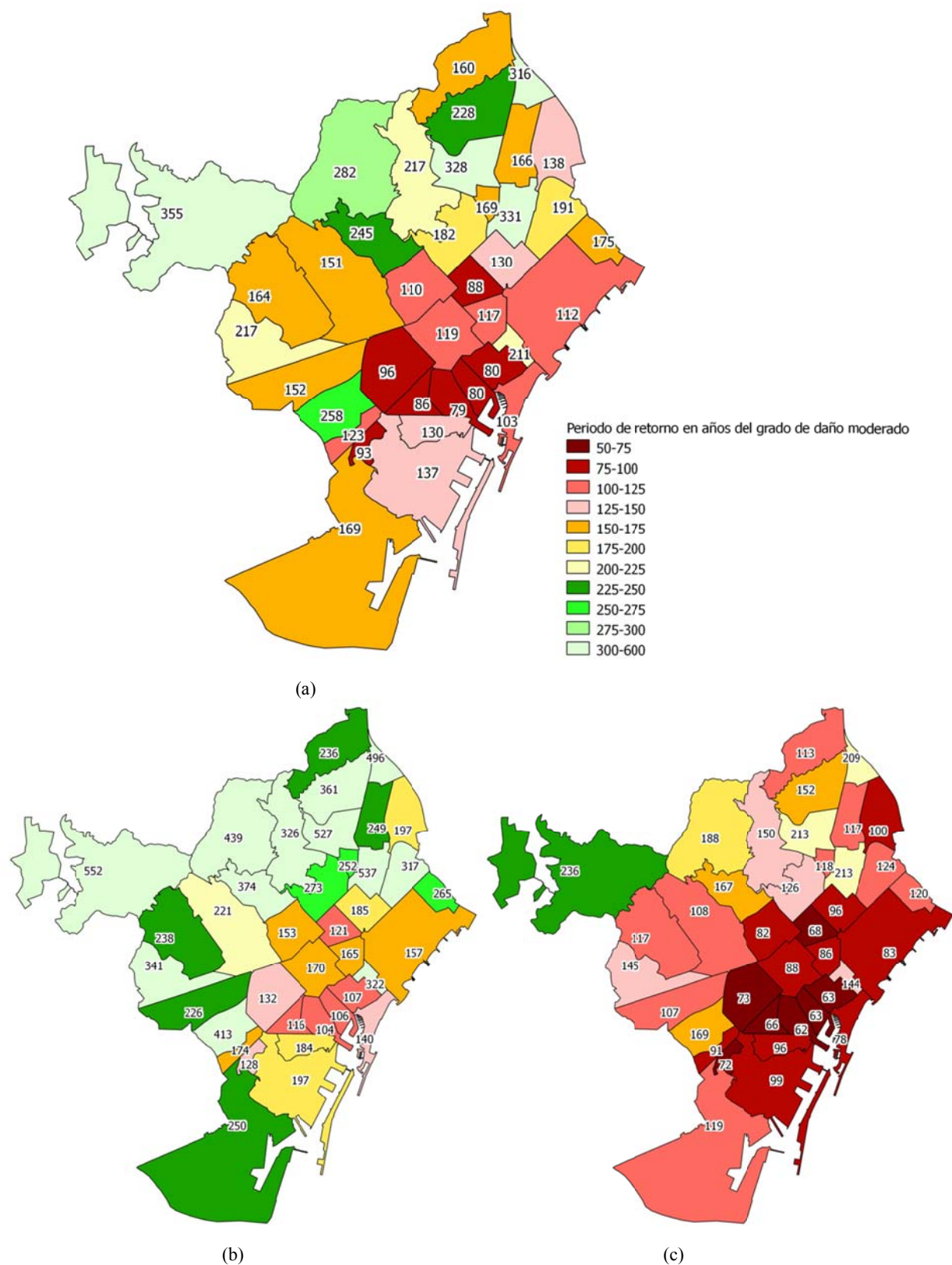


Figura 7-24. Periodos de retorno en años del grado de daño moderado en cada barrio de Barcelona de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c), estimadas mediante la curva de peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

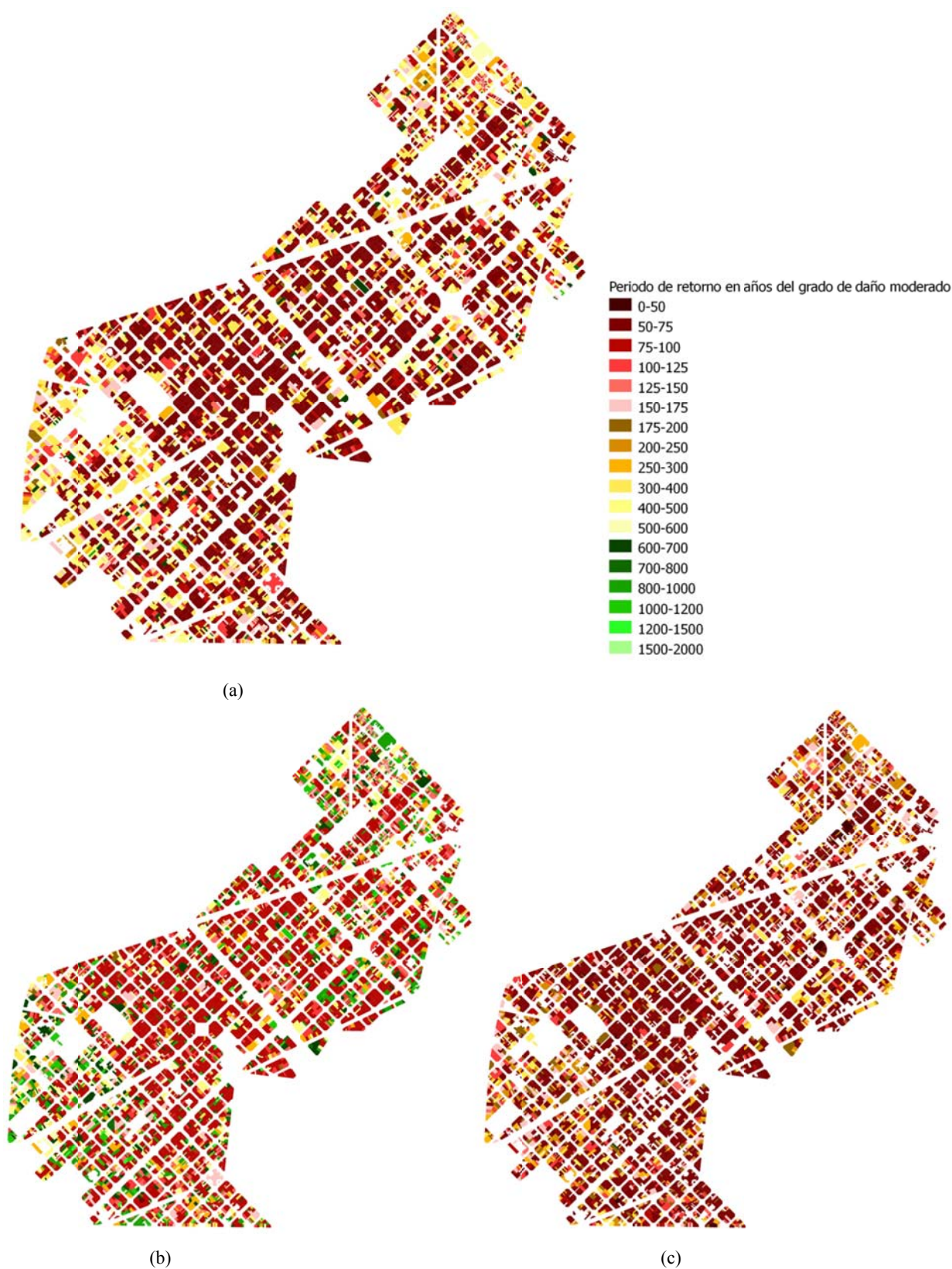


Figura 7-25. Periodos de retorno del grado de daño moderado en cada edificio del distrito del Eixample de Barcelona de acuerdo con las curvas del riesgo sísmico Mejor (a), Inferior (b) y Superior (c), estimadas mediante la curva de peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo (Figura 5-16).

De acuerdo con los resultados de riesgo sísmico usados para generar los mapas de la Figura 7-25, en el distrito del Eixample los edificios con mayor riesgo son aquellos en los que el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 42 y 61 años, con un valor medio de 50 años. Mientras que los que tienen menores niveles de riesgo sísmico en el distrito corresponden a aquellos en los que el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 679 y 1840 años, con un valor medio de 1134 años.

Riesgo sísmico mediante la peligrosidad sísmica de Barcelona estimada por Secanell et al (2004)

Para fines de comparación, además de obtener el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona mediante la curva de peligrosidad estimada en el presente trabajo (Figura 5-16), se ha estimado el riesgo sísmico de la ciudad mediante las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004) (Figura 3-4). Al hacerlo, se obtuvieron las curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona indicadas en la Figura 7-26 y en la Figura 7-27, a las cuales les corresponden los resultados de riesgo sísmico indicados en la Tabla 7-17 y en la Tabla 7-18, respectivamente. A partir de dichos resultados se puede identificar que de acuerdo con las curvas Inferior, Mejor y Superior promedio del riesgo sísmico de Barcelona, el grado de daño moderado en la ciudad tiene un periodo de retorno que varía entre 105 años y 191 años, con un valor medio de 139 años.

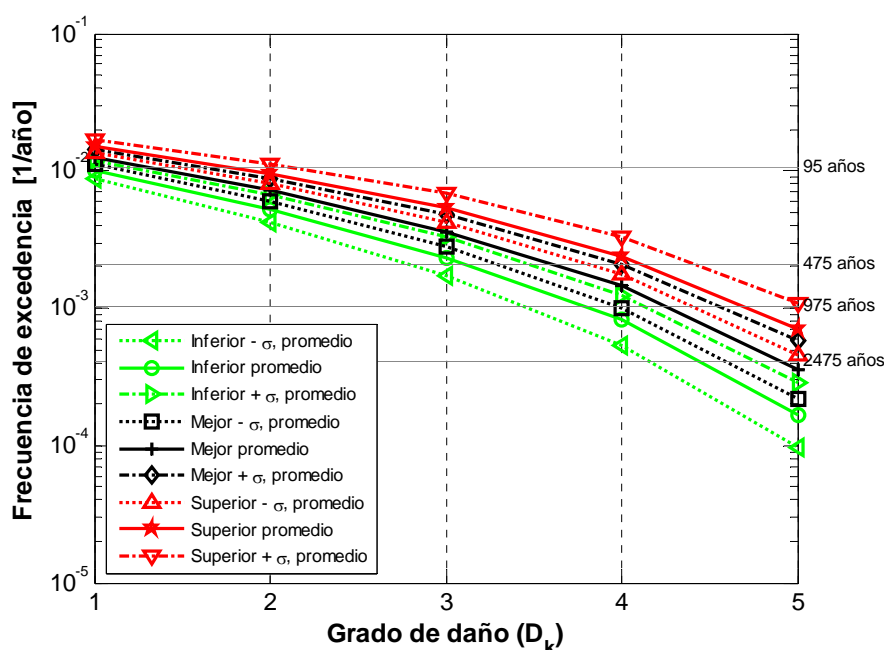


Figura 7-26. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (frecuencias de excedencia versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad obtenidas por Secanell et al (2004), y la presencia de efectos locales en el suelo.

Tabla 7-17. Frecuencias anuales de excedencia promedio de cada estado de daño en Barcelona obtenidos al considerar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004).

Curva de riesgo sísmico	$\nu(D1)$	$\nu(D2)$	$\nu(D3)$	$\nu(D4)$	$\nu(D5)$
Inferior – σ , promedio	8.83E-03	4.20E-03	1.73E-03	5.42E-04	9.64E-05
Inferior promedio	1.01E-02	5.23E-03	2.35E-03	8.19E-04	1.68E-04
Inferior + σ , promedio	1.19E-02	6.68E-03	3.27E-03	1.25E-03	2.89E-04
Mejor – σ , promedio	1.12E-02	5.99E-03	2.78E-03	1.01E-03	2.18E-04
Mejor promedio	1.26E-02	7.21E-03	3.63E-03	1.45E-03	3.55E-04
Mejor + σ , promedio	1.44E-02	8.88E-03	4.84E-03	2.11E-03	5.80E-04
Superior – σ , promedio	1.37E-02	8.16E-03	4.25E-03	1.76E-03	4.55E-04
Superior promedio	1.51E-02	9.52E-03	5.32E-03	2.40E-03	6.99E-04
Superior + σ , promedio	1.68E-02	1.13E-02	6.81E-03	3.35E-03	1.09E-03

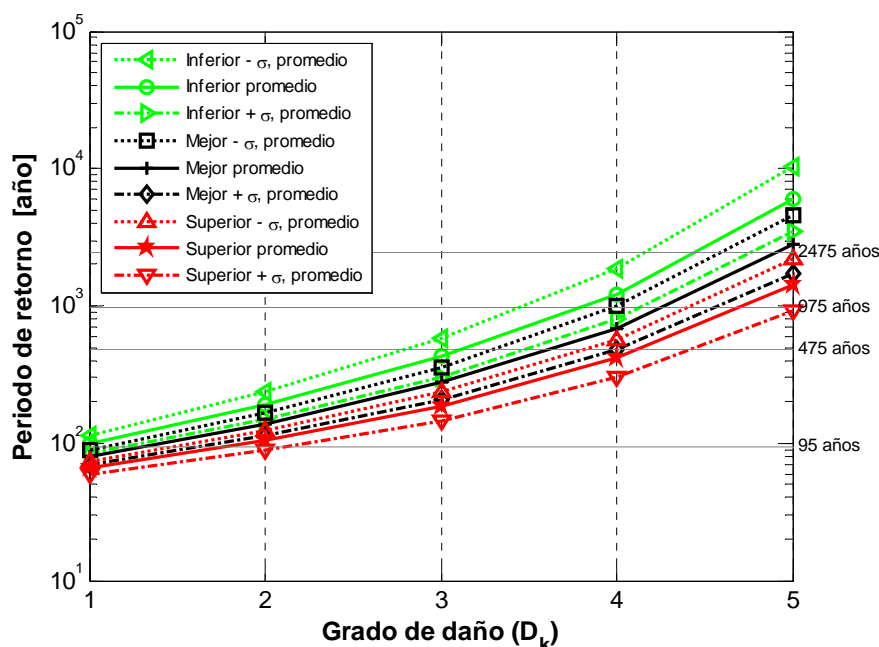


Figura 7-27. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona (periodos de retorno versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004), y la presencia de efectos locales en el suelo.

Tabla 7-18. Periodos de retorno promedio en años de cada estado de daño en Barcelona obtenidos al considerar las curvas de peligrosidad sísmica obtenidas por Secanell et al (2004).

Curva de riesgo sísmico	T(D1)	T(D2)	T(D3)	T(D4)	T(D5)
Inferior – σ , promedio	113	238	579	1845	10370
Inferior promedio	99	191	426	1221	5965
Inferior + σ , promedio	84	150	306	799	3465
Mejor – σ , promedio	89	167	359	991	4597
Mejor promedio	80	139	276	692	2816
Mejor + σ , promedio	70	113	207	474	1723
Superior – σ , promedio	73	123	235	568	2200
Superior promedio	66	105	188	416	1430
Superior + σ , promedio	59	88	147	299	921

Comparación de los resultados de riesgo obtenidos mediante la peligrosidad sísmica calculada en el presente trabajo, con los resultados de riesgo obtenidos al considerar la peligrosidad sísmica del estudio de Secanell et al (2004).

Los resultados de riesgo sísmico de Barcelona obtenidos mediante la curva de peligrosidad sísmica estimada en el presente trabajo, y los obtenidos mediante las curvas de peligrosidad sísmica determinadas por Secanell et al (2004), son dos ejemplos del tipo de resultados que se pueden obtener al estimar el riesgo sísmico mediante la metodología LM1_P. En el primer caso (C1) el riesgo sísmico se estima mediante una curva de peligrosidad (Figura 5-16), mientras que en el segundo caso (C2) el riesgo sísmico se estima considerando tres curvas de peligrosidad (Figura 3-4). Algunos de los resultados obtenidos en estos dos casos son comparables, por ejemplo, es posible comparar los resultados de riesgo sísmico obtenidos al considerar la curva media de la peligrosidad sísmica del caso C1, con los resultados de riesgo sísmico que se obtienen al considerar la curva única de peligrosidad sísmica del caso C2. Particularmente, se pueden comparar las curvas Mejor promedio del riesgo sísmico estimado en cada uno de los dos casos referidos (Figura 7-28). Al hacerlo, es posible identificar, por ejemplo, que la curva de riesgo obtenida en el caso C2, tiene para el grado de daño 1, una frecuencia anual de excedencia ligeramente por debajo que la frecuencia obtenida para el caso C1. Sin embargo, las frecuencias de excedencia de los grados de daño 3, 4 y 5 son ligeramente superiores en el caso C2. Tales resultados eran de esperarse debido a que: a) la curva de peligrosidad sísmica del caso C2 empieza a partir de una intensidad macrosísmica de 5, a diferencia de la curva de peligrosidad del caso C1 que empieza a partir de una intensidad macrosísmica de 4.5 (IV-V); y b) la curva de peligrosidad sísmica del caso C2 tiene frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas, ligeramente por encima que las del caso C1 (Figura 5-41).

Por otra parte, las diferencias en los resultados de riesgo sísmico de los casos C1 y C2 no son significativas. Por lo tanto, es posible concluir que para fines de riesgo sísmico es razonablemente adecuado considerar tanto las curvas de peligrosidad sísmica de Secanell et al (2004), como la obtenida en el presente trabajo. Sin embargo, es importante destacar que en ocasiones considerar la peligrosidad sísmica mediante tres curvas de peligrosidad sísmica como en el caso C2, puede contribuir a ofrecer una descripción más amplia sobre la incertidumbre asociada a la peligrosidad sísmica, y su influencia en la determinación del riesgo sísmico.

Debido a las importantes similitudes identificadas entre los resultados de riesgo sísmico obtenidos mediante la curva de peligrosidad estimada en el presente trabajo (caso C1), con los resultados de riesgo sísmico estimados mediante la curva media de peligrosidad sísmica determinada por Secanell et al (2004) (caso C2), en adelante, las principales menciones a los resultados de riesgo sísmico se referirán a los resultados de riesgo obtenidos mediante la peligrosidad sísmica estimada en el presente trabajo.

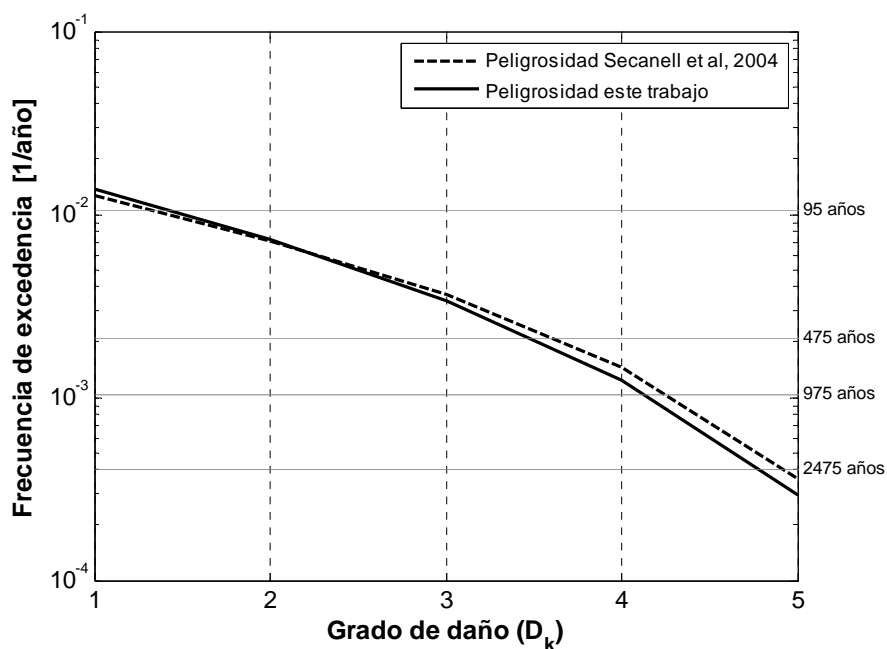


Figura 7-28. Curvas promedio Mejor del riesgo sísmico de Barcelona (frecuencias de excedencia versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio y la peligrosidad sísmica: a) obtenida en el presente trabajo y; b) estimada por Secanell et al (2004).

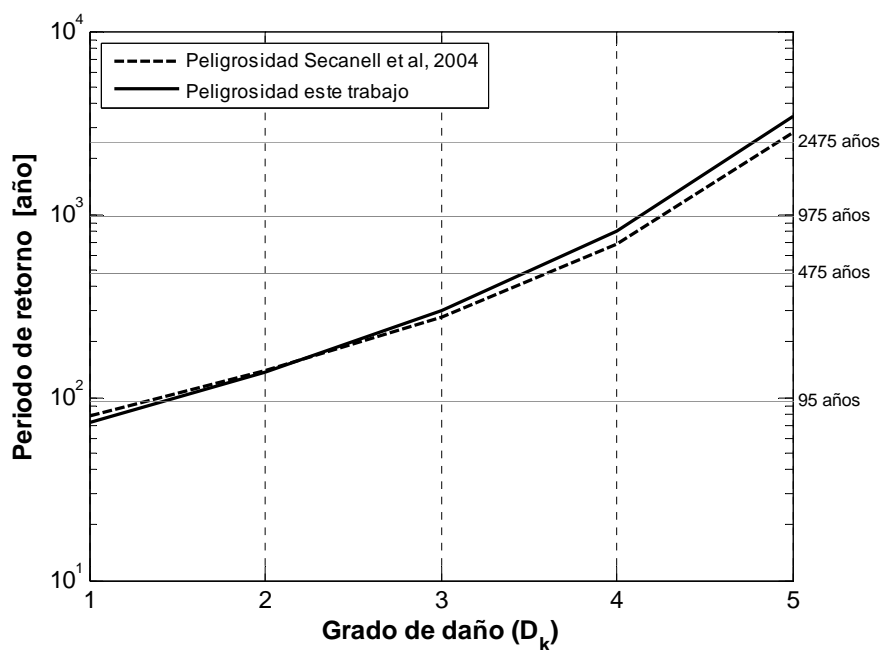


Figura 7-29. Curvas promedio Mejor del riesgo sísmico de Barcelona (períodos de retorno versus grado de daño), obtenidas al considerar las curvas Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio y la peligrosidad sísmica: a) obtenida en el presente trabajo y; b) estimada por Secanell et al (2004).

7.3 Otros aspectos del riesgo sísmico de Barcelona

En el apartado anterior se expresó el riesgo sísmico de Barcelona en términos de frecuencias anuales de excedencia de los estados de daño sísmico. Sin embargo, a partir de dichos resultados de riesgo es posible generar curvas de frecuencias anuales de excedencia versus pérdidas económicas. Para tal fin basta con sustituir los grados de daño por las pérdidas sísmicas asociadas a cada uno de dichos grados de daño, en las curvas de frecuencias anuales de excedencia versus grados de daño. Mientras que para estimar las pérdidas económicas promedio asociadas a cada grado de daño, es posible emplear las ecuaciones 7-1 y 7-2.

$$LD_k = \text{Área}D_k \cdot VD_k \quad 7-1$$

donde LD_k son las pérdidas económicas promedio (unidades monetarias), asociadas al grado de daño D_k , $\text{Área}D_k$ es el área total (unidades de área) con daño D_k , y VD_k es el costo de reparación del daño D_k (unidades monetarias por unidad de área).

$$VD_k = Vcu \cdot FD_k \quad 7-2$$

donde Vcu es el costo unitario de reparación en edificios del mismo tipo (unidades monetarias por unidad de área), y FD_k es el factor de daño correspondiente al grado de daño D_k .

En el caso de Barcelona las pérdidas sísmicas asociadas a cada grado de daño se obtuvieron al hacer las consideraciones siguientes: a) que la superficie total destinada a vivienda en Barcelona es igual a 63327130 m² (Ayuntamiento de Barcelona, 2010); b) que en la estimación de pérdidas se considera únicamente el costo de recuperar el estado original de los edificios dañados. Para el caso de Barcelona, el costo de reparación en edificios por metro cuadrado se consideró igual a 1152.11 (€/m²) (Lantada et al, 2009b). Es importante señalar que este último valor es similar al considerado en otros estudios en los que han estimado pérdidas sísmicas en edificios residenciales (Lantada, 2007; Dolce et al, 2006; Grünthal et al, 2006); c) que los factores de daño empleados para estimar las pérdidas económicas asociados a cada estado de daño deben ser valores similares a los indicados en la Tabla 7-19. En el presente caso se eligieron los factores de daño usados por Dolce et al (2006), los cuales son muy similares a los propuestos en el ATC-13, y a los considerados por Lantada et al (2009b) (Tabla 7-19).

De tal forma que, por ejemplo, las pérdidas sísmicas promedio en Barcelona asociadas al grado de daño 1, se obtuvieron de acuerdo con lo indicado en la Ec. 7-3. De manera similar se obtuvieron las pérdidas sísmicas promedio asociadas al resto de los grados de daño (Tabla 7-20). A partir de las frecuencias anuales de excedencia asociadas a cada grado de daño en Barcelona (Tabla 7-10), y de las pérdidas sísmicas estimadas (Tabla 7-20) es posible generar la Tabla 7-21 y la Figura 7-30.

Tabla 7-19. Ejemplos de factores de daño para estimar pérdidas económicas.

Grado de daño	Factores de daño (FD_k)		
	Usados por Dolce et al (2006).	Usados por Lantada et al (2009b) de acuerdo con las recomendaciones de Vacareanu et al (2004).	Propuestos en el ATC-13 (1985).
1	0.035	0.020	0.055
2	0.145	0.100	0.200
3	0.305	0.500	0.450
4	0.800	1.000	0.800
5	1.000	1.000	1.000

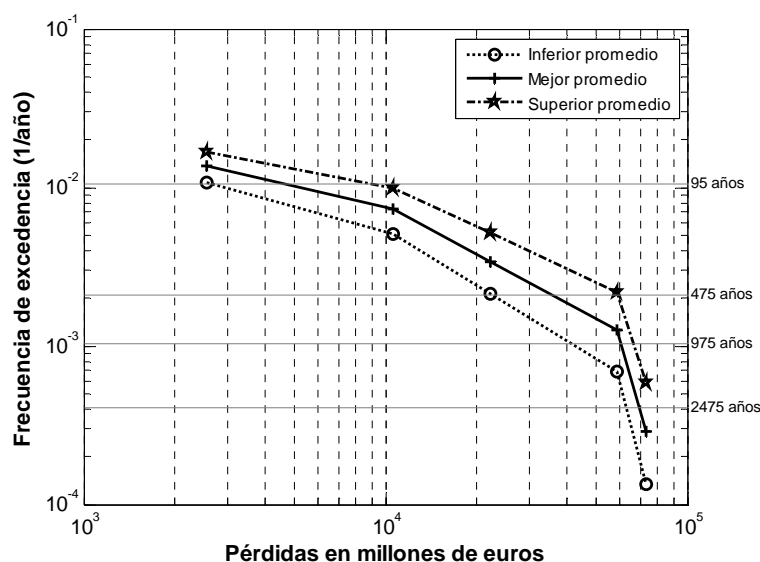
$$LD_1 = \text{Área}D_1 \cdot VD_1 = 63327130 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 1152.11 \text{ (€/m}^2\text{)} \cdot 0.035 = 2554 \text{ millones de euros (M€)} \quad \mathbf{7-3}$$

Tabla 7-20. Pérdidas sísmicas promedio en M€ asociadas a la ocurrencia de cada grado de daño en Barcelona.

LD_1	LD_2	LD_3	LD_4	LD_5
2554	10579	22253	58368	72960

Tabla 7-21. Frecuencias anuales de excedencia promedio de diferentes valores de las pérdidas sísmicas promedio (M€) de Barcelona.

Curva de riesgo sísmico	2554 M€	10579 M€	22253 M€	58368 M€	72960 M€
Inferior promedio	1.08E-02	5.09E-03	2.12E-03	6.89E-04	1.35E-04
Mejor promedio	1.37E-02	7.26E-03	3.39E-03	1.25E-03	2.89E-04
Superior promedio	1.69E-02	9.92E-03	5.15E-03	2.16E-03	5.82E-04

**Figura 7-30. Curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.**

De acuerdo con las curvas de pérdidas de la Figura 7-30, las pérdidas sísmicas promedio en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años, varían entre 22000 y 59000 M€, con un valor medio de 37000

M€. El orden de magnitud de dichas pérdidas es razonable si se toma en cuenta que Lantada et al (2009b), estimaron que un evento sísmico que generase una intensidad sísmica de VII en Barcelona, provocaría unas pérdidas en los edificios residenciales por un valor de 12188 M€.

De manera similar, es posible obtener las curvas de riesgo sísmico en términos de pérdidas sísmicas para cada uno de los distritos de Barcelona. En la obtención de dichas curvas de riesgo se consideraron las superficies destinadas a vivienda indicadas en la Tabla 7-22. De acuerdo con tales curvas de riesgo (Figura 7-31, Figura 7-32, Figura 7-33), en el distrito de Ciutat Vella las pérdidas sísmicas promedio para un periodo de retorno de 475 años varían entre 2500 y 4000 M€, con un valor medio de 3600 M€. Mientras que para el mismo periodo de retorno las pérdidas sísmicas promedio en el distrito del Eixample varían entre 6900 y 10440 M€, con un valor medio de 10200 M€.

Tabla 7-22. Superficie destinada a vivienda por distrito de Barcelona (Ayuntamiento de Barcelona, 2010).

	Distrito	Superficie (m ²)
1	Ciutat Vella	3957957
2	Eixample	12774244
3	Sants-Montjuïc	6012170
4	Les Corts	3674114
5	Sarrià-Sant Gervasi	8329668
6	Gràcia	5101754
7	Horta-Guinardó	5694883
8	Nou Barris	4942584
9	Sant Andreu	4824535
10	Sant Martí	8015221
	Total	63327130

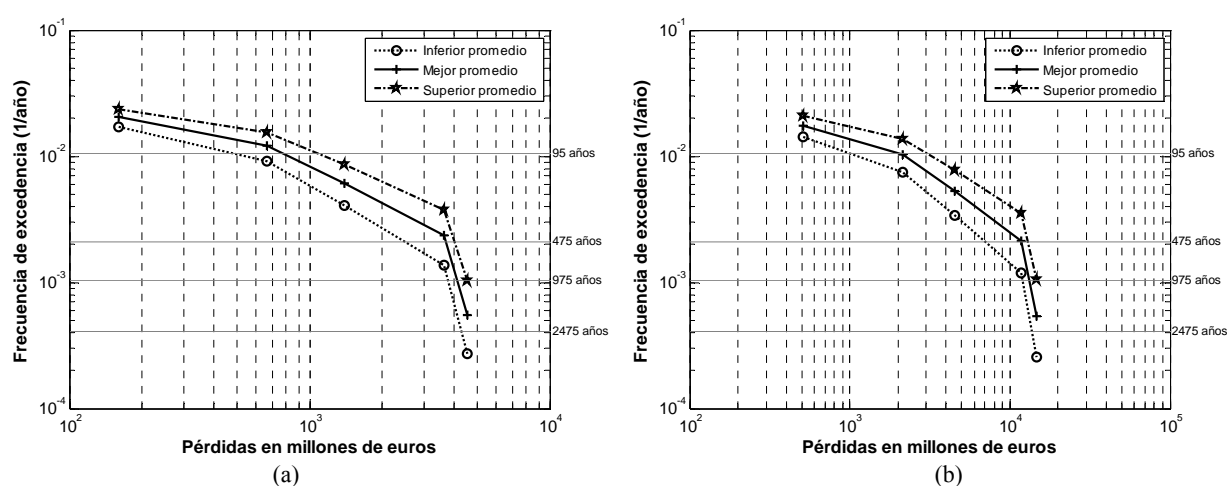


Figura 7-31. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Ciutat Vella (a) y Eixample (b) de Barcelona, en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.

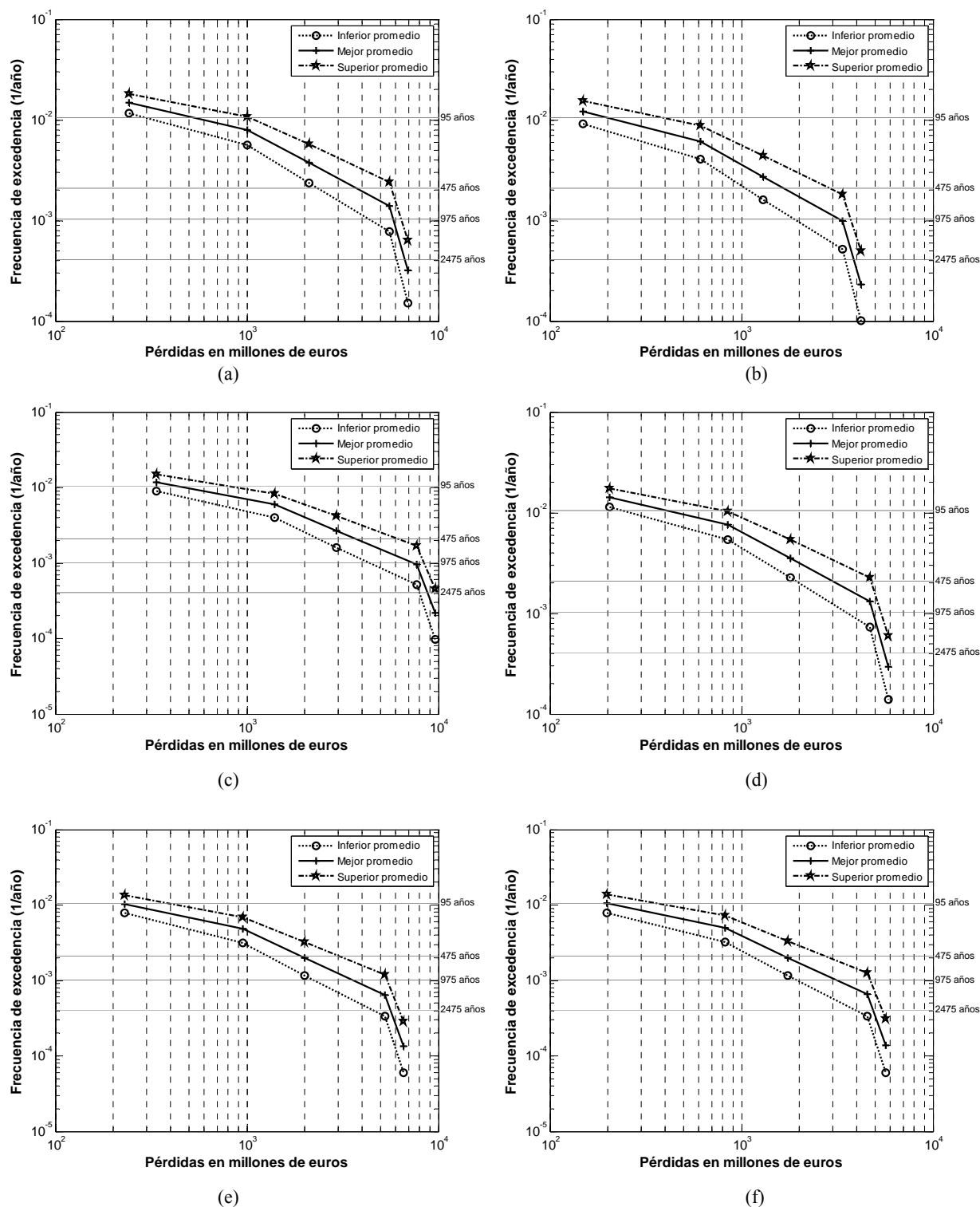


Figura 7-32. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Sants-Montjuïc (a), Les Corts (b), Sarrià-Sant Gervasi (c), Gràcia (d), Horta-Guinardó (e) y Nou Barris (f) de Barcelona, en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.

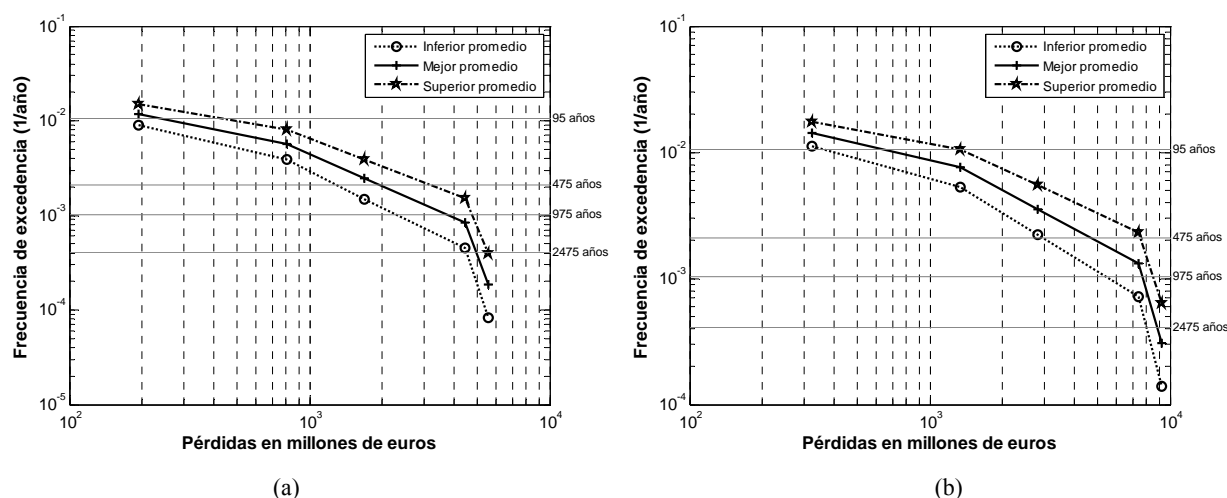


Figura 7-33. Curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Sant Andreu (a) y Sant Martí (b) de Barcelona, en términos de M€ versus frecuencias de excedencia.

7.4 Discusión

Los resultados obtenidos en el presente capítulo permiten destacar las diferencias de la metodología LM1_P con respecto a la metodología LM1 de Risk-UE. Por ejemplo, si se consideran los tres principales elementos empleados para estimar el riesgo sísmico es posible distinguir tres diferencias relevantes entre las metodologías LM1_P y LM1: 1) la peligrosidad sísmica en el método LM1_P se representa mediante una curva o conjunto de curvas que describen las frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas, mientras que en el método LM1 la peligrosidad sísmica corresponde a un escenario sísmico, es decir, al valor de una intensidad macrosísmica; 2) la vulnerabilidad sísmica en el método LM1_P se representa mediante funciones de probabilidad que describen probabilidades de que se presenten diferentes valores del índice de vulnerabilidad, mientras que en el método LM1 la vulnerabilidad sísmica se representa mediante un número único (índice de vulnerabilidad total); 3) el riesgo sísmico en el método LM1_P se representa mediante curvas de frecuencias de excedencia versus grado de daño, a diferencia del método LM1 en el que los resultados de riesgo consisten en un grado de daño medio o en las probabilidades de ocurrencia de cada grado de daño sísmico, asociadas a la ocurrencia de una sola intensidad macrosísmica.

De acuerdo con los resultados de riesgo sísmico de Barcelona se confirma que el riesgo sísmico de la ciudad no debe obviarse, porque en la ciudad hay un riesgo sísmico importante debido a la existencia de edificios con una alta vulnerabilidad sísmica en una zona con una moderada peligrosidad sísmica. Por ejemplo, el grado de daño moderado en Barcelona, tiene una frecuencia anual de excedencia que varía entre 5.09×10^{-3} y 9.92×10^{-3} , con un valor medio de 7.26×10^{-3} . En otras palabras, el grado de daño

moderado en Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno que varía entre 101 y 196 años, con un valor medio de 138 años.

Por otra parte, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico, los distritos de Barcelona con los mayores niveles de riesgo sísmico son Ciutat Vella y el Eixample. Mientras que uno de los distritos con los menores niveles de riesgo sísmico es el de Nou Barris. Estas últimas conclusiones coinciden con los resultados obtenidos por Lantada et al (2009b). Particularmente, de acuerdo con los resultados del presente trabajo, en el distrito de Ciutat Vella el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 65 y 110 años, con un valor medio de 82. Mientras que en el distrito del Eixample, el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 73 y 133 años, con un valor medio de 96 años.

Si se consideran las curvas promedio del riesgo sísmico en términos de pérdidas económicas, es posible concluir también que la magnitud de las pérdidas sísmicas que se pueden presentar en Barcelona, y en especial en determinados distritos de la ciudad, es importante, y por lo tanto no debe obviarse.

7.5 Resumen y conclusiones

En el presente capítulo se describió el procedimiento seguido para estimar el riesgo sísmico de los edificios de Barcelona, mediante la metodología LM1_P. Particularmente, se obtuvieron curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado. A partir de dichas curvas fue posible obtener curvas promedio del riesgo sísmico de barrios, distritos y la ciudad. En función de los resultados obtenidos es posible concluir que hay regiones de la ciudad que tiene un riesgo sísmico importante debido a la combinación de una alta vulnerabilidad sísmica con una moderada peligrosidad sísmica. El mayor riesgo sísmico se aprecia en los edificios de mampostería no reforzada, que a su vez constituyen los edificios con los mayores niveles de vulnerabilidad sísmica de la ciudad.

En términos cualitativos los resultados obtenidos en el presente estudio están de acuerdo con los resultados obtenidos en los estudios previos de Lantada et al (2009b), Lantada (2007) y Mena (2002). Sin embargo, debido a que los estudios previos se enfocaron en la obtención de escenarios sísmicos, no se generaron en dichos trabajos curvas de riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia del daño. Por lo tanto, dichas curvas de riesgo constituyen una de las principales aportaciones del presente trabajo al conocimiento del riesgo sísmico de la ciudad de Barcelona.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la metodología LM1_P constituye una opción adecuada para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, por lo tanto, dicha metodología implementada en el código USERISK 2011, puede constituir un elemento que contribuya a que aumenten el número de regiones en el mundo, que dispongan de un estudio de riesgo sísmico actualizado.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

8.1 Conclusiones por capítulo

Conclusiones sobre el Capítulo 3

La metodología LM1_P, obtenida al modificar la metodología LM1 de Risk-UE, es una adecuada opción para estimar el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, mediante un enfoque probabilista. En la metodología probabilista se consideran los tres elementos básicos del riesgo sísmico: 1) la peligrosidad sísmica, 2) la vulnerabilidad sísmica y, 3) la función de daño.

En la metodología LM1_P la peligrosidad sísmica se expresa en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas. Con la finalidad de estimar la peligrosidad sísmica se propone el uso del modelo probabilista propuesto por Cornell-Esteva, el cual está implementado en el código CRISIS2008 (Ordaz et al, 2008). Versiones previas de este último código fueron empleadas en el proyecto de Risk-UE. Mientras que la vulnerabilidad sísmica de los edificios está representada mediante funciones de probabilidad, que indican las probabilidades de que se presenten diferentes valores del índice de vulnerabilidad. Tal representación permite considerar importantes incertidumbres asociadas a la estimación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios. Finalmente, en la metodología LM1_P, el riesgo sísmico de los edificios se expresa principalmente en términos de frecuencias de excedencia de grados de daño. Por lo tanto, es posible observar que para estimar el riesgo sísmico mediante la metodología LM1_P se emplea un enfoque probabilista integral. Este enfoque es una característica importante que distingue a la metodología LM1_P con respecto a la metodología LM1 de Risk-UE. Por lo tanto, los procedimientos y el tipo de resultados de riesgo sísmico que se obtienen con las metodologías LM1_P y la LM1 de Risk-UE son diferentes. De tal forma que los resultados de riesgo sísmico estimados mediante la metodología LM1_P es información que complementa a los resultados de riesgo sísmico, obtenidos a través de la metodología LM1 de Risk-UE. Los resultados obtenidos mediante la metodología LM1_P enfatizan el carácter probabilista de los mismos, y pueden contribuir a facilitar la toma de decisiones respecto a la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios en zonas urbanas.

Conclusiones sobre el Capítulo 4

El código USERISK 2011 constituye una valiosa herramienta para estimar la vulnerabilidad, y el riesgo sísmico de edificios en zonas urbanas, mediante las metodologías LM1_P y LM1 de Risk-UE. En el primer caso los resultados de vulnerabilidad son los valores de alfa y beta que definen a las funciones de probabilidad, que a su vez representan la vulnerabilidad sísmica de cada edificio, y los resultados de riesgo sísmico son curvas de frecuencias de excedencia versus grados de daño. Mientras que en el segundo caso la vulnerabilidad estimada se describe mediante el índice de vulnerabilidad total de cada edificio, y los resultados de riesgo sísmico son el grado de daño medio y las probabilidades de ocurrencia de cada grado de daño, asociadas a una intensidad macrosísmica.

Los datos que requiere el código USERISK 2011 para realizar las estimaciones de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico, se deben proporcionar mediante archivos de texto. Esto último permite que los datos existentes sean fácilmente concentrados en los archivos de datos requeridos por USERISK 2011. Tal característica es especialmente importante, porque con frecuencia en las zonas urbanas es necesario estimar el riesgo sísmico de cientos o miles de edificios.

Mediante USERISK 2011 es posible estimar tanto la vulnerabilidad sísmica como el riesgo sísmico de edificios. En ambos casos USERISK 2011 genera archivos de texto que contienen los resultados obtenidos. Esto último facilita el manejo e interpretación de los resultados de la vulnerabilidad y el riesgo sísmicos.

USERISK 2011 es una herramienta que puede contribuir a que se realicen estudios de riesgo sísmico en las regiones en las que no se han realizado recientemente. Por otra parte, la existencia de USERISK 2011 puede facilitar que en las regiones del mundo en las que se obtuvieron escenarios de riesgo sísmico mediante la metodología LM1 de Risk-UE, se estime ahora el riesgo sísmico mediante la metodología LM1_P, y se obtengan curvas de riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia de los grados de daño.

Conclusiones sobre el Capítulo 5

La estimación de la peligrosidad sísmica de Barcelona implica retos importantes debido a que la ciudad está localizada en una región de sismicidad entre moderada y baja. Por tal motivo, emplear una metodología probabilista para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona constituye una de las mejores alternativas, para identificar la peligrosidad sísmica de la ciudad.

Para fines de comparación se estimó la peligrosidad sísmica en términos de intensidades macrosísmicas y en términos de la aceleración máxima del terreno (PGA). Adicionalmente, se realizó un análisis de

sensibilidad de las principales variables que determinan los niveles de peligrosidad sísmica de la región. De acuerdo con los resultados, el elemento de mayor influencia en los niveles de peligrosidad sísmica fue el valor de la ley de atenuación.

El código CRISIS2008 permitió estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona, directamente en términos de frecuencias de excedencia de las intensidades macrosísmicas. En este caso se consideraron leyes de atenuación propuestas por López Casado et al (2000a) para la península Ibérica. De acuerdo con los resultados, en Barcelona la intensidad de VI tiene en promedio un periodo de retorno de 278 años. Mientras que a la intensidad de VII le corresponde en promedio un periodo de retorno de 2041 años. De manera similar se obtuvo que la intensidad que en Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno de 475 años es igual a 6.3 (VI-VII). Estos resultados tienen grandes similitudes con los obtenidos en estudios previos (Secanell et al, 2004; Peláez y López, 2002; NCSE-02, 2002; Goula et al, 1997). Por ejemplo, Secanell et al (2004) obtuvieron que la intensidad que en Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno de 475 años es igual a 6.5, mientras que Goula et al (1997) obtuvieron que la intensidad que en promedio tiene ese periodo de retorno es igual a 6.3.

El código CRISIS2008 contiene importantes novedades con respecto al código CRISIS2007, siendo la novedad referente al tipo de leyes de atenuación que se pueden emplear para estimar la peligrosidad sísmica, la que permitió obtener mediante el CRISIS2008 la peligrosidad sísmica de Barcelona en términos de intensidades macrosísmicas. Por lo tanto, es posible concluir que el código CRISIS2008 es más apropiado que el código CRISIS2007, si se desea realizar un análisis de peligrosidad sísmica en términos de intensidades macrosísmicas. Es importante mencionar que aunque el nombre del CRISIS2008 se refiera al año 2008, dicho código incluye también actualizaciones hasta el año 2011.

Por otra parte, en las estimaciones realizadas en términos de PGA mediante el CRISIS2008, se empleó la ley de atenuación de Ambraseys et al (1996), la cual fue determinada considerando datos de sismos ocurridos en Europa y ha sido considerada adecuada para estimar la peligrosidad sísmica de Barcelona (Irizarry et al, 2010). De acuerdo con los resultados de dichas estimaciones el valor de PGA en Barcelona es en promedio, un valor igual a 85 cm/s^2 para un periodo de retorno de 475 años. Los resultados obtenidos en el presente estudio están dentro del intervalo de valores que se han obtenido en estudios previos (Irizarry et al, 2010; Secanell et al, 2008; Peláez y López, 2002; Jiménez et al, 1999). En la mayoría de tales estudios, se reconoce que es razonable esperar para Barcelona una aceleración máxima del terreno, significativamente mayor que la considerada en las normas NCSE-02 (2002) para dicha ciudad, y para un periodo de retorno de 500 años. Los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden también con esta última afirmación. Por lo tanto, es conveniente revisar los valores de PGA que deberán considerarse para Barcelona en futuras ediciones de las NCSE.

Conclusiones sobre el Capítulo 6

La valiosa base de datos proporcionada por el Ayuntamiento de Barcelona, permitió estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la ciudad, con un nivel de detalle importante. Por lo tanto, es conveniente reconocer el gran esfuerzo que el Ayuntamiento de Barcelona y los autores de los estudios previos del riesgo sísmico de la ciudad, han realizado a través de varios lustros para disponer de una base de datos tan completa sobre los edificios de Barcelona.

Las herramientas GIS constituyeron en el presente trabajo una importante ayuda en la etapa de la determinación de las características de los edificios de Barcelona. Por ejemplo, se usó software GIS para estimar el perímetro y el área de los edificios en planta, lo cual a su vez permitió estimar la irregularidad geométrica en planta de dichos edificios. Es importante destacar que gracias a tales herramientas, fue posible obtener información valiosa de cerca de 70000 edificios de Barcelona.

Para estimar la vulnerabilidad sísmica de Barcelona se empleó el código USERISK 2011. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible concluir que, en términos generales, Barcelona tiene una vulnerabilidad sísmica alta. Esta última afirmación obedece al hecho de que de acuerdo con los resultados indicados en las curvas de vulnerabilidad promedio, la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad en Barcelona sea mayor que 0.5, varía entre el 79.05% y el 93.21%, con un valor medio del 87.91%. Mientras que la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad en la ciudad sea mayor que 1.0 varía entre el 5.39% y el 22.93%, con un valor medio del 12.7%.

De manera similar, las curvas de vulnerabilidad promedio indican que la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad en los edificios de mampostería de Barcelona sea mayor que 1.0, varía entre el 7.37% y el 27.85%, con un valor medio del 15.54%. Mientras que la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad en los edificios de hormigón armado de Barcelona sea mayor que 1.0, varía entre el 2.36% y el 14.13%. Al respecto, es importante destacar que en Barcelona el 69.8% de sus edificios son de mampostería y el 26.2% de hormigón armado.

Por otra parte, en relación a la vulnerabilidad sísmica de los distritos de la ciudad es posible concluir que los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden en términos generales con los de estudios previos. De tal forma que el distrito de Ciutat Vella se confirma como uno de los de mayor vulnerabilidad sísmica en la ciudad. Por ejemplo, de acuerdo con las curvas de vulnerabilidad promedio en este distrito la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad de los edificios sea mayor que 1.0, varía entre el 18.76% y el 44.0%, con un valor medio del 30.43%. Otro de los distritos que se distingue por sus altos niveles de vulnerabilidad es el del Eixample, donde la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad de los edificios sea mayor que 1.0, varía entre el 13.00% y el 35.59%, con un valor medio del 23.14%.

Respecto a los barrios de la ciudad es posible concluir que tres de los cuatro barrios de Ciutat Vella se destacan por ser los más vulnerables de Barcelona, porque en ellos la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 1.0 varía entre el 21% y el 45%, con un valor medio del 32%. Mientras que el barrio de Sagrera en el distrito de Sant Andreu es uno de los barrios de menor vulnerabilidad en la ciudad, porque en él la probabilidad de que el índice de vulnerabilidad sea mayor que 1.0, varía entre el 1.5% y el 8.2%, con un valor medio del 4.1%. Es importante señalar que estos resultados tienen coincidencias importantes, con los resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos por Mena (2002), por Lantada (2007) y por Lantada et al (2009b). Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente trabajo ofrecen información adicional a la obtenida en los estudios previos mencionados. Porque en los estudios previos la vulnerabilidad sísmica de cada edificio se representa mediante un número, a diferencia del presente trabajo en el que la vulnerabilidad sísmica de un edificio se representa mediante funciones de probabilidad, que describen las probabilidades de que se presenten diferentes valores del índice de vulnerabilidad.

En función de lo anterior, es posible concluir que el método LM1_P es un avance significativo en los métodos y técnicas de evaluación de vulnerabilidad y riesgo al uso y, por consiguiente, se propone como una opción adecuada para estimar la vulnerabilidad sísmica de zonas urbanas.

Conclusiones sobre el Capítulo 7

Para estimar el riesgo sísmico de Barcelona se empleó el código USERISK 2011. De acuerdo con los resultados puede señalarse que en términos generales la ciudad tiene un riesgo sísmico entre moderado y alto. Por ejemplo, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona, el grado de daño moderado tiene una frecuencia anual de excedencia que varía entre 5.09×10^{-3} y 9.92×10^{-3} , con un valor medio de 7.26×10^{-3} . Estos resultados equivalen a decir que el grado de daño moderado en Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno que varía entre 101 y 196 años, con un valor medio de 138 años. Es importante mencionar que de acuerdo con los resultados obtenidos, si no se tomaran en cuenta los efectos de sitio en la estimación del riesgo sísmico, entonces el grado de daño moderado en Barcelona tendría en promedio un periodo de retorno que variaría entre 134 y 289 años, con un valor medio de 193 años. Por lo tanto, es posible observar que la influencia de los efectos de sitio en el riesgo sísmico de la ciudad es importante.

Por otra parte, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico de los edificios de mampostería de Barcelona, el grado de daño moderado tiene una frecuencia anual de excedencia, que varía entre 6.42×10^{-3} y 1.16×10^{-2} , con un valor medio de 8.84×10^{-3} . En otras palabras, el grado de daño moderado en los edificios de mampostería de Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno que varía entre 86 y 156 años, con un valor medio de 113 años. Al mismo tiempo, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo

sísmico de los edificios de hormigón armado de Barcelona, el grado de daño moderado tiene una frecuencia anual de excedencia que varía entre 2.15×10^{-3} y 6.21×10^{-3} , con un valor medio de 3.81×10^{-3} . Estos resultados equivalen a decir que el grado de daño moderado en los edificios de mampostería de Barcelona tiene en promedio un periodo de retorno que varía entre 161 y 466 años, con un valor medio de 263 años.

Al observar las curvas promedio del riesgo sísmico de los distritos de Barcelona, es posible identificar que Ciutat Vella y el Eixample se distinguen por tener los mayores niveles de riesgo sísmico en la ciudad. Por ejemplo, en el distrito de Ciutat Vella el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 65 y 110 años, con un valor medio de 82 años. Mientras que en el distrito del Eixample el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 73 y 133 años, con un valor medio de 96 años. En cambio, de acuerdo con las curvas promedio del riesgo sísmico los distritos de Nou Barris y Horta-Guinardó, son los que tienen los menores niveles de riesgo sísmico en la ciudad. En el caso de Nou Barris el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 140 y 312 años, con un valor medio de 204 años. Mientras que en el caso de Horta-Guinardó el grado de daño moderado tiene un periodo de retorno que varía entre 144 y 315 años, con un valor medio de 209 años. Estudios previos como el de Lantada (2007) y Lantada et al (2009b), coinciden en identificar a los distritos de Ciutat Vella y el Eixample, como los distritos con los mayores niveles de riesgo sísmico en Barcelona.

En el presente estudio se obtuvieron también curvas promedio del riesgo sísmico de Barcelona en términos de millones de euros versus frecuencias de excedencia. De acuerdo con estas curvas, las pérdidas sísmicas promedio en Barcelona para un periodo de retorno de 475 años, varían entre 22000 y 59000 M€, con un valor medio de 37000 M€. Por lo tanto, nuevamente se confirma que el riesgo sísmico de la ciudad es importante y por tal razón no debe obviarse.

Finalmente, al evaluar el procedimiento metodológico empleado para estimar el riesgo sísmico de Barcelona, es posible concluir que el método LM1_P es un avance importante en los métodos y técnicas empleadas en la estimación del riesgo sísmico, y por lo tanto, se considera una opción recomendable para estimar el riesgo sísmico de zonas urbanas.

8.2 Conclusiones generales

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo es posible concluir que la metodología LM1_P es una metodología simplificada, que puede contribuir a que se incremente el número de regiones en el mundo que dispongan de estudios recientes sobre el riesgo sísmico de sus zonas urbanas.

Por otra parte, es conveniente continuar destacando entre las autoridades de gobierno y la sociedad en general, la importancia de que se apoyen las diversas actividades que pueden contribuir a reducir el riesgo sísmico de las ciudades. Por ejemplo, sería conveniente que el Ayuntamiento de Barcelona, y en general todos los gobiernos municipales, tomaran en cuenta el tipo de datos que facilitan la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios a escala urbana. Al hacerlo, dichas autoridades de gobierno podrían considerar la posibilidad de recopilar mayor cantidad de datos sobre los edificios de las ciudades, que puedan contribuir a realizar estimaciones del riesgo sísmico de los edificios, con menor incertidumbre.

Los desastres recientes en Haití, Chile y Japón asociados a la ocurrencia de sismos, han confirmado que la magnitud del daño depende de muchos factores, siendo el desconocimiento y la negligencia dos de los factores que aumentan en gran medida la magnitud del daño que se genera. Al mismo tiempo, tales experiencias han confirmado que las labores de prevención son fundamentales para reducir la magnitud de los daños. Por otra parte, los grandes daños generados por el sismo y el tsunami en Japón, sugieren que es importante que las sociedades estimen con mayor frecuencia los peligros sísmicos y establezcan los niveles de riesgo que están dispuestas a aceptar en cada caso, para que de ser necesario realicen las labores pertinentes de mitigación del riesgo. De tal forma que el conocimiento del riesgo sísmico es una información fundamental para que en muchas regiones del mundo tomen decisiones oportunas, que eviten la ocurrencia de desastres en sus zonas urbanas, o al menos reduzcan en forma significativa la magnitud de dichos desastres.

8.3 Futuras líneas de investigación

Es recomendable emplear la información del daño sísmico en edificios generado por eventos sísmicos recientes (Japón, Chile, Haití, España), para continuar con la calibración de la función de daño sísmico empleada en las metodologías LM1_P y LM1. Por ejemplo, una tarea que puede contribuir a este fin es la estimación del escenario sísmico de la zona urbana de Lorca en España, asociado a la intensidad macrosísmica identificada en el reciente sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011. De manera que los resultados obtenidos en ese escenario sísmico estimado, se puedan comparar con el escenario de daño sísmico real, generado por el sismo del 11 de mayo en Lorca.

Otra tarea futura consiste en emplear un enfoque probabilista similar al utilizado en el desarrollo de la metodología LM1_P, para modificar la metodología LM2 de Risk-UE e incluir en ella mayores consideraciones probabilistas. De tal forma que sea posible tomar en cuenta un mayor número de las incertidumbres presentes en los principales elementos que determinan el riesgo sísmico de los edificios, y

al mismo tiempo se puedan obtener resultados de riesgo sísmico con sus respectivos intervalos de confianza.

Por otra parte, es conveniente desarrollar procedimientos que permitan vincular en forma adecuada las metodologías de nivel 1 (LM1 y LM1_P) con las metodologías de nivel 2 (LM2 y sus nuevas versiones), con la finalidad de facilitar la retroalimentación entre las metodologías de ambos niveles. Se trata de que por ejemplo, las metodologías de nivel 1 puedan beneficiarse de los resultados que se pueden obtener mediante la metodología LM2, donde es posible usar acelerogramas reales.

Finalmente, es recomendable aplicar la metodología LM1_P en regiones con mayor peligrosidad sísmica que Barcelona. Por ejemplo, es posible aplicar la metodología en regiones de México de alta peligrosidad sísmica. Una de las ventajas de realizar la aplicación a México, es que en dicho país tienen importante experiencia en el desarrollo y aplicación de las metodologías de estimación del riesgo sísmico de nivel 2, es decir, metodologías como la LM2 de Risk-UE. De tal forma que sería posible comparar los resultados generados mediante una metodología de nivel 2 ampliamente validada, con los resultados obtenidos al aplicar la metodología LM1_P.

REFERENCIAS

- Aki, K., Lee, W. H. K. (2003). Glossary of interest to earthquake and engineering seismologists. En Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P.C., Kisslinger, C. (Eds), *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, (pp. 1793-1856).
- Alfaro, A., Goula, X., Susagna, T., Pujades, L. G., Canas, J.A., Navarro, M., Sánchez, J. (1998). Estimación del período predominante del suelo a partir de microtemblores. Aplicación a Barcelona; 1ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Almería, España, 8 pp.
- Allen, R. M., Gasparini, P., Kamigaichi, O., Böse, M. (2009). The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview, *Seismological Research Letters*, 80(5): 682-693.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25: 371-400.
- Anagnostopoulos, S. (1996). Post-earthquake emergency assessment of building safety. Field Manual. European Commission, Directorate General XI, Civil protection, 61pp.
<http://ec.europa.eu/environment/civil/prote/cpactiv/cpact08a.htm>
- Anagnostopoulos, S., Moretti, M. (2008a). Post-earthquake emergency assessment of building damage, safety and usability-Part 1: Technical issues, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 223-232.
- Anagnostopoulos, S., Moretti, M. (2008b). Post-earthquake emergency assessment of building damage, safety and usability-Part 2: Organization, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 233-244.
- Ashworth, A. (1996). Assessing the life expectancies of buildings and their components in life cycle costing. Proceedings of the RICS construction, building and real estate research conference COBRA 1996. http://www.rics.org/site/download_feed.aspx?fileID=2163&fileExtension=PDF (Consultado el 8 de abril de 2008).
- Ashworth, A. (2004). *Cost Studies of Buildings*. London: Prentice Hall, 492 pp.
http://books.google.es/books?id=EYtN6AjaEgAC&printsec=frontcover&hl=en&source=gbp_navlinks_s#v=onepage&q=&f=false
(Consultado el 11 de diciembre de 2009).
- ATC-13 (1985). *Earthquake Damage Evaluation. Data for California*; Applied Technology Council; Redwood City, California, 492 pp.
- ATC-20-1 (2005). *Field Manual: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings*; Applied Technology Council; Redwood City, California.

- ATC-25 (1991). Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, Redwood City, California, 440 pp.
- ATC-58-1 (2002). Proceedings of FEMA-Sponsored Workshop on Communicating Earthquake Risk. Redwood City, California, 87 pp.
- ATC-69 (2008). Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage. State-of-the-Art and Practice Report; Applied Technology Council; Redwood City, California. 145 pp.
- ATC-71 (2008). Workshop Proceedings: NEHRP Workshop on Meeting the Challenges of Existing Buildings – Volume 1., FEMA, Washington, 164 pp. <http://www.nehrp.gov/pdf/atc71.pdf> (Consultado el 14 de septiembre de 2009).
- Ayuntamiento de Barcelona (2010). Superficie dels locals cadastrals (usos desagregats). Any 2010. <http://W20.bcn.cat/opendata> (Consultado el 25 de marzo de 2011).
- Bach, P. B., Kattan, M. W., Thornquist, M. D., Kris, M. G., Tate, R. C., Barnett, M. J., Hsieh, L. J., Begg, C. B. (2003). Journal of the National Cancer Institute, 95 (6): 470-478.
- Bach, P. B (2009). Smoking as a Factor in Causing Lung Cancer. Journal of the American Medical Association, 301 (5): 539-541.
- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Della Bella, M., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., Papa, F., Zuccaro, G. (2007). Field Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES). JRC 7914 Report, European Commission, Italy, 100 pp.
- Bai, J-W., Hueste, M. B. D., Gardoni, P. (2009). Probabilistic Assessment of Structural Damage due to Earthquakes for Buildings in Mid-America; Journal of Structural Engineering; 135(10):1155-1163.
- Barbat, A. H., Yépez Moya, F., Canas, J. A. (1996). “Damage scenarios simulation for risk assessment in urban zones”, Earthquake Spectra, 2:3, 371-394.
- Barbat, A. H., Mena, U., Yépez, F. (1998). “Evaluación probabilista del riesgo sísmico en zonas urbanas”, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 14:2, 247-268.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lantada, N., Moreno, R. (2006a). “Performance of buildings under earthquakes in Barcelona, Spain”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21(8): 573-593.
- Barbat, A.H., Lagomarsino, S., Pujades, L. G. (2006b). Vulnerability assessment of dwelling buildings. En Oliveira, C. S., Roca, A., Goula, X. (Eds.), Assessing and Managing Earthquake Risk. Dordrecht, pp. 115-134.
- Barbat, A. H., Pujades L. G., Lantada N., Moreno, R. (2008). “Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 851–865.

- Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G., Lantada, N., Cardona, O. D., Marulanda M. C. (2009). "Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area", *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1):17-38.
- BC-NY (2007). Building Code of New York State. International Code Council, Inc. y New York State, USA. <http://publicecodes.citation.com/st/ny/st/b200v07/index.htm> (Consultado el 12 de julio de 2009).
- Beauval, C. (2003). Analyse des incertitudes dans une estimation probabiliste de l'aléa sismique, exemple de la France, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble I, 161 pp.
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., Parodi, S. (2007a). The vulnerability assessment of current buildings by a macroseismic approach derived from the EMS-98 scale. *Memorias del 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Girona, Cataluña, mayo, 15 pp.
- Bernardini A., Giovinazzi S., Lagomarsino S., Parodi S. (2007b). Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98. Pisa, Italy: 12th Italian Conference on Earthquake Engineering, June.
- Bernardini, A., Lagomarsino, S. (2008). The seismic vulnerability of architectural heritage. *Proceedings of the ICE. Structures & Buildings*;161(4):171-181.
<http://dx.doi.org/10.1680/stbu.2008.161.4.171>
- Bertero, V. V., Bozorgnia, Y. (2004). The Early Years of Earthquake Engineering and Its Modern Goal. En Bertero, V. V. y Bozorgnia, Y. (Eds.), *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering* (pp. 1-22). USA: CRC Press.
- Bommer, J. J., Abrahamson, N. A. (2006). Why Do Modern Probabilistic Seismic-Hazard Analyses Often Lead to Increased Hazard Estimates?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (6): 1967-1977.
- 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.
- Bray, J., Frost, D. (2010). Geo-engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake. GEER Association Report No. GEER-022, Versión 1, 272 pp.
http://www.geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Maule_Chile_2010/GEER_Report_Chile_2010_final.pdf (Consultado el 15 de septiembre de 2010).
- Brgm (2004). Synthesis of the application to Nice city. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 44 pp.
- Brown, H. M., Allen, R. M., Helweg, M., Khainovski, O., Neuhauser, D., Souf, A. (2011). Development of the ElarmS methodology for earthquake early warning: Realtime application in California and offline testing in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31: 188-200.
- Caicedo, C. (1993). "Vulnerabilidad Sísmica en Zonas Urbanas. Aplicación a un Sector de Eixample de Barcelona". Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

- Carreño, M. L., Cardona, O. D., Barbat, A. H. (2005). Evaluación “ex-post” del estado de daño en los edificios afectados por un terremoto. Colección de Monografías Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería – CIMNE, Barcelona, España, 115 pp.
- Carreño, M. L., Cardona, O. D., Barbat, A.H. (2007a). “Urban seismic risk evaluation: A holistic approach”, *Natural Hazards*, 40, 137-172.
- Carreño, M. L., Cardona, O. D., Marulanda, M. C., Barbat, A. H. (2007b). Herramienta computacional para la evaluación post-sísmica de daños en edificios, *Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 7(1): 3-24.
- Casas-Sainz, A. M., De Vicente, G. (2009). On the tectonic origin of Iberian topography; *Tectonophysics*; 474: 214-235.
- Cauffman A., Lew, H. S. (2002). Standards of Seismic Safety for Existing Federally Owned and Leased Buildings, NISTIR 6762, 20 pp., Gaithersburg, Maryland. www.nehrp.gov/pdf/nistir6762.pdf (Consultado el 14 de marzo de 2009).
- CCP (2009). Code of the City of Portland, Oregon, Chapter 24.85 Seismic Design Requirements for Existing Buildings, Gobierno de la Ciudad de Portland. <http://www.portlandonline.com/auditor/index.cfm?c=28673> (Consultado el 14 de octubre de 2009).
- Chopra, A. K. (1995). Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey, Prentice Hall, 794 pp.
- Cid, J., Figueras, S., Fleta, J., Goula, X., Susagna, T., Amieiro, C. (1999). Zonación Sísmica de la Ciudad de Barcelona. Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Murcia, España, pp. 263-271.
- Cid, J., Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S. (2001). Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects; *Pure and Applied Geophysics*; 158: 2559-2577.
- City of Berkeley (2005). Chapter 19.39 (Soft Story Ordinance), Berkeley Municipal Code, Berkeley, California. [http://www.ci.berkeley.ca.us/uploadedFiles/Planning_\(new_site_map_walk-through\)/Level_3_-_General/SS%20ordinance%20%20NandO.pdf](http://www.ci.berkeley.ca.us/uploadedFiles/Planning_(new_site_map_walk-through)/Level_3_-_General/SS%20ordinance%20%20NandO.pdf) (Consultado el 23 de junio de 2009).
- Coburn, A., Spence, R. (2002). Earthquake protection. John Wiley. http://books.google.es/books?id=MjUdkHJ_wHcC&printsec=frontcover&hl=en&source=gbs_navlinks_s#v=onepage&q=&f=false (Consultado el 20 de enero de 2008).
- Cornell, A (1968). Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (5): 1583-1606.
- Crowley, H., Bommer, J., Pinho, R., Bird, J. (2005). The impact of epistemic uncertainty on an earthquake loss model. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 34(14):1653-1685. <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.498>
- CTE (2006). Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. BOE 74 del 28 de marzo de 2006, Madrid.

- De Smith, M. J., Goodchild, M. F., Longley, P. A. (2007). *Geospatial Analysis. A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*. 516 páginas.
http://books.google.es/books?id=SULMdT8qPwEC&printsec=frontcover&hl=en&source=gbs_book_other_versions_r&cad=2#v=onepage&q=&f=false (Consultado el 8 de febrero de 2009).
- Dogangün, A. (2004). Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey. *Engineering Structures*. 26: 841-856.
- Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G., Vona, M. (2006). Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies, *Engineering Structures*, 28: 357-371.
- EBC-NY (2007). Existing Building Code of New York State. International Code Council, Inc. y New York State, USA. <http://publiccodes.citation.com/st/ny/st/b600v07/index.htm> (Consultado el 21 de noviembre de 2009).
- EERI (1996). *Post-Earthquake Investigation Field Guide. Learning from earthquakes*, Oakland, California, 196 pp. <http://www.eeri.org/site/lfe-field-guide> (Consultado el 12 de marzo de 2009).
- EERI (2003). *Collection and Management of Earthquake Data: Defining issues for an action plan*, Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute, 125 pp.
- EERI (2004). *Learning from earthquakes. The EERI Learning from Earthquakes Program: A Brief Synopsis of Major Contributions*, Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute, 29 pp.
- Eguchi, R. T., Goltz, J. D., Taylor, C. E., Chang, S. E., Flores, P. J., Johnson, L. A., y otros. (1998). *Direct economic Losses in the Northridge Earthquake: A Three-Year Post-Event Perspective. Earthquake Spectra*. Volume 14, No.2. Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
- Ellingwood, B. R. (2007). *Quantifying and communicating uncertainty in seismic risk assessment. Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication*, March 26-27, Stanford University, 10 páginas. http://www.ripid.ethz.ch/Paper/Ellingwood_paper.pdf . (Consultado el 2 de febrero de 2009).
- Erdey, C. K. (2007). *Earthquake Engineering: application to design*, John Wiley & Sons; Hoboken, New Jersey, 428 pp.
- ERN (2009). *Metodología de análisis probabilista del riesgo. Informe técnico ERN-CAPRA-T1-6*, 11 pp. http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/images/2/2a/Análisis_de_Riesgos2.pdf (Consultado el 15 de octubre de 2010).
- Espinosa-Aranda, J. M., Cuéllar, A., Rodríguez, F. H., Frontana, B., Ibarrola, G., Islas, R., García, A. (2011). The seismic alert system of Mexico (SASMEX): Progress and its current applications, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31: 154-162.
- Esteva, L. (1970). *Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería*. Institute of Engineering Series-246, UNAM, Mexico.
- Faccioli, E., Pessina, V., Pitilakis, K., Ordaz, M. (2003). WP2: Basis of a handbook of earthquake ground motions scenarios. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, 93 pp.

- Faccioli, E., Frassine, L., Finazzi, D., Pessina, V., Cauzzi, C., Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Resemini, S., Curti, E., Podestà, S., Scuderi, S. (2004). Synthesis of the application to Catania city. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014.
- Faccioli, E. (2006). Seismic hazard assessment for derivation of earthquake scenarios in Risk-UE. *Bulletin of Earthquake Engineering*; 4:341-364. <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-006-9021-2>
- FEMA (1999). HAZUS-99: Earthquake Loss Estimation Methodology, Technical Manual, Vol.1, Washington, D.C.
- FEMA (2009a). HAZUS® MH MR4. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model. Technical Manual. Washington, D.C., 712 pp.
- FEMA (2009b). HAZUS® MH MR4. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Hurricane Model. Technical Manual. Washington, D.C., 600 pp.
- FEMA (2009c). HAZUS® MH MR4. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Flood Model. Technical Manual. Washington, D.C., 500 pp.
- FEMA 74 (1994). Reducing the risks of nonstructural earthquake damage. A practical guide. Washington, D.C., 139 pp.
- FEMA 154 (2002). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, FEMA, Washington, 155 pp.
- FEMA 273 (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA 356 (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA, Washington, 518 pp. <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1427> (Consultado el 27 de enero de 2009).
- FEMA 366 (2000). Hazus® 99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. 40 pp.
- FEMA 366 (2008). Hazus® MH Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. 66 pp.
- FEMA 389 (2004). Primer for design professionals. Communicating with Owners and managers of New Buildings on Earthquake Risk, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. 190 pp.
- FEMA 427 (2003). Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks. Federal Emergency Management Agency, Washington, 108 pp.
- FEMA 433 (2004). Using HAZUS-MH for Risk Assessment. How-To Guide. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 226 pp.
- FEMA 547 (2006). Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, FEMA, Washington, 571 pp. <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=2393> (Consultado el 18 de julio de 2009).

- FEMA P-420 (2009). Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation, Risk Management Series, FEMA, Washington, 94 pp. <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3792> (Consultado el 23 de enero de 2010).
- Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combes, Ph., Grellet, B., Granier, Th. (1996). Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la península Ibérica (Catalunya), *Geogaceta*, 20(4): 853-856.
- Fleta, J., Estruch, I., Goula, X. (1998). Geotechnical characterization for the regional assessment of seismic risk in Catalonia. *Proceedings 4th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society*, Barcelona, pp. 699-702.
- García, R. M. (2009). Caracterización del potencial sísmico y su influencia en la determinación de la peligrosidad sísmica probabilista. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid; 215 pp.
- Giovinazzi, S. (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Doctoral thesis, Technical University of Braunschweig, and University of Florence, 222 pp.
- Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., Pampanin, S. (2006). Vulnerability Methods and Damage Scenario for Seismic Risk Analysis as Support to Retrofit Strategies: an European Perspective. 2006 NZSEE Conference, Napier, New Zeland. 10 pp.
- González, M. (2000). Simulación post evento de los efectos de un terremoto. Institut Cartogràfic de Catalunya, Informe No. GS-128/00, 241 pp.
- Goula, X., Susagna, T., Secanell, R., Fleta, J., Roca, A. (1997). Seismic Hazard Assessment for Catalonia (Spain). *Proceedings Second Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems*, Barcelona, pp.173-177.
- Grossi, P., Kleindorfer, P., Kunreuther, H. (1998). The impact of uncertainty in managing seismic risk: the case of earthquake frequency and structural vulnerability, Wharton Financial Institutions Center and the Wharton Risk Management and Decision Processes Center Project on "Managing Catastrophic Risks". 25 pp. <http://fic.wharton.upenn.edu/fic/papers/99/pcat05.html>. (Consultado el 9 de julio de 2009).
- Grossi, P., Kunreuther, H. (2005). Catastrophe modeling: a new approach to managing risk. *Huebner International Series on Risk, Insurance, and Economic Security*. New York, Springer, 245 pp.
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie*. Luxemburg; 15: 1-99.
- Grünthal, G., Thieken, A.H., Schwarz, J., Radtke, K.S., Smolka, A., Merz, B. (2006). Comparative Risk Assessment for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes. *Natural Hazards*, 38: 21-44.
- Guimet, J. (2002). Valoración catastral de inmuebles urbanos. Descripción práctica. Barcelona. Ediciones UPC. 232 pp.
- Gutdeutsch, R., Kaiser, D., Jentzsch, G. (2002). Estimation of earthquakes magnitudes from epicentral intensities and other focal parameters in Central and Southern Europe, *Geophysical Journal International*, 151(3): 824-834.
- IBC (2009). International Building Code 2009, USA, International Code Council, 676 pp.

- ICB (1986). Recull de gràfiques, instruccions i suports de recollida d'informació impresos i altres documents. Documento de uso interno de los evaluadores. 58 pp. Documento cedido por Joan Vall i Pla. Departament d'estudis Fiscals Institut Municipal d'Hisenda de Barcelona.
- ICC (2010). Institut Cartogràfic de Catalunya. http://www.icc.es/vissir2/?lang=ca_ES (Consultado el 18 de diciembre de 2010).
- ICC/CIMNE (2004). WP08 Application to Barcelona. Synthesis. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 50 pp.
- Idescat (2005). Anuario estadístico de la ciudad de Barcelona 2005.
http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/index_pdf.htm (Consultado el 5 de enero de 2010).
- Idescat (2007). Anuario estadístico de la ciudad de Barcelona 2007.
http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/index_pdf.htm (Consultado el 5 de enero de 2010).
- Idescat (2009). Anuario estadístico de la ciudad de Barcelona 2009.
http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/index_pdf.htm (Consultado el 12 de septiembre de 2010).
- Idescat (2010). Anuario estadístico de la ciudad de Barcelona 2010.
http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/index_pdf.htm (Consultado el 12 de diciembre de 2010).
- IEBC (2009). International Existing Building Code 2009, International Code Council, 282 pp.
- IMI: Institut Municipal d'Informàtica (2009). Informació del Centre de Cartografia Automàtica. Ayuntamiento de Barcelona, Barcelona.
- Irizarry, J., Goula, X., Susagna, T. (2003a). Analytical formulation for the elastic acceleration-displacement response spectra adapted to Barcelona soil conditions. Technical report. Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Irizarry, J., Goula, X., Susagna, T. (2003b). Evaluación de la peligrosidad sísmica de la ciudad de Barcelona en términos de aceleración espectral, 2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Málaga, España, pp. 389-399.
- Irizarry, J. (2004). An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban system of Barcelona. Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 406 pp.
- Irizarry, J., Lantada, N., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Goula, X., Susagna, T., Roca, A. (2010). Ground-shaking scenarios and urban risk evaluation of Barcelona using the Risk-UE capacity spectrum based method; Bulletin of Earthquake Engineering (9)2: 441-466.
- Ishii, T., Takata, K., Nakajima, H. (2007). OSRE3: Multi-hazard Open Source Risk Engine.
- Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F. (2002). Palaeostress evolution of the Iberian Peninsula (Late Carboniferous to present-day); Tectonophysics 357: 159-186.

- Jang, J.-J., Lee, C.-S., Chen, Y.-H. (2002). A preliminary study of earthquake building damage and life loss due to the Chi-Chi earthquake, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 25(5): 567-576
- Jennings, P.C. (2003). In W. HK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger (Eds). *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, Volume 81B, pp. 1097-1125.
- Jiménez, M.-J., García-Fernández, M., GSHAP Ibero-Maghreb Working Group (1999). Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region; *Annali di Geofisica*, 42(6): 1057-1065.
- Jiménez, M.J., Giardini, D., Grünthal, G., SESAME Working Group (2001). Unified seismic hazard modeling throughout the Mediterranean region, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42 (1-2): 3-18.
- Joyner, W. B., Boore, D. M. (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake; *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6): 2011-2038.
- Kaltakci, M. Y., Arslan, M. H., Ozturk, M. (2007). Results and Lessons Learned from the Buildings which Failed under their own Weight in Turkey. *Structural Engineering International*; 17(2): 159-165.
- Kamigaichi, O., Saito, M., Doi, K., Matsumori, T., Tsukada, S., Takeda, K., Shimoyama, T., Nakamura, K., Kiyomoto, M., Watanabe, Y. (2009). Earthquake Early Warning in Japan: Warning the General Public and Future Prospects, *Seismological Research Letters*, 80(5): 717-726.
- Kanamori, H. (2007). Real-time Earthquake Damage Mitigation Measures. En Gasparini, P., Manfredi, G., Zschau, J. (Eds.), *Earthquake Early Warning Systems*, (pp. 1-8), Alemania: Springer
- Khater, M., Scawthorn, C., Johnson, J.J. (2003). Loss estimation. En Chen W. y Scawthorn, Ch. (Eds.), *Earthquake Engineering Handbook*, (pp. 31-1,31-23) USA: CRC Press.
- Kircher, C. A., Seligson H. A., Bouabid, J., Morrow, G., C. (2006). When the Big One Strikes Again – Estimated Losses due to a Repeat of the 1906 San Francisco Earthquake. The 100th Anniversary Earthquake Conference Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake. April 18-22; 34 páginas. <http://www.1906eqconf.org/mediadocs/BigonestrikesReport.pdf> (Consultado el 15 de septiembre de 2009).
- Kleindorfer, P., Grossi, P., Kunreuther, H. (2005) The impact of mitigation on homeowners and insurers: an analysis of model cities. En Grossi, P y Kunreuther, H. (Eds.), *Catastrophe modeling: a new approach to managing risk*, (pp. 167-188), USA: Springer.
- Kostov, M., Vaseva, E., Kaneva, A., Koleva, N., Varbanov, G., Stefanov, D., Darvarova, E., Solakov, D., Simeonova, S., Christoskov, L. (2004). WP13: Application to Sofia. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 64 pp.
- Krawinkler, H., Miranda, E. (2004). Performance-based Earthquake Engineering. En Bertero, V. V. y Bozorgnia, Y. (Eds.), *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering* (pp- 560-635). USA: CRC Press.
- Kunreuther, H., Pauly, M. (2006). Rules rather than discretion: Lessons from Hurricane Katrina. *Journal of Risk and Uncertainty*; 33:101-116.

- Lacave-Lachet, C., Bard, P.Y., Gariel, J.C., Irikura, K. (2000). Straightforward methods to detect non-linear response of the soil. Application to the recordings of the Kobe earthquake (Japan, 1995); *Journal of Seismology* 4: 161-173.
- Lagomarsino S., Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*; 4(4): 415-443. <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>
- Lantada N. (2007). Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral, Vol. 1., Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 338 pp.
- Lantada, N., Pujades, L. G., Barbat, A. H. (2009a). "Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison", *Natural Hazards*, 51:501-524.
- Lantada N., Pujades L.G., A. H. Barbat (2009b). Escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Barcelona. Informe técnico para el Servicio de Protección Civil. Ayuntamiento de Barcelona. Volumen II. 76 pp.
- Lantada, N., Irizarry, J., Barbat, A. H., Goula, X., Roca, A., Susagna, T., Pujades, L. G. (2010) Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method; *Bulletin of Earthquake Engineering*; 8:201-229.
- Lee, W. H. K., Espinosa-Aranda, J. M. (2003). Earthquake Early Warning Systems: Current Status and Perspectives. En Zschau, J. y Küppers, A. N. (Eds.), *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*, (pp. 409-423), Italy: Springer.
- Liel, A. B. (2008). Assessing the collapse risk of California's existing reinforced concrete frame structures: metrics for seismic safety decisions. Tesis doctoral, Stanford University, California, 314 pp.
- López Casado, C., Molina, S., Delgado, J., Peláez, J. A. (2000a). Attenuation of Intensity with Epicentral Distance in the Iberian Peninsula; *Bulletin of the Seismological Society of America*; 90:34-47.
- López Casado, C., Molina, S., Giner, J.J., Delgado, J. (2000b). Magnitude-Intensity Relationships in the Ibero-Magrebhian Region, *Natural Hazards*, 22: 271-297.
- Lungu, D., Aldea, A., Arion, A., Vacareanu, R., Petrescu, F., Cornea, T. (2001). WP01: European distinctive features, inventory database and typology. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 60 páginas.
- Lungu, D., Aldea, A., Arion, A., Cornea, T., Petrescu, F., Vacareanu, R. (2004). WP10: Synthesis Report for the City of Bucharest. Synthesis. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 38 páginas.
- Mahdyiar, M., Porter, B. (2005). The risk assessment process: the role of catastrophe modeling in dealing with natural hazards. En Grossi, P y Kunreuther, H. (Eds.), *Catastrophe modeling: a new approach to managing risk*, (pp. 45-68), USA: Springer.

- Mañà, F. (1997). "Vulnerabilitat sísmica dels edificis de la ciutat de Barcelona", Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona.
- Marin, S., Avouac, J-P., Nicolas, M., Schlupp, A. (2004). A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France; Bulletin of the Seismological Society of America, 94(6):2137-2163.
- McGuire, R. K., (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- McGuire, R. K. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history; Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 37: 329-338
- Mena, U. (2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 234 pp.
- Milutinovic, Z. V., Trendafiloski, G. S. (2003). WP4: Vulnerability of current buildings. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, 109 pp.
- Milutinovic, Z.V., Trendafiloski, G.S., Olumceva, T.R., Anastasov, K., Vrskovski, Z. (2004). WP9: Application to Bitola. Synthesis. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 34 pp.
- Moreno, R. (2006). Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 332, pp.
- Mouroux, P., Le Brun, B. (2006). Presentation of RISK-UE Project. Bulletin of Earthquake Engineering, 4: 323-339. <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3>
- Musson, R.M.W., Cecic, I. (2002). Macroseismology. In W. HK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger (Eds). International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Volume 81A, pp. 807-822.
- National Research Council (1989). Estimating Losses from Future Earthquakes: Panel Report, Washington, D.C., The National Academies Press, 82 pp.
http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=1734&page=R1 (Consultado el 26 de marzo de 2009).
- National Research Council (1994). Facing the Challenge. The U.S. National Report to the IDNDR World Conference on Natural Disaster Reduction, Yokohama, Japan, May 23-27, 1994, Wahington, D.C., National Academy Press, 101 pp.
http://books.google.com/books/download/Facing_the_challenge.pdf?id=GygrAAAAYAAJ&output=pdf&sig=ACfU3U089kGRXhFrXMsdM_RRb23HOuEhRA (Consultado el 12 de marzo de 2008).
- NCSE-02 (2002). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, Real Decreto 997/2002, Boletín Oficial del Estado No. 244, Madrid.
- NCSE-94 (1994). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, Real Decreto 2543/1994, Boletín Oficial del Estado No. 33, Madrid.

- NTC-08 (2008). Norma Técnica de Construcción, Decreto Ministerial, 14/01/2008, Gaceta Oficial de la República Italiana.
- NZSEE (2006). Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes. New Zealand Society for Earthquake Engineering, 343 pp.
- Ojeda, A., Atakan, K., Masana, E., Santanach, P., Jiménez, M-J., García Fernández, M. (2002). Integration and influence of paleoseismic and geologic data for the seismic hazard evaluation in the Catalan coastal ranges, Spain; *Soil Dynamics and Earthquake engineering* 22: 911-916.
- Olivera, C., Redondo, E., Lambert, J., Riera, A., Roca, A. (2006). The earthquakes of the XIV and XV centuries in Catalonia (NE Spain). First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Ginebra, Suiza, 10 pp.
- Onur, T., Ventura, C.E., Finn, W. D. L. (2005). Regional seismic risk in British Columbia – damage and loss distribution in Victoria and Vancouver; *Canadian Journal of Civil Engineering*; 32: 361-371
- Ordaz, M., Zúñiga, F., Singh, S.K., Montoya, C., Avilés, J., Guerrero, V., Reinoso, E. (1996). Peligro Sísmico en México [PSM]. Sistema de Información Cuantitativa. Instituto de Ingeniería de la UNAM, CENAPRED, CFE, Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (1999). CRISIS99, Program for computing seismic hazard, UNAM, Mexico.
- Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E., Perez-Rocha, L. E. (2000). Seismic loss estimation model for Mexico City; *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, January, 8 pp.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (2003). CRISIS2003, Ver. 3.0 Program for computing seismic hazard, UNAM, México.
- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (2007). CRISIS2007, Ver.1.1. Program for computing seismic hazard, UNAM, México.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., D'Amico, V. (2008). CRISIS2008, Ver 3.8. Program for computing seismic hazard, UNAM, México.
- Palmisiano, F., Vitone, A., Vitone, C., Vitone, V. (2007). Collapse of the Giotto Avenue Building in Foggia. *Structural Engineering International*; 17(2): 166-171.
- Paricio, A. (2001). *Secrets d' un sistema constructiu: l'Eixample*. Edicions UPC, Barcelona. 100 pp.
- Peláez, J. A., López, C. (2002). Seismic Hazard Estimate at the Iberian Peninsula; *Pure and Applied Geophysics*; 159:2699-2713.
- Perea, H., Atakan, K. (2007). Influence of slow active faults in probabilistic seismic hazard assessment: the northwestern margin of the València trough; *Natural Hazards*, 43: 379-396.

- Pitilakis, K., Kappos, A., Hatzigogos, Th., Anastasiadis, A., Anastasiadis, A., Alexoudi, M., Argyroudis, S., Penelis, G., Panagiotopoulos, Ch., Panagopoulos, G., Kakderi, K., Papadopoulos, I., Dikas, N. (2004). Synthesis of the application to Thessaloniki city. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, 72 pp.
- Porter, K. A. (2003). Seismic Vulnerability. En Chen W. y Scawthorn, Ch. (Eds.), *Earthquake Engineering Handbook*, (pp. 21-1,21-46) USA: CRC Press.
- Pujades, L.G., Canas, J.A., Mena, U., Espinoza, F., Alfaro, A., Caselles, J. (2000). Seismic Risk Evaluation in Barcelona, Spain. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auklan, New Zeland, pp.8.
- Pujades, L. G., Barbat, A.H., Lantada, N. (2007). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas: desarrollo de escenarios. *Revista internacional de ingeniería de estructuras*; 12(1): 1-28.
- Pujades, L. G., Barbat, A.H., González-Drigo, R., Avila, J., Lagomarsino, S. (2010). Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain); *Bulletin of Earthquake Engineering*; publicado en línea el 17 de septiembre, 19 páginas. DOI 10.1007/s10518-010-9207-5 (En prensa).
- RCDF (2004). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Rosenbaum, G., Lister, G. S., Duboz, C. (2002). Relative motions of Africa, Iberia and Europe during Alpine orogeny; *Tectonophysics*; 359: 117-129.
- Rossetto, T., Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data, *Engineering Structures* 25: 1241-1263.
- Rowshandel, B., Reichle, M., Wills, C., Cao, T., Petersen, M., Branum, D., y otros. (2007). Estimation of Future Earthquake Losses in California. California Geological Survey. 52 pp. Department of Conservation. State of California.
<http://www.conservation.ca.gov/CGS/rghm/loss/Pages/Index.aspx> (Consultado el 6 de marzo de 2008).
- Sandi H., Floricel I. (1995). Analysis of seismic risk affecting the existing building stock. *Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol.3, pp. 1105-1110.
- Scawthorn, Ch. (2003). Emergency Planning. En Chen W. y Scawthorn, Ch. (Eds.), *Earthquake Engineering Handbook*, (pp. 33-1, 33-36), USA: CRC Press.
- Secanell, R. (1999). Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics, PhD thesis, Universidad de Barcelona, Barcelona, 335 pp.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Roca, A. (1999). Mapa de zonas sísmicas de Cataluña. 1er Congreso nacional de Ingeniería Sísmica, Murcia, España, 251-259.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Roca, A. (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties, *Journal of Seismology*, 8:25-40.

- Secanell, R., Bertil, D., Martin, C., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Dominique, P., Carbon, D., Fleta, J. (2008). Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. *Journal of seismology*, 12: 323-341.
- Sorensen, M. B., Stromeyer, D., Grünthal (2008). Estimation of macroseismic intensity-New attenuation and intensity vs. ground motion relations for different parts of Europe. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 8 pp.
- Suárez, G., Novelo, D., Mansilla, E. (2009). Performance Evaluation of the Seismic Alert System (SAS) in Mexico City: A Seismological and a Social Perspective, *Seismological Research Letters*, 80(5): 707-716.
- Sugito, M., Oka, F., Yashima, A., Furumoto, Y., Yamada, K. (2000). Time-dependent ground motion amplification characteristics at reclaimed land after the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake; *Engineering Geology*, 56: 137-150.
- Susagna, M. T., Goula, X. (1999). *Atles Sísmic de Catalunya. Volum 1: Catàleg de sismicitat*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 413 pp.
- Tertulliani, A., Arcoraci, L., Berardi, M., Bernardini, F., Camassi, R., Castellano, C., Del Mese, S., Ercolani, E., Graziani, L., Leschiutta, I., Rossi, A., Vechhi, M. (2010). An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L'Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake; *Bulletin of Earthquake Engineering*; publicado en línea: 21 de mayo de 2010 <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-010-9188-4>
- The MathWorks (2006). Matlab R2006b software. The Mathworks. www.mathworks.com
- Thenhaus, P.C., Campbell, K. W. (2003). *Seismic Hazard Analysis*. En Chen W. y Scawthorn, Ch. (Eds.), *Earthquake Engineering Handbook*, (pp. 8-1,8-50), USA: CRC Press
- Todd, D., Carino, N., Chung, R. M., Lew., H. S., Taylor, A. W., Walton, W. D., Cooper, J.D., Nimis, R. (1994). 1994 Northridge Earthquake. Performance of Structures, Lifelines, and Fire Protection Systems. NIST (National Institute of Standards and Technology) Special Publication 862. Gaithersburg, MD, 180 pp.
- UN-DESA (2006). *World Urbanization Prospects. The 2005 Revision. Executive Summary*. Pages: 196. New York. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005WUPHighlights_Final_Report.pdf (Consultado el 4 de marzo de 2008).
- UN-DESA (2007). *World Urbanization Prospects. The 2007 Revision. Gráficos resumen*, 2 pp. New York. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007_urban_rural_chart.pdf (Consultado el 30 de diciembre de 2009).
- USGS (2002). Probabilistic Hazard Curves con datos de 2002, obtenidas del Software: Seismic Hazard Curves and Uniform Hazard Response Spectra, USGS, Earthquake Ground Motion Parameters. Version: 5.0.9a – 10/21/2009.

- USGS/EERI (2010). The Mw 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010: USGS/EERI Advance Reconnaissance Team. Team report V. 1.1., 64 pp. http://www.eqclearinghouse.org/20100112-haiti/wp-content/uploads/2010/02/USGS_EERI_HAITI_V1.1.pdf (Consultado el 25 de julio de 2010).
- USGS (2011). USGS Updates Magnitude of Japan's 2011 Tohoku Earthquake to 9.0. http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=2727&from=rss_home (Consultado el 16 de marzo de 2011).
- Utsu, T. (2002). A List of Deadly Earthquakes in the World: 1500-2000. In W. H. K Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger (Eds). International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Volume 81A, pp. 691-717.
- Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, A., Arion, C. (2004). WP7: Seismic Risk Scenarios Handbook. RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, 51 pp.
- Vickery, P. J., Skerlj, P. F., Lin, J., Twisdale, L. A., Young, M.A., Lavelle, F. M. (2006). HAZUS-MH Hurricane Model Methodology. II: Damage and Loss Estimation. Natural Hazards Review 7(2): 94-103. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7:2\(94\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(94))
- Villani, M., Demartinos, K., Vanini, M., Facciolo, E. (2010). Application of ground shaking scenarios to PSHA and risk Assessment in near field; Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering, August 30-September 03, Ohrid, Republic of Macedonia, 7 pp.
- Viscusi, W. K. (2006). Natural disaster risks: An introduction. Journal of Risk and Uncertainty; 33:5-11.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H. (1999). Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California; Earthquake Spectra, 15(3): 557-564.
- Weinstein, N. D., Marcus, S. E., Moser, R. P. (2005). Smokers's unrealistic optimism about their risk. Tobacco Control; 14: 55-59. <http://tobaccocontrol.bmj.com/cgi/reprint/14/1/55> (Consultado el 14 de julio de 2009).
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement; Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.
- Wynder E. L., Graham, E. A. (1950). Tobacco smoking as a possible etiologic factor in bronchiogenic carcinoma. Journal of the American Medical Association, 143 (4): 329-336.
- Yépez, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 393 pp.
- Yépez, F., Barbat, A. H., Canas, J. A. (1996). "Simulación de escenarios del daño sísmico en zonas urbanas", Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 12:3, 331-358.

Anexo A

Modificadores de la vulnerabilidad sísmica

En la Tabla A-1 y en la Tabla A-2 se incluyen ejemplos de los factores de la vulnerabilidad sísmica que fueron propuestos en la metodología LM1 de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tabla A-1. Ejemplos de factores que modifican la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Factores de comportamiento	Parámetros	Puntuaciones del modificador
Estado de conservación	Buen mantenimiento	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.02
	Medio (3,4 o 5)	+0.02
	Alto (6 o más)	+0.06
Piso blando (<i>Soft-story</i>)	Demolición/Transparencia, diáfana	+0.04
Irregularidad en planta	-	+0.04
Irregularidad vertical	-	0.02
Intervenciones de reparación	-	-0.08, +0.08

Tabla A-2. Ejemplos de factores que modifican la vulnerabilidad sísmica de los edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Factores de comportamiento		Puntuaciones según nivel de diseño sismorresistente		
		Código de nivel bajo	Código de nivel medio	Código de nivel alto
Nivel de código		+0.16	0	-0.16
Mantenimiento deficiente		+0.04	+0.02	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.04	-0.04	-0.04
	Medio (3,4 o 5)	0	0	0
	Alto (6 o más)	+0.08	+0.06	+0.04
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	+0.02	0
	Torsión	+0.02	+0.01	0
Irregularidad vertical		+0.04	+0.02	0
Columna corta		+0.02	+0.01	0
Ventanas en arco (<i>bow windows</i>)		+0.04	+0.02	0

Anexo B

Tabla B-1. Zonas ZRP de Barcelona por barrio.

<p>1.Barceloneta: 01 Sant Sebastià; 02 C/Cervera- Aixada; 03 c/Churruca; 04 BarcelonetaCentre; 05 Hospital del Mar.</p> <p>2.Parc: 06 Ciutadella-Born; 07 Llotja de Mar; 08 Santa Maria del Mar; 09 Museu Picasso; 10 Casc Antic-Jutjats; 11 Mercat Sta.Caterina; 12 Av. FrancescCambó; 13 Sant Pere; 14 Palau Música.</p> <p>3.Gòtic: 15 c/Condal; 16 Pl. Villa de Madrid; 17 c/Petritxol; 18 Catedral; 19 PalauGeneralitat; 20 c/Boqueria; 21 Pl. Reial – Ajuntament; 22 Correus; 23 Pl. La Mercè; 24 Pl. Medinaceli.</p> <p>4.Raval: 25 Drassanes; 26 Palau Güell; 27 Liceu; 28 Sant Pau delCamp; 29 Pl. Folch iTorres;30 Sant Agustí ; 31 MercatBoqueria; 32 c/Riera Baixa; 33 c/La Cera; 34 c/Riera Alta; 35 Casa Caritat; 36 AcadèmiaCiències; 37 c/Tallers-Pelai .</p> <p>5.Sant Antoni: 38 Mercat San Antoni; 39 Av. Mistral; 40 c/Sepúlveda-Viladomat; 41 c/Sepúlveda-Casanova.</p> <p>6.Esquerra Eixample: 42 Universitat; 43 c/Casanova-Diputació; 44 Casa Golferichs; 45 Parc Escorxador; 46 c/Llançà; 47 Av. Roma-Aragó; 48 Telefònica; 49 Mercat Ninot; 50 c/Aribau – Mallorca; 51 c/Aribau – Còrsega; 52 Hospital Clínic; 53 Escola Industrial; 54 Presó Model; 55 c/Londres-Borrell; 56 c/Londres-Casanova.</p> <p>7.Dreta Eixample: 57 La Pedrera; 58 Casa de les Punxes; 59 Mercat Concepció; 60 Pg. Gràcia Central; 61 Illa Discòrdia; 62 Torre de les Aigües; 63 Tetuan Nord; 64 Pl.Catalunya-Rondes.</p> <p>8.Estació Nord: 65 Estació del Nord; 66 Auditori;67 Plaça Monumental.</p> <p>9.Sagrada Família: 68 Pl. Hispanitat ; 69 Mercat Sgrda.Família; 70 Sagrada Família; 71 Jardins Industria; 72 Creu Roja</p> <p>10.Poble –sec: 73 Tres Xemeneies; 74 Poble Sec – Satalia ; 75 Mercat de les Flors.</p> <p>11.Montjuïc: 76 Montjuïc.</p> <p>12.Zona Franca-Port: 77 Polígon Zona Franca; 78 Pg. Zona Franca – Oest; 79 Pg. Zona Franca – Est</p> <p>13.Font de la Guatlla: 80 Font de la Guatlla.</p> <p>14.Bordeta-Hostafrancs: 81 Hostafrancs; 82 Magoria - Can Batlló.</p> <p>15.Sants: 83 Sants - Mercat Nou; 84 Cotxeres de Sants; 85 Espanya Industrial; 86 Pl. Centre Sud; 87 Can Mantega; 88 Mercat Sants ; 89 c/Sugranyes; 90 c/Roger.</p> <p>16.Les Corts: 91 Torre Melina – Collblanc; 92 FC Barcelona; 93 Jardins Bacardi; 94 Sol de Baix; 95 Pl. Centre Nord; 96 Les Infantes; 97 c/Loreto; 98 Les Corts – Centre.</p> <p>17.Pedralbes: 99 Santa Gemma; 100 Palau Reial; 101 Pedralbes.</p> <p>18.Sant Gervasi: 102 R.C.D. Espanyol; 103 c/Sagues; 104 c/Tuset;105 Jardins Moragues; 106 Turó Parc; 107 Pl. Adriano; 108 Parc de Monterols; 109 c/Saragossa; 110 Parc Turó Putxet; 111 CT Barcino; 112 Av. Tibidabo; 113 c/Sant Gervasi ; 114 c/Mandri.</p> <p>19.Sarrià: 115 Tres Torres; 116 Salesians; 117 Quinta Amèlia; 118 Sarrià Centre; 119 Can Caralleu; 120 Institut Químic.</p> <p>20.Vallvidrera-Les Planes: 121 Vallvidrera.</p> <p>21.Gràcia: 122 Riera Sant Miquel;123 Pl. Rius i Taulet;124 c/Llibertat;125 c/Quevedo;126 c/D'en Grassot; 127 La Sedeta; 128 c/Romana;129 c/Legalitat;130 Pl.Virreina-Travessera;131 Pl. Diamant;132 Pl. Sol;133 Rambla del Prat;134 Fontana; 135 Pl. Lesseps – Sud; 136 Torrent de l'Olla-Trav. Dalt;137 Pl. Nord - Pl. Rovira;138 C.F. Europa.</p> <p>22.Vallcarca: 139 Parc Güell; 140 Baixada de la Glòria; 141 c/Mora d'Ebre; 142 La Creueta del Coll; 143 Hospital Militar; 144 Penitents N.</p> <p>23.Guinardó: 145 Quarter Girona; 146 La Aliança; 147 Hospital Sant Pau; 148 Pl. Guinardó; 149 Mercat Guinardó; 150 c/Mascaró; 151 Parc del Guinardó;152 Parc de les Aigües;153 Can Baró.</p> <p>24.Horta: 154 c/Font d'en Fargues; 155 C/Alt Pedrell; 156 Can Pujolet;157 Mercat Carmel ; 158 c/Segimon;159 Muntanya del Carmel ; 160 Pl. Pastrana; 161 Mercat Horta; 162 Pl. Santes Creus;163 C. Esportiu Horta;164 Horta Centre-Pl.Eivissa;165 Horta – Valldaura; 166 Cementeri Horta.</p> <p>25.Vall d'Hebron: 167 Sant Genis; 168 C. Sanitària Vall Hebron; 169 Montbau; 170 A. Olímpica Vall Hebron;171 Teixonera</p> <p>26.Viliapicina-Turó de la Peira: 172 Torre Llobeta; 173 Vilapiscina; 174 C/Escòcia; 175 Pl.Sòller; 176 Can Dragó;177 c/Alcudia; 178 Calderón de la Barca; 179 Turó de la Peira; 180 Ramon Albó.</p> <p>27.Roquetes-Verdum: 181 Can Ensenya; 182 Guineueta; 183 Parc Guineueta; 184 Prosperitat-Llucmajor; 185 Verdum ; 186 Prosperitat-Via Júlia; 187 Prosperitat-Rio Janeiro; 188 Prosperitat-Via Favencia;189 Trinitat Nova; 190 Dipòsits Aigua; 191 Roquetes; 192 c/Mina de la Ciutat; 193 Canyelles.</p> <p>28.Ciutat Meridiana-Vallbona:194 Turó de Roquetes; 195 Torre Baró; 196 Ciutat Meridiana; 197 Vallbona.</p> <p>29.Sagrera: 198 c/Bofarull;199 Navas;200 La Sagrera-Estació;201 c/Berenguer de Palou; 202 La Sagrera; 203 Mercat Felip II</p> <p>30.Congrés: 204 I.B. Alzina; 205 Congrés.</p> <p>31.Sant Andreu: 206 Fabra i Coats; 207 Sant Andreu; 208 Mercat Sant Andreu;209 c/Servet; 210 Pl.Mossen Clapes; 211 Casa Bloc ;212 Colorantes; 213 Sant Andreu-c/Segre;214 C.F. Sant Andreu.</p> <p>32.Bon Pastor: 215 Bon Pastor-Santander; 216 Bon Pastor-Maquinista; 217 Baró de Viver.</p> <p>33.Trinitat Vella: 218 Trinitat Vella.</p> <p>34.Fort Pius: 219 Fort Pius.</p> <p>35.Poblenou: 220 Vila Olímpica; 221 c/Sancho de Avila; 222 Olivetti; 223 Poblenou; 224 Catalana; 225 Can Felipa; 226 c/Gran Via-Bilbao; 227 Pl.Perú; 228 c/Venezuela; 229 Diagonal Mar.</p> <p>36.Barris Besòs: 230 Besòs-Diagonal; 231 Besòs-Mar; 232 Besòs; 233 Besòs-Paraguai.</p> <p>37.Clot: 234 Parc del Clot;235 c/Aragó-Independència; 236 Provença-Independència; 237 Sant Josep Calasanz;238 Camp de l'Arpa Nord;239 Can Robacols; 240 Clot-Meridiana.</p> <p>38.Verneda: 241 c/Provençals; 242 Centre Cívic Sant Martí; 243 C.E. Júpiter; 244 Parc Sant Martí; 245 Polígon Sant Martí; 246 Pl. La Palmera; 247 La Pau ;248 La Verneda-Santander</p>



Figura B-1. Localización de las zonas ZRP de Barcelona, cuyos nombres se indican en la Tabla B-1.

Anexo C

Uso de USERISK 2011

Introducción

En este anexo se incluye información sobre el uso del código USERISK. Dicha información es adicional a la indicada en diversos capítulos de la presente Tesis, y a la que contiene la ayuda del propio código USERISK. Por lo tanto, los usuarios e interesados en USERISK pueden consultar esas tres fuentes de información sobre el manejo de USERISK 2011.

Descripción general

USERISK 2011 es un código para ordenador que permite hacer estimaciones del riesgo sísmico de edificios mediante la metodología probabilista LM1_P y la metodología LM1 de Risk-UE.

Instalación

Para usar el código USERISK 2011 es necesario instalarlo en un ordenador que posea el sistema operativo Windows, particularmente el sistema Windows XP en adelante.

Ejecución

Al ejecutar USERISK 2011 se muestra la pantalla principal de la aplicación que funciona como interfaz con el usuario (Figura C-1). Desde esta pantalla se puede acceder a los módulos siguientes: 1) Archivo (File); 2) Datos (Data); 3) Ejecutar (Run); 4) Herramientas (Tools) y; 5) Ayuda (Help).



Figura C-1. Pantalla principal del código USERISK 2011.

Módulo Archivo (File)

Las principales opciones de este módulo son las siguientes:

- **Nuevo (New).** Opción para iniciar un nuevo proyecto para calcular la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios. Al ejecutar esta opción se muestra una ventana en la que se ofrece la posibilidad de guardar en un archivo con extensión “.data” la información del proyecto existente en USERISK. Posteriormente, se muestra la pantalla en la que se deben asignar los primeros datos del nuevo proyecto (Figura C-2). En esta pantalla se requiere proporcionar el nombre de la zona urbana que se estudiará. Este dato es muy importante porque en función del nombre que se proporcione USERISK realizará determinadas consideraciones. Por ejemplo, si se asigna el nombre de Barcelona (se debe respetar el uso de minúsculas y mayúsculas), entonces, USERISK considerará los modificadores regionales de dicha ciudad que por defecto se han incluido en el código. Por otra parte, en esta pantalla (Figura C-2) el usuario puede confirmar o proponer los números que definen al intervalo de valores posibles del índice de vulnerabilidad. Los valores propuestos por defecto por USERISK son -1 y 2.
- **Abrir (Open).** Opción para abrir un archivo correspondiente a un proyecto ya existente. El archivo del proyecto tiene extensión “.data” y contiene información general sobre el proyecto. En la Tabla C-1 se describen los datos que debe contener el archivo con extensión “.data”. Adicionalmente, en la Tabla C-2 se muestra un ejemplo de los datos y el formato de un archivo con extensión “.data”.
- **Guardar como (Save as).** Opción para guardar en un archivo con extensión “.data” los datos generales del proyecto.
- **Salir (Exit).** Opción para finalizar la ejecución del código USERISK.

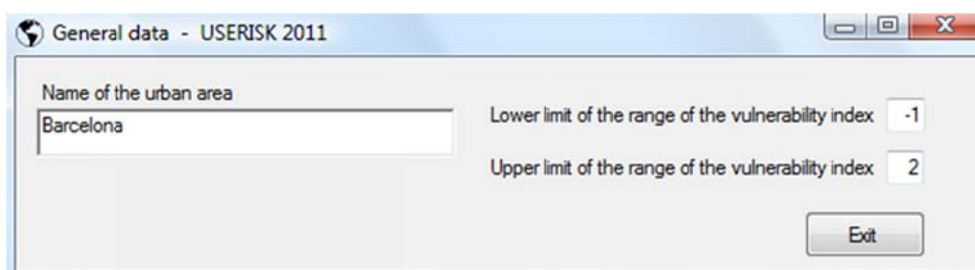


Figura C-2. Pantalla de USERISK en la que se asignan o muestran el nombre de la ciudad o zona de estudio, y los límites del índice de vulnerabilidad sísmica.

Tabla C-1. Descripción de los datos de un archivo de texto con extensión “.data”.

Nombre de la ciudad o zona de estudio
Número de edificios por estudiar
Límite inferior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V , Límite superior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .
Nombre y ubicación del archivo de texto con extensión .csv que contiene los datos de los edificios.
Nombre y ubicación del archivo de texto con extensión .hz que contiene los datos de la peligrosidad sísmica.

Tabla C-2. Ejemplo de los datos y el formato de un archivo de texto con extensión “.data”. Nombre del archivo: “Ejemplo.data”.

Barcelona
2
-1,2
E:\Ejemplo\Edificios_ejemplo.csv
E:\Ejemplo\Peligro_sismico_ejemplo.hz

Módulo Datos (Data)

Las opciones de este módulo son las siguientes:

- **Generales (General).** Muestra la pantalla (Figura C-2) donde se debe indicar el nombre de la ciudad o zona urbana que se estudiará, y los valores que delimitan el intervalo de valores válido para el índice de vulnerabilidad.
- **Edificios (Buildings).** Muestra la pantalla (Figura C-3) donde se debe indicar el número de edificios que se estudiarán y la ubicación del archivo de texto con extensión “.csv” (Tabla C-3, Tabla C-4), que contiene los datos de cada uno de los edificios de los que se quiere estimar su vulnerabilidad y riesgo sísmico. En dicho archivo se emplea un renglón para asignar los datos de cada edificio.
- **Peligrosidad Sísmica (Seismic hazard).** Muestra la pantalla (Figura C-4) donde se debe indicar la ubicación del archivo de texto con extensión “.hz” (Tabla C-5, Tabla C-6), que contiene los datos de las curvas de peligrosidad sísmica que se usarán para estimar el riesgo sísmico de los edificios.
- **Establecer archivos de resultados (Set output files).** Muestra la pantalla donde es posible indicar los archivos de resultados opcionales que se requiere genere USERISK.

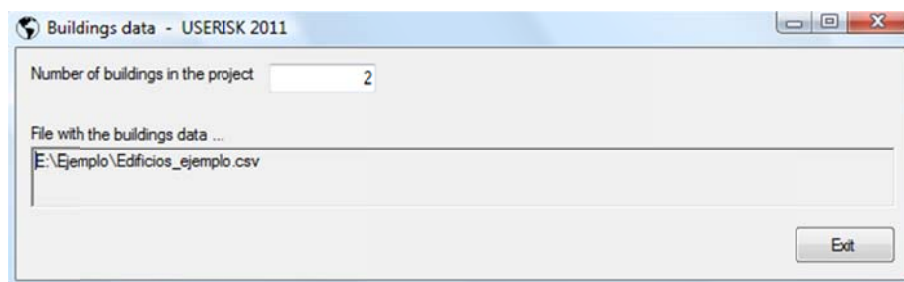


Figura C-3. Pantalla de USERISK 2011 en la que es posible proporcionar información sobre los edificios por estudiar.

Tabla C-3. Ejemplo de los datos y el formato de un archivo de texto con extensión “.csv”, mediante el cual se le proporcionan a USERISK los datos de dos edificios de Barcelona de los cuales se requiere estimar su vulnerabilidad y riesgo sísmico. Nombre del archivo: “Edificios_ejemplo.csv”.

1,111,11,1,1,1,1,228.44,88.46,9,M33,7,1931,R,R,1,0
2,211,21,2,2,2,2,194.01,83.83,10,RC32,9,1975,II,N,0,1

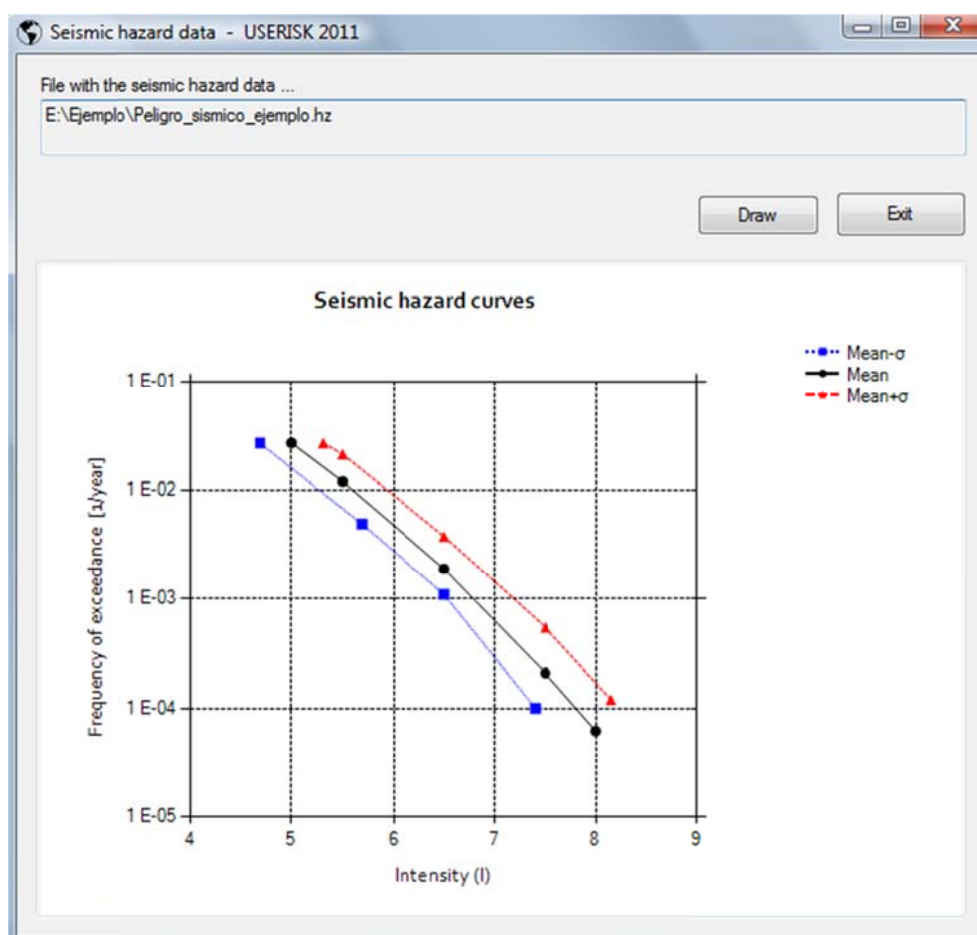


Figura C-4. Pantalla de USERISK 2011 en la que se asigna el archivo con extensión “.hz”, que contiene la información que define a las curvas de peligrosidad sísmica. En esta misma pantalla se pueden mostrar las curvas de peligrosidad, que se generan a partir de los datos contenidos en el archivo con extensión “.hz”.

Tabla C-4. Descripción de los datos de un archivo de texto con extensión “.csv”, mediante el cual se le proporcionan a USERISK los datos de dos edificios de Barcelona de los cuales se requiere estimar su vulnerabilidad y riesgo sísmico.

No.	Descripción	Ejemplo	
		Edificio 1	Edificio 2
1	Número de orden del edificio dentro de la base de datos.	1	2
2	Código de identificación del edificio.	111	211
3	Código de la parcela.	11	21
4	Código de la manzana.	1	2
5	Código de la zona ZRP.	1	2
6	Código del barrio.	1	2
7	Código del distrito.	1	2
8	Área del edificio (m ²).	228.44	194.01
9	Perímetro del edificio (m).	88.46	83.83
10	Número de niveles.	9	10
11	Código de la tipología estructural.	M33	RC32
12	Factor de fiabilidad de la tipología estructural.	7	9
13	Año de construcción.	1931	1975
14	Zona sísmica.	R	II
15	Código del estado de conservación.	R	N
16	Código de la posición del edificio en la manzana.	1	0
17	Código de la diferencia de la altura del edificio con respecto a la de los edificios adyacentes.	0	1

Tabla C-5. Ejemplo de los datos y el formato de un archivo de texto con extensión “.hz”, mediante el cual se le proporcionan a USERISK los datos de la peligrosidad sísmica. Nombre del archivo: “Peligro_sismico_ejemplo.hz”.

4
4.69,5.69,6.5,7.4
0.027,0.0049,0.0011,0.0001
5
5.5,5.6,5.7,5.8
0.027,0.012,0.0019,0.00021,0.000062
5
5.31,5.5,6.5,7.5,8.15
0.027,0.0213,0.00378,0.00055,0.00012

Tabla C-6. Descripción de los datos que debe contener el archivo de peligrosidad sísmica con extensión “.hz”, mediante el cual se define la peligrosidad sísmica que se usará para estimar el riesgo sísmico de edificios.

No.	Descripción	Ejemplo				
1	Número de puntos que definen a la curva 1 de peligrosidad sísmica (Curva media - σ).	4				
2	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva 1 de peligrosidad sísmica (Curva media - σ).	4.69	5.69	6.5	7.4	
3	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva 1 de peligrosidad sísmica (Curva media - σ).	0.027	0.0049	0.0011	0.0001	
4	Número de puntos que definen a la curva 2 de peligrosidad sísmica (Curva media).	5				
5	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva 2 de peligrosidad sísmica (Curva media).	5	5.5	6.5	7.5	8
6	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva 2 de peligrosidad sísmica (Curva media).	0.027	0.012	0.0019	0.00021	0.000062
7	Número de puntos que definen a la curva 3 de peligrosidad sísmica (Curva media + σ).	5				
8	Intensidades correspondientes a cada punto de la curva 3 de peligrosidad sísmica (Curva media + σ).	5.31	5.5	6.5	7.5	8.15
9	Frecuencias anuales de excedencia correspondientes a cada intensidad sísmica de la curva 3 de peligrosidad sísmica (Curva media + σ).	0.027	0.0213	0.00378	0.00055	0.00012

Módulo Ejecutar (Data)

Las opciones de este módulo son las siguientes:

- **Vulnerabilidad sísmica (Seismic vulnerability):**

- **Método LM1_P (LM1_P method).** Opción para iniciar el cálculo de la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante el método LM1_P. Mediante esta opción se calculan las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio. Los principales resultados de la vulnerabilidad se almacenarán en un archivo con extensión “.vuln1” (Tabla C-8). Particularmente, en este archivo se incluyen los valores de alfa y beta que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica estimada. Opcionalmente, es posible elegir que se genere un archivo con resultados complementarios de vulnerabilidad el cual tendrá la extensión “.vuln2”. En este último archivo se indican probabilidades de que se excedan determinados valores del índice de vulnerabilidad, de acuerdo con cada una de las curvas de vulnerabilidad estimadas.
- **Método LM1 (LM1 method).** Opción para iniciar el cálculo de la vulnerabilidad sísmica de los edificios mediante el método LM1 de Risk-UE. Mediante esta opción se calcula el índice de vulnerabilidad total de cada edificio. Los resultados obtenidos de la vulnerabilidad se almacenarán en un archivo con extensión “.LM1V” (Tabla C-7).

- **Riesgo sísmico (Seismic risk):**

- **Método LM1_P (LM1_P method).** Opción para iniciar el cálculo de las curvas de riesgo sísmico de los edificios mediante el método LM1_P. Mediante esta opción se calculan para cada edificio, las curvas que expresan el riesgo sísmico en términos de frecuencias de excedencia de los estados de daño. Los principales resultados se almacenarán en un archivo de texto con extensión “.dam1” (Tabla C-9). Adicionalmente, se generan los archivos con extensión “.dam2”, “.dam3”, “.dam4”, y “.dam5”. En el archivo con extensión “.dam2” se almacenan los resultados de riesgo asociados a la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio. En el archivo con extensión “.dam3” se guardan los resultados de riesgo asociados a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica de cada edificio. En el archivo con extensión “.dam4” se almacenan los resultados de riesgo asociados a la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica. Finalmente, en el archivo con extensión “.dam5” se almacenan los mismos resultados de riesgo sísmico que en el archivo “.dam1”, pero en un formato diferente, en el caso del archivo “.dam5” se destina un renglón por cada edificio. Mientras que en el archivo “.dam1” se destina un renglón por cada curva de riesgo sísmico estimada.
- **Método LM1 (LM1 method).** Opción para iniciar el cálculo del riesgo sísmico mediante el método LM1 de Risk-UE. Mediante esta opción aparece una pantalla que solicita la intensidad o las intensidades que se ocuparán para calcular los escenarios de riesgo sísmico. Una vez proporcionada dicha intensidad o intensidades se estiman los resultados de riesgo que son almacenados en los archivos con extensión “.LM11”, “.LM12”, “.LM13”, “.LM14” y “.LM15” (Tabla C-10). Se destina un archivo para almacenar los resultados de riesgo sísmico asociados a cada intensidad macrosísmica. De tal forma, que por ejemplo, en el archivo con extensión “.LM11”, se guardarán los resultados de riesgo debidos a la primera intensidad macrosísmica proporcionada.

Tabla C-7. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.LM1V”, el cual es generado por USERISK, para guardar los resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos al aplicar la metodología LM1 de Risk-UE. Nombre del archivo: “Edificios_ejemplo. LM1V”.

Tipo de información	Descripción	Ejemplo	
		Edificio1	Edificio 2
Datos	1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos.	1	2
	2. Código de identificación del edificio.	111	211
	3. Código de la parcela.	11	21
	4. Código de la manzana.	1	2
	5. Código de la zona censal ZRP.	1	2
	6. Código del barrio.	1	2
	7. Código del distrito.	1	2
	8. Número de niveles.	9	10
	9. Código de la tipología estructural.	M33	RC32
	10. Año de construcción.	1931	1975
Resultados	11. Índice medio de la vulnerabilidad total	1.018	0.56

Tabla C-8. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.vuln1”, el cual es generado por USERISK, para guardar los principales resultados de vulnerabilidad sísmica obtenidos al aplicar la metodología LM1_P. Nombre del archivo: “Edificios_ejemplo.vuln1”.

Tipo de información	Descripción	Ejemplo	
		Edificio1	Edificio 2
Datos	1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos.	1	2
	2. Código de identificación del edificio.	111	211
	3. Código de la parcela.	11	21
	4. Código de la manzana.	1	2
	5. Código de la zona censal ZRP.	1	2
	6. Código del barrio.	1	2
	7. Código del distrito.	1	2
	8. Número de niveles.	9	10
	9. Código de la tipología estructural.	M33	RC32
	10. Factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural.	7	9
	11. Año de construcción.	1931	1975
	12. Límite inferior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	-1	-1
	13. Límite superior del intervalo de valores que puede tomar el índice de vulnerabilidad V .	2	2
Resultados	14. Parámetro α_L de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	37.43	12.86
	15. Parámetro β_L de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	21.51	12.81
	16. Valor medio de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.905	0.503
	17. Desviación estándar σ_L de la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.187	0.290
	18. Parámetro α_m de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	35.57	13.34
	19. Parámetro β_m de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	17.31	12.31
	20. Valor medio de la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	1.018	0.560
	21. Desviación estándar $\sigma_{\bar{V}}$ de la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.192	0.290
	22. Parámetro α_U de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	34.83	13.81
	23. Parámetro β_U de la función de probabilidad beta que corresponde a la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	14.21	11.81
	24. Valor medio de la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	1.131	0.617
	25. Desviación estándar σ_U de la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica del edificio.	0.192	0.290

Tabla C-9. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.dam1”, el cual es generado por USERISK 2011, para concentrar resultados de riesgo sísmico obtenidos al aplicar la metodología LM1_P.

Tipo de información	Descripción
Datos	1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos. 2. Código de identificación del edificio. 3. Código de la parcela. 4. Código de la manzana. 5. Código de la zona censal ZRP. 6. Código del barrio. 7. Código del distrito. 8. Número de niveles. 9. Código de la tipología estructural. 10. Factor de fiabilidad en la asignación de la tipología estructural. 11. Año de construcción. 12. Zona sísmica
Resultados	13. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño [$v(D1)$, $v(D2)$, $(D3)$, $v(D4)$, $v(D5)$], que definen a la curva de riesgo sísmico Inferior - σ . Curva que se obtiene al considerar la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media - σ de la peligrosidad sísmica. 14. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Inferior. Curva que se obtiene al considerar la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media de la peligrosidad sísmica. 15. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Inferior + σ . Curva que se obtiene al considerar la curva Inferior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media + σ de la peligrosidad sísmica. 16. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Mejor - σ . Curva que se obtiene al considerar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica y la curva media - σ de la peligrosidad sísmica. 17. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Mejor. Curva que se obtiene al considerar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica y la curva media de la peligrosidad sísmica. 18. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Mejor + σ . Curva que se obtiene al considerar la curva Mejor de la vulnerabilidad sísmica y la curva media + σ de la peligrosidad sísmica. 19. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Superior - σ . Curva que se obtiene al considerar la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media - σ de la peligrosidad sísmica. 20. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Superior. Curva que se obtiene al considerar la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media de la peligrosidad sísmica. 21. Frecuencias anuales de excedencia de los grados de daño que definen a la curva de riesgo sísmico Superior + σ . Curva que se obtiene al considerar la curva Superior de la vulnerabilidad sísmica y la curva media + σ de la peligrosidad sísmica.

Tabla C-10. Descripción de la información que contiene el archivo con extensión “.LM11”, el cual es generado por USERISK, para guardar los resultados del escenario de riesgo sísmico generado a partir de la primera intensidad macrosísmica asignada. Dicho escenario se estima de acuerdo con la metodología LM1 de Risk-UE. Nombre del archivo: “Edificios_ejemplo. LM11”.

Tipo de información	Descripción
Datos	1. Número de orden del edificio dentro de la base de datos. 2. Código de identificación del edificio. 3. Código de la parcela. 4. Código de la manzana. 5. Código de la zona censal ZRP. 6. Código del barrio. 7. Código del distrito. 8. Código de la tipología estructural 9. Año de construcción 10. Número de niveles 11. Índice medio de la vulnerabilidad total 12. Intensidad
Resultados	13. Daño medio 14. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño 0 (D0) 15. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño 1 (D1) 16. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño 2 (D2) 17. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño 3 (D3) 18. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño 4 (D4) 19. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño 5 (D5)

Módulo Herramientas (Tools)

Las opciones de este módulo son las siguientes:

- **Curvas de vulnerabilidad sísmica (Seismic vulnerability curves).** Opción para abrir la pantalla donde es posible observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio, obtenidas mediante el método LM1_P (Figura C-5).
- **Curvas de riesgo sísmico (Seismic risk curves).** Opción para abrir la pantalla donde es posible observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio, obtenidas mediante el método LM1_P (Figura C-6, Figura C-7).

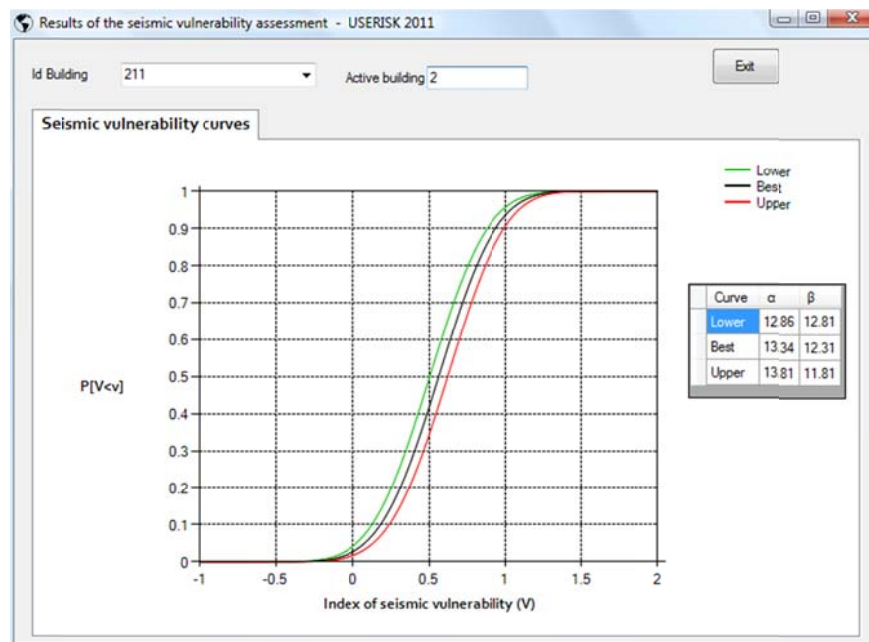


Figura C-5. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada edificio estudiado; en este caso se muestran las curvas y los respectivos parámetros α y β que definen a cada curva de vulnerabilidad sísmica (Inferior, Mejor y Superior) del edificio 2 del ejemplo (Tabla C-4).

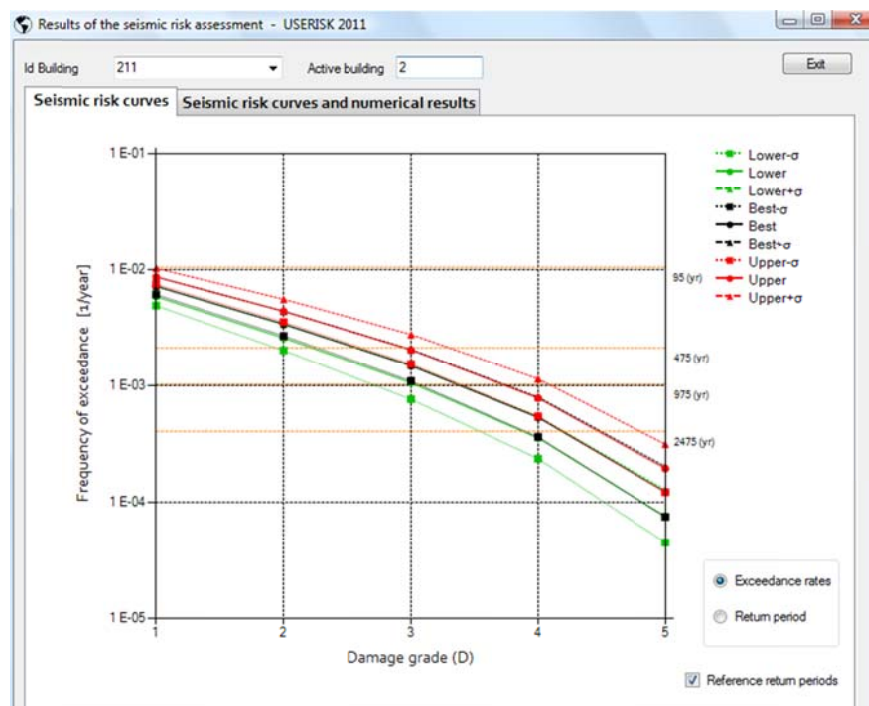


Figura C-6. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio 2 del ejemplo (Tabla C-4), en términos de frecuencias anuales de excedencia versus grado de daño.

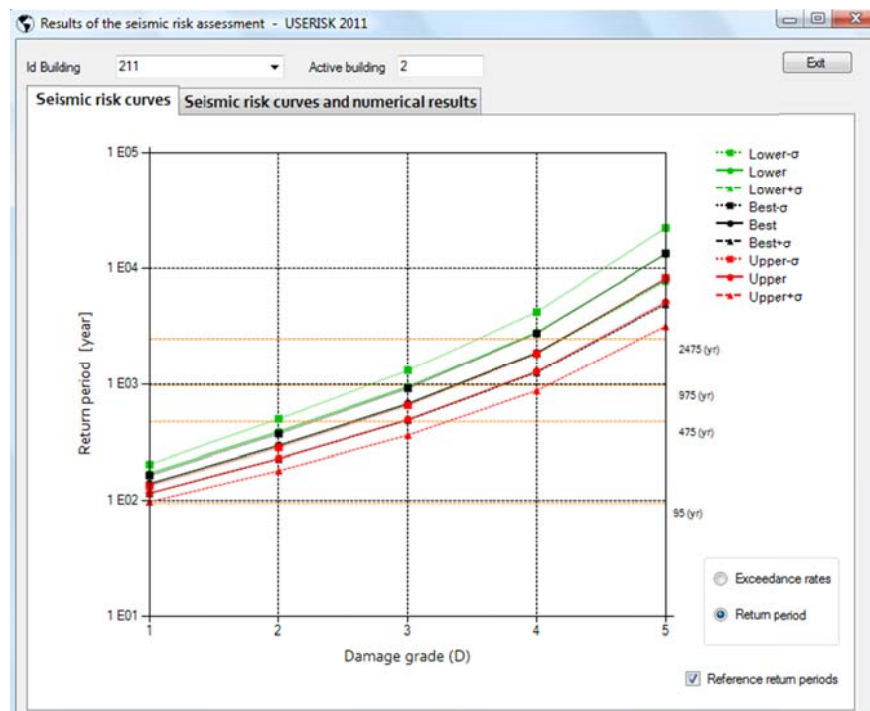


Figura C-7. Pantalla de USERISK en la que se pueden observar las curvas de riesgo sísmico de cada edificio estudiado; en este caso se observan las curvas de riesgo sísmico del edificio 2 del ejemplo (Tabla C-4), en términos de los periodos de retorno del grado de daño.

Módulo Ayuda (Help)

Las opciones de este módulo son las siguientes:

- **Índice (Index).** Opción que muestra la ayuda de USERISK. En dicha ayuda se ofrece información complementaria a la contenida en el presente documento sobre el uso de USERISK.
- **Acerca de (About).** Opción que muestra la pantalla que contiene información sobre la versión del código USERISK y sobre los autores del mismo (Figura C-8).



Figura C-8. Pantalla de USERISK con información sobre la versión de dicho código.

Anexo D

Códigos empleados por el Ayuntamiento de Barcelona para identificar las tipologías de los edificios

En la base de datos del Ayuntamiento de Barcelona las tipologías estructurales se definieron a partir de los materiales existentes en seis partes principales de cada edificio, de acuerdo con la nomenclatura indicada en la Tabla D-1. Desde la Tabla D-2 hasta la Tabla D-7 se muestran las diferentes opciones que se emplearon, para distinguir los materiales existentes en cada una de las seis partes principales de cada edificio de Barcelona.

Tabla D-1. Datos sobre los materiales de los edificios.

Nombre del dato	Descripción del dato
P1	Materiales de los principales elementos estructurales.
P2	Materiales de los muros.
P3	Materiales de los forjados.
P4	Materiales de la cubierta.
P5	Materiales de la fachada.
P6	Materiales de los recubrimientos de los forjados (pavimentos).

Tabla D-2. Clasificación empleada para identificar a los materiales de los principales elementos estructurales de los edificios (P1).

Código – P1	Descripción
FE	Hierro. Estructuras metálicas, pilares y vigas maestras metálicas (elementos estructurales horizontales y verticales metálicos).
FH	Mixta de Hierro y Hormigón.
FM	Mixta de Hierro y Madera.
FO	Hormigón. Vigas maestras y pilares de hormigón.
MN	Monolítica. Muros de carga. Implica que el código de paredes será, principalmente, TM o MP.
OF	P.Obra/Madera. Pilares de obra y vigas maestras de madera. También con pilares de madera.
OM	P.Obra/Hierro. Pilares de obra y vigas maestras metálicas.
SI	Singular. Mallas espaciales, edificación monumental, estadios.

Tabla D-3. Clasificación empleada para identificar a los principales materiales de los muros de los edificios (P2).

Código – P2	Descripción
BF	Bloques hormigón.
CH	Chapa plegada.
FI	Fibro cemento.
FV	FO Vibrado (hormigón vibrado).
MP	Paredat (mampostería irregular).
OB	Obra.
SI	Sintéticos.
TM	Ladrillo macizo.

Tabla D-4. Clasificación empleada para identificar a los principales materiales de los forjados en los edificios (P3).

Código – P3	Descripción
CR	Cerámica armada. Forjado cerámico.
FO	Hormigón. Losas de hormigón no aligeradas.
FR	Reticular. Forjado reticular.
RE	V. Hierro. Viguetas de hierro con bovedilla.
RO	V. Hormigón. Viguetas de hormigón con bovedilla.
RR	Vigueta/Bovedilla. Bóvedas de fábrica o de sillería.
RU	V. Madera. Viguetas de madera con bovedilla.
SL	Soleras. Soleras dobles, tableros de madera autoportantes.

Tabla D-5. Clasificación empleada para identificar a los materiales que forman parte de las cubiertas (P4).

Código – P4	Descripción
CH	Chapa Plegada.
FI	Fibro cemento.
PS	Pizarra.
TA	Tejidos D.
TC	Catalana.
TE	Terraza.
TL	Teja S.
TS	Teja SOL.

Tabla D-6. Clasificación empleada para identificar a los materiales que forman las fachadas (P5).

Código – P5	Descripción
CR	Cerámica.
ES	Estucado.
MM	Mármol.
PA	Piedra Artificial.
PN	Piedra Natural.
RE	Revocado.
TV	Obra Vista.
VD	Acrystalado.

Tabla D-7. Clasificación empleada para identificar a los materiales de los pavimentos o recubrimientos de los forjados (P6).

Código – P6	Descripción
CC	Cerámica.
FO	Hormigón.
GR	Granito.
MM	Madera.
MO	Mosaico.
PQ	Parquet.
ST	Sintéticos.
TE	Terrazos.

