



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO, CARTOGRÁFICA Y GEOFÍSICA

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

TESIS DOCTORAL
(Volumen I)

Autora:

M^a Nieves Lantada Zarzosa

Directores:

Dr. Luis G. Pujades Beneit

Dr. José A. Gili Ripoll

Barcelona, 2007

CAPÍTULO 10

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

10.1 Introducción

En este trabajo se han expuesto, adaptado y adoptado metodologías avanzadas que permiten obtener y analizar escenarios de daño sísmico en grandes ciudades. Escenarios que deben entenderse como la predicción de la situación esperable en caso de terremoto. La existencia de un buen conocimiento de la acción sísmica esperada, el desarrollo de estudios sobre el comportamiento mecánico de los edificios más representativos y la construcción de una completa y detallada base de datos sobre los suelos y parque edificado de la ciudad, han permitido el uso de Sistemas de Información Geográfica para desarrollar una aplicación piloto, de análisis de riesgo sísmico, a Barcelona, ciudad situada en una región donde el peligro sísmico es entre bajo y moderado.

Este último capítulo se dedica a una síntesis y reflexión final. En él se muestra un resumen y discusión de los resultados más relevantes, así como las principales

conclusiones sobre los conceptos y métodos involucrados en la evaluación del riesgo sísmico y sobre el uso de técnicas GIS. Obviamente, todo trabajo de investigación, y éste lo es, supone un avance respecto a estudios previos, pero deja también aspectos abiertos y vías de progreso. En este sentido se efectúa una comparación con los resultados más relevantes de estudios previos de daño y riesgo sísmico en Barcelona y se apuntan líneas de desarrollo futuro y recomendaciones para avanzar en los diferentes aspectos y temas aquí abordados.

10.2 Discusión

En este apartado se resumen y discuten los aspectos más relevantes de este estudio, referentes a los métodos, a los datos, al uso de un Sistema de Información Geográfica y a los resultados. Particularmente importante es la discusión de la forma de considerar los grados o estados de daño en el MIV y en el MEC. Esta discusión es fundamental a la hora de comprender el alcance y limitaciones de las comparaciones de los resultados obtenidos mediante ambos métodos, así como la forma de aplicar modelos de evaluación de pérdidas humanas y económicas.

10.2.1 Los métodos

Siguiendo las directrices del proyecto Risk-UE, el análisis del riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona se ha realizado mediante los métodos del *Índice de Vulnerabilidad* (MIV) y del *Espectro de Capacidad* (MEC). Ambos métodos han sido descritos en detalle en capítulos previos y difieren en la forma en que definen la acción sísmica y el edificio. El MIV considera la acción en términos de intensidad macrosísmica y caracteriza la vulnerabilidad del edificio mediante un índice. La predicción del daño esperado se efectúa a partir del ajuste de funciones semiempíricas que permiten estimar, de forma completa, tanto el grado de daño esperado, como las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los estados de daño. El MEC define la acción sísmica en términos de espectros de respuesta y de demanda y el edificio por medio de su espectro de capacidad, que se obtiene a partir del

análisis de su comportamiento mecánico. El MEC es un método avanzado que ha incorporado técnicas procedentes del diseño sísmico de edificios basado en su comportamiento. Con todo, tanto para la definición de la acción sísmica como del edificio requiere una mayor cantidad y calidad de información. Para lo primero se necesitan datos de aceleración sísmica; para lo segundo se requiere analizar modelos mecánicos mediante sofisticados programas de análisis no lineal de estructuras, para lo que se deben adoptar también importantes simplificaciones. Se trata pues de un método potente, pero costoso en tiempo de cómputo y en cantidad y calidad de datos para desarrollar los espectros de capacidad de un gran número de edificios; por lo que su aplicación masiva a grandes ciudades, aconseja simplificar las categorías de edificios en unas pocas tipologías. Este hecho le resta versatilidad cuando se compara con el método del índice de vulnerabilidad. Esta diferencia en la caracterización de los edificios, junto con la diferente definición de la acción sísmica, hace que la comparación entre los resultados obtenidos mediante ambos métodos no sea directa. Pero, además, el MEC agrupa en un solo estado de *daño completo* (4), los estados de *daño extensivo* (4) y *completo* (5) del MIV. Esta agrupación introduce al menos tres aspectos relevantes cuando se trata de comparar los escenarios. El primero hace referencia a la obtención de las curvas de fragilidad, el segundo a la obtención del grado de daño medio o estado de daño más probable y el tercero a los modelos de daños indirectos, como, por ejemplo, el coste económico y los daños a la población. Se analizan a continuación estos tres aspectos.

Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad se definen mediante los umbrales de daño o valores medios de la distribución lognormal y las correspondientes desviaciones típicas. Los umbrales de daño se obtienen directamente a partir del espectro de capacidad. Las desviaciones típicas se calculan suponiendo que las probabilidades de los diferentes estados de daño siguen una distribución binomial o beta equivalente. En esta tesis se ha seguido la propuesta de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) según la cual, para cada estado de daño, se obtiene la curva de fragilidad imponiendo que en el umbral la probabilidad de excedencia sea del 50% y que las probabilidades de

excedencia de los otros estados siguen una distribución binomial o beta equivalente. Se consideran sólo 4 estados de daño no nulo. Una forma alternativa y, a nuestro entender, más consistente con la agrupación de los estados de daño, es mantener la distribución para 5 estados de daño no nulo agrupando las probabilidades de los estados de daño 4 y 5 en el estado de daño 4. La Tabla 10.1 muestra la comparación de las probabilidades de que se igualen o excedan los diferentes estados de daño usando distribuciones binomiales (o beta equivalentes) de 4 y 5 estados de daño no nulos. En el caso de 4 estados no nulos, la probabilidad del estado de daño 4 se obtiene acumulando las probabilidades de los estados de daño 4 y 5 de la distribución binomial correspondiente.

Tabla 10.1. Comparación entre las probabilidades de que se igualen o excedan los diferentes estados de daño usando distribuciones binomiales (o beta equivalentes) de 4 y 5 estados de daño no nulos.

P(d ≥ D₁)		P(d ≥ D₂)		P(d ≥ D₃)		P(d ≥ D₄)		d*	
N=4	N=5	N=4	N=5	N=4	N=5	N=4	N=5	N=4	N=5
0.50	0.50	0.13	0.12	0.02	0.01	0.00	0.00	0.65	0.64
0.85	0.86	0.50	0.50	0.18	0.16	0.04	0.02	1.57	1.54
0.97	0.98	0.81	0.84	0.50	0.50	0.19	0.14	2.47	2.46
1.00	1.00	0.96	0.99	0.82	0.88	0.50	0.50	3.28	3.36

Se observa cómo las curvas de fragilidad que siguen las recomendaciones del proyecto Risk-UE (N=4 en la Tabla 10.1) sobreestiman, muy ligeramente, el daño para bajos niveles de daño y lo subestiman para estados de daño cercanos al colapso. Por lo que afecta a este estudio, para los escenarios aquí analizados la diferencia es irrelevante pero, para escenarios más severos las diferencias pueden ser significativas.

Grados de daño medio o estados de daño más probables

El grado de daño medio o estado de daño más probable es un excelente parámetro para cartografiar el daño esperado ya que da una idea clara de las consecuencias dañinas de un escenario concreto. En este estudio se han manejado tres factores de daño: d , d^* y μ_d . El parámetro d define el grado de daño medio o más probable en el MIV y toma valores entre 0 y 5. d^* es el grado de daño medio en el MEC y, en consecuencia, toma valores entre 0 y 4. Finalmente, en el MIV, para cada intensidad sísmica y para cada índice de vulnerabilidad, μ_d define el grado de daño esperado; este parámetro se ha ajustado de forma que permite definir completamente la distribución beta equivalente a la binomial; por consiguiente, μ_d toma valores entre 0 y 5 y debe equivaler al parámetro d .

Es conveniente, por tanto, disponer de equivalencias entre estos tres parámetros ya que entonces, los mapas de daño son homogéneos. Existen diferentes métodos para establecer la comparación entre d y d^* .

El más rápido y cómodo es escalar mediante la siguiente ecuación:

$$d^* = \frac{4}{5} d \quad [10.1]$$

De esta forma, dado d con valores entre 0 y 5, se obtiene d^* . Para $d=0$, $d^*=0$ y para $d=5$, $d^*=4$. Inversamente se puede estimar d a partir de d^* .

Una transformación más consistente con la equivalencia de los estados de daño 0, 1, 2, y 3 en los métodos MIV y MEC y a la agrupación de los estados de daño 4 y 5 del MIV para definir el estado de daño 4 del MEC, consiste en partir de la misma definición del factor de daño medio. Así, si P_k $\{k=1\dots 5\}$, son las probabilidades de daño de los 5 estados de daño no nulo en el MIV, la siguiente ecuación define los parámetros d y d^* :

$$\begin{aligned} d &= P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4 + 5P_5 \\ d^* &= P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4(P_4 + P_5) \end{aligned} \quad [10.2]$$

donde la probabilidad del estado de daño 4 en el MEC respeta estrictamente la agrupación de los estados de daño 4 y 5 del MIV. De esta ecuación se sigue que:

$$d^* = d - P_5 \quad [10.3]$$

De esta forma para pasar de d a d^* , basta con conocer la probabilidad del estado de daño 5 en el MIV. En consecuencia, es conveniente disponer de tablas, gráficos o algoritmos que permitan establecer, para cada d^* la probabilidad del grado de daño 5 en el MIV, cantidad que permite calcular la equivalencia entre d y d^* . La Figura 10.1 muestra la comparación entre d^* , d y μ_d . Se incluyen dos casos de d^* que corresponden al uso de las ecuaciones [10.1] y [10.3]. μ_d se ha hecho variar entre 0 y 5, hallándose la distribución beta (binomial equivalente) a partir de la cual se han estimado las probabilidades de los diferentes estados de daño y el grado de daño medio.

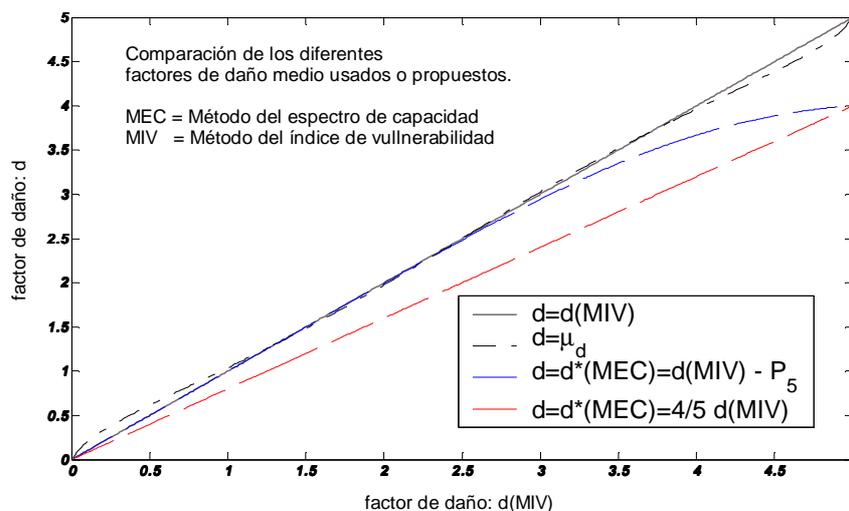


Figura 10.1. Comparación de los diferentes factores de daño o grados de daño medio (véase explicación en el texto).

Se observa un buen acuerdo entre μ_d y d . La normalización de la ecuación [10.1] es inadecuada para relacionar d y d^* . En este estudio se ha seguido el criterio de la ecuación [10.3]; en este caso, d y d^* coinciden hasta $d=3$ donde la probabilidad P_5 es del 5.6 %; para d igual a 1, 2, 3, 4 y 5, P_5 toma respectivamente valores de 0, 0.004, 0.056, 0.33 y 1, valores que, de acuerdo con la ecuación [10.3], corresponden respectivamente a d^* igual a 1, 1.996, 2.944, 3.67 y 4.

Modelos de daño indirecto

En los estudios de riesgo sísmico, es crucial la obtención de escenarios de, entre otros, coste económico, fallecidos, personas sin hogar y volumen de escombros. Estos números son de capital importancia para la evaluación y gestión de la emergencia pero también son altamente sensibles. En muchas de estas evaluaciones entran en juego las probabilidades de los estados de daño *severo* y *colapso*. Así, por ejemplo, los modelos de víctimas dependen del número de edificios colapsados que, a su vez, se obtiene a partir de la probabilidad de colapso. En general, estos modelos no especifican si estamos en un modelo de daño tipo MIV, con 5 estados de daño no nulo o estamos en un modelo de daño tipo MEC con 4 estados de daño, quedando a la interpretación del usuario si el estado de colapso se refiere de forma estricta a la destrucción y derrumbe total del edificio, que correspondería al estado de daño 5 del MIV, o si se refiere a daño irreparable que requiere que el edificio sea demolido. Este último caso correspondería al estado de daño 4 del MEC que agrupa los estados de daño 4 y 5 del MIV. La cuestión es relevante ya que, por ejemplo el número de personas fallecidas es un número de gran sensibilidad social; en una ciudad con 2 millones de habitantes, errores del 1% en la estimación o asignación de probabilidades se transforma en 200 personas fallecidas. De estas consideraciones pueden depender sobreestimaciones o infravaloraciones de los daños económicos y en la población. En este estudio, siguiendo las directrices del proyecto Risk-UE, nos hemos situado del lado conservador, por lo que algunos resultados, particularmente los que hacen referencia al número de personas sin hogar, pueden estar sobreestimados.

10.2.2 Los datos

La aplicación de los métodos avanzados de análisis de riesgo a la ciudad de Barcelona, sólo ha sido posible gracias a la realización de un número importante de estudios previos realizados por otros autores y a la disponibilidad de una extensa base de datos sobre los edificios de la ciudad. Discutimos a continuación los aspec-

tos más relevantes relativos a los escenarios sísmicos, a la base de datos de edificios y a los espectros de capacidad.

Los escenarios sísmicos

Los estudios que dan fundamento a la definición de la acción sísmica se deben a Irizarry (2004). Tanto el escenario determinista como el probabilista se han determinado en términos de intensidad macrosísmica EMS-98 y en términos de espectros de respuesta. Para el escenario probabilista se ha recurrido también a Secanell (1999) y para la incorporación de los efectos de suelo ha sido fundamental el estudio de Cid (1998) que ha permitido clasificar los suelos de la ciudad en cuatro clases.

De hecho, en Cataluña, los estudios de peligrosidad sísmica en términos macrosísmicos disponen de una extensa base de datos de terremotos pasados. Sin embargo, para la definición de los espectros de respuesta y de demanda se ha recurrido a la base de datos de aceleración europea ya que, en Cataluña, no existen datos suficientes para su definición. El método usado por Irizarry (2004) para definir los espectros de respuesta para los escenarios determinista y probabilista suple bien esta falta de datos, eligiendo acelerogramas de terremotos reales que, si bien no han ocurrido en Cataluña, coinciden con las características de magnitud y distancia de los terremotos escogidos. Por lo tanto, entendemos que representan adecuadamente los terremotos simulados. De hecho, la consistencia de los resultados obtenidos a partir del MEC y del MIV así lo confirma. Las diferencias se deben más a pequeños detalles metodológicos en la consideración de la propagación del terremoto en el caso determinista y en la consideración práctica de los efectos de suelo en ambas metodologías. Pero, sin duda, en estas diferencias también influye la simplificación de los tipos de edificios que ha sido preciso efectuar en el MEC que, aunque incorpora aspectos constructivos y técnicos que no puede incorporar el MIV, pierde la versatilidad y riqueza de este último método para caracterizar los edificios particulares.

La base de datos de los edificios

La definición de los edificios en el MIV se basa fundamentalmente en la base de datos facilitada por el Instituto Municipal de Informática (IMI) a través del servicio de Protección Civil del Ayuntamiento de Barcelona. La base de datos original, que incluye información catastral, se ha depurado y se ha creado una nueva base, más completa, más fiable y adecuada para el uso de métodos de análisis de riesgo de última generación. En el MEC esta información se usa para: 1) definir el tipo de edificio entre tres tipologías: hormigón, mampostería y otros, 2) establecer el número de pisos según las tres categorías: pisos altos, de altura intermedia y bajos, y 3) para asignar el tipo de suelo sobre el que está situado geográficamente el edificio. La información para obtener espectros de capacidad procede de planos estructurales y arquitectónicos detallados de edificios tipo de hormigón y de mampostería.

La base de datos finalmente empleada, contiene las propiedades catastrales de 80587 parcelas, 70157 de las cuales corresponden a parcelas con edificios de viviendas de los que se conocen, entre otros, los siguientes parámetros: geometría en planta y en altura, edad, estado de conservación, tipología constructiva, situación absoluta georreferenciada y situación relativa dentro de la manzana con respecto a los edificios de la misma. La base de datos está actualizada al año 1996 y el número de edificios constituye el 93.4 % de los inmuebles de características comparables, que constan en el censo de edificios del 2001. Por lo que se concluye que la base de datos tiene un muy alto grado de representatividad y de fiabilidad, tanto más cuando los resultados de este estudio se interpretan desde una óptica probabilista.

Los espectros de capacidad

La definición del edificio en el MEC se efectúa mediante el espectro de capacidad, en su formato bilineal. Para su obtención es necesario efectuar un análisis, estático o dinámico, no lineal para el que se requiere un modelo estructural que represente bien el edificio. En este estudio el MEC se ha aplicado sólo a edificios de hormigón armado con forjados reticulares y a edificios de mampostería no reforzada típicos de Barcelona. Los datos de base para los modelos estructurales han sido planos

estructurales y arquitectónicos de un edificio de mampostería y de uno de hormigón. En base a estos datos se han modelado seis edificios, tres de mampostería y tres de hormigón, representativos de los edificios altos, medianos y bajos. Por consiguiente, la aplicación masiva a los edificios de la ciudad, aunque suficiente, es muy simplificada ya que, en realidad, la información de base corresponde a sólo dos edificios. Por otra parte, la aplicación del MEC no contempla otros aspectos como la antigüedad del edificio o la posición relativa del edificio respecto a los edificios de una manzana. Por lo tanto se trata de una aproximación que suaviza las diferencias entre edificios distintos suponiendo que todos ellos, en promedio, se hallan bien representados por los seis edificios modelados a partir de edificios existentes de características típicas de los sistemas y costumbres constructivas de la ciudad. En este sentido los escenarios de riesgo obtenidos mediante el MEC son consistentes con los obtenidos mediante el MIV, pero la riqueza de datos que sustenta la definición del edificio en el MIV es mayor que en el MEC. Por otro lado, si bien la información utilizada en el MEC es más técnica que en el MIV, ya que contiene detalles estructurales y constructivos que el MIV puede incorporar sólo de forma indirecta en el correspondiente índice de vulnerabilidad.

10.2.3 El Sistema de Información Geográfica

Para este estudio se ha implementado un Sistema de Información Geográfica utilizando el *software* ArcView que ha sido de gran ayuda para generar y depurar la base de datos de los edificios de Barcelona. Pero además, durante el progreso del estudio los desarrollos incorporados a la herramienta han permitido, de forma eficiente y completa, explotar los datos disponibles, incorporar nuevos datos procedentes de otras fuentes y asignar a las unidades de información resultados procedentes de los análisis efectuados. Todo ello con el objetivo de generar mapas de riesgo entendidos como la representación georreferenciada de los daños físicos directos esperados, sus probabilidades de ocurrencia así como las estimaciones de otros parámetros fundamentales para evaluar el impacto económico del sismo y sus

efectos en la población. En su estado actual permite, de forma casi automática, simular los efectos de otros escenarios sísmicos mediante cualquiera de los dos métodos aquí utilizados. Pero, además permite actualizar los escenarios cuando se disponga de datos actualizados de los edificios de la ciudad o, incluso, desarrollar escenarios para otras ciudades que dispongan de datos compatibles con las bases aquí utilizadas. Es claro que la aplicación a otras ciudades no es directa y requiere reevaluar las tablas de índices de vulnerabilidad de los edificios típicos o, en el caso del MEC, disponer de espectros de capacidad adecuados.

10.2.4 Los resultados

El análisis de riesgo es complicado ya que involucra un gran número de variables y parámetros. El daño físico directo sobre edificios, estructuras e infraestructuras, es sólo la condición de contorno inicial que desencadena el deterioro de un sistema dinámico de gran complejidad que, a partir de este momento, debe empezar a evolucionar hacia la recuperación del estado de equilibrio que hacía posible el normal desarrollo de la actividad socioeconómica de los sistemas productivos, los servicios y prestaciones a la población y, en resumen, el bienestar de los ciudadanos. Los conceptos de *auto-organización* y *capacidad de adaptación* a la evolución del sistema son básicos para la evolución temporal de este tipo de sistemas.

En este apartado se sintetizan y discuten, a nivel de distrito, sus principales características así como los principales resultados referentes al daño físico directo y a los otros factores de riesgo analizados en esta tesis. De forma implícita se verá que la escala, a nivel de distrito, aunque suficiente para ofrecer una imagen simplificada de los escenarios, es insuficiente para resolver la enorme riqueza y diversidad de los barrios y zonas de Barcelona. La heterogeneidad de, por ejemplo, los distritos de *Sants-Montjuïc* y *Sarrià-Sant Gervasi* es evidente y no queda recogida en estos números globales. *Sants-Montjuïc* incluye los Barrios de *Sants* y de *Zona Franca-Port*; las características de estos dos Barrios no tienen mucho que ver entre ellas; *Sants* contiene el antiguo pueblo del mismo nombre, tiene una altísima densidad de

población y una alta vulnerabilidad; *Zona Franca-Port* es un inmenso polígono industrial. *Sarrià-Sant Gervasi* está formado por los barrios de *Sarrià*, *Sant Gervasi* y *Vallvidrera-Les Planes*; los dos primeros contienen los pequeños pueblos que dan nombre al distrito, el tercero contiene una gran parte de las colinas y parques de Collserola. Lo mismo ocurre, en mayor o menor grado en todos los distritos, e incluso barrios, de la ciudad. En este sentido se considera acertada la escala de zonas de estudio ya que respeta de forma adecuada la diversidad y mantiene el carácter probabilista del estudio. Con todo, teniendo en mente estas advertencias, aquí se efectúa el análisis a nivel de distrito. En el Anejo E se detallan todas las características y resultados a los tres niveles que se ha efectuado este trabajo: distritos, barrios y zonas de estudio. Este anejo se ha elaborado con el objetivo de facilitar, a los gestores de la protección civil, datos cuantitativos que se consideran de gran utilidad para la planificación y la gestión de posibles emergencias sísmicas. Pasamos, pues, a analizar y discutir los principales resultados referentes al daño físico directo, a los daños a la población, al coste económico y al volumen de escombros generado, a nivel de distrito.

Daño físico directo

La Tabla 10.2 sintetiza, a nivel de distrito, los valores del estado de daño medio esperado. Se incluyen los resultados obtenidos al aplicar las dos metodologías a los dos escenarios aquí considerados. En la misma tabla se incluyen los tipos de suelo. La Tabla 10.3 detalla las principales características de los distritos de la ciudad incluyendo: el número que identifica el distrito, denominación, la superficie, el número de edificios, la población absoluta (según censo del 2001), la densidad de habitantes por km², la antigüedad media de los edificios y el índice medio de vulnerabilidad. Así pues, estas dos tablas sintetizan las principales características de la ciudad y los principales resultados obtenidos, facilitando su discusión.

Tabla 10.2. Síntesis de los escenarios de daño, por distritos. En la primera columna, se incluye información sobre los suelos.

Tipos de suelo	DISTRITO		MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD (MIV)				MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD (MEC)			
			ESC. DET.		ESC. PROB.		ESC. DET.		ESC. PROB.	
	N.	Nombre	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *
1-2-R	1	Ciutat Vella	2.43	2.42	2.45	2.44	1.78	1.78	2.51	2.49
1-2-3-	2	Eixample	2.00	2.00	2.03	2.03	1.16	1.16	1.90	1.90
1-2-R	3	Sants-Montjuïc	1.33	1.33	1.73	1.73	1.06	1.06	1.74	1.74
2-3-R	4	Les Corts	1.20	1.20	1.34	1.34	0.62	0.62	1.22	1.22
2-3-R	5	Sarrià-Sant	1.37	1.37	1.38	1.38	0.56	0.56	1.14	1.14
2-3-R	6	Gràcia	1.61	1.61	1.61	1.61	0.83	0.83	1.50	1.50
2-3-R	7	Horta-Guinardó	1.31	1.31	1.16	1.16	0.48	0.48	1.07	1.07
1-3-R	8	Nou Barris	1.67	1.67	1.27	1.27	0.50	0.50	1.11	1.11
1-2-3-	9	Sant Andreu	1.77	1.77	1.39	1.39	0.66	0.66	1.25	1.25
1-2-3	10	Sant Martí	1.73	1.73	1.70	1.70	1.01	1.01	1.54	1.54
Valores medios			1.65	1.65	1.59	1.59	0.86	0.86	1.51	1.51

Finalmente, la Figura 10.2 muestra los mapas de los escenarios correspondientes a los parámetros de daño de la Tabla 10.2. Por su lado, la Tabla 10.3 permite ir más allá del simple análisis del daño físico, permitiendo el análisis y discusión del impacto de estos escenarios, por ejemplo, en la población. Estos aspectos se analizan más abajo.

Se observa cómo las principales características de los distritos y los resultados referentes al daño físico directo (véase la Figura 10.2) son compatibles y consistentes con la evolución histórica de los distritos y barrios de la ciudad. En todos los escenarios de riesgo se aprecia, de forma clara, una estructura radial que, con centro en el distrito 01 de *Ciutat Vella*, se extiende hacia los distritos más periféricos. Sólo en el escenario determinista, usando el MIV, se observan los efectos de la mayor proximidad del epicentro a la zona norte, produciendo un mayor daño en los distritos más septentrionales.

Tabla 10.3. Resumen de las principales características de los distritos de Barcelona.

DISTRITO		Superficie (km ²)	Número de edificios	Población en número de habitantes (P _i)			Densidad de Población en habit/km ² (D _i)		Antigüedad de los edificios (A _i)		Índice de vulnerabilidad (Iv _i)	
N.	Nombre			Absoluta (P _i)	Relativa (%) 100(P _i /P _{total})	Relativa (P _i /P _{máx})	Absoluta (D _i)	Relativa (D _i /D _{máx})	Absoluta (A _i)	Relativa Ar _i (*)	Absoluto (Iv _i)	Relativo (Iv _i /Iv _{máx})
01	Ciutat Vella	4.493	5502	85398	5.7	0.35	19007	0.57	1896	0	0.959	1
02	Eixample	7.097	8658	247418	16.4	1	33146	1	1933	0.60	0.884	0.92
03	Sants-Montjuïc	20.250	7159	166983	11.1	0.67	7819	0.24	1939	0.73	0.832	0.86
04	Les Corts	6.003	2543	82348	5.5	0.33	13685	0.41	1954	0.94	0.758	0.79
05	Sarrià-Sant Gervasi	18.879	7924	130262	8.7	0.53	6482	0.20	1951	0.87	0.780	0.82
06	Gràcia	4.045	6999	115198	7.7	0.47	27532	0.83	1938	0.65	0.816	0.84
07	Horta-Guinardó	11.873	9805	168567	11.2	0.68	14099	0.43	1954	0.92	0.748	0.78
08	Nou Barris	8.207	7198	168837	11.2	0.68	21003	0.63	1957	1	0.763	0.80
09	Sant Andreu	6.283	7212	135102	9.0	0.55	20582	0.62	1944	0.81	0.774	0.79
10	Sant Martí	10.176	7157	205468	13.6	0.83	19031	0.57	1939	0.79	0.823	0.83
Valores totales o medios		97.306	70157	1505581	100	6.09	14912(**)	0.45	1941	0.74	0.813	0.85

(*) La antigüedad relativa de los edificios se ha definido mediante la siguiente fórmula $Ar_i = 1 - [(A_{máx} - A_i) / (A_{máx} - A_{mín})]$; de esta forma, corresponde la unidad al distrito con los edificios más nuevos y 0 al distrito con los edificios más antiguos.

(**) La densidad media de la ciudad se ha calculado a partir de la población total y la superficie total.

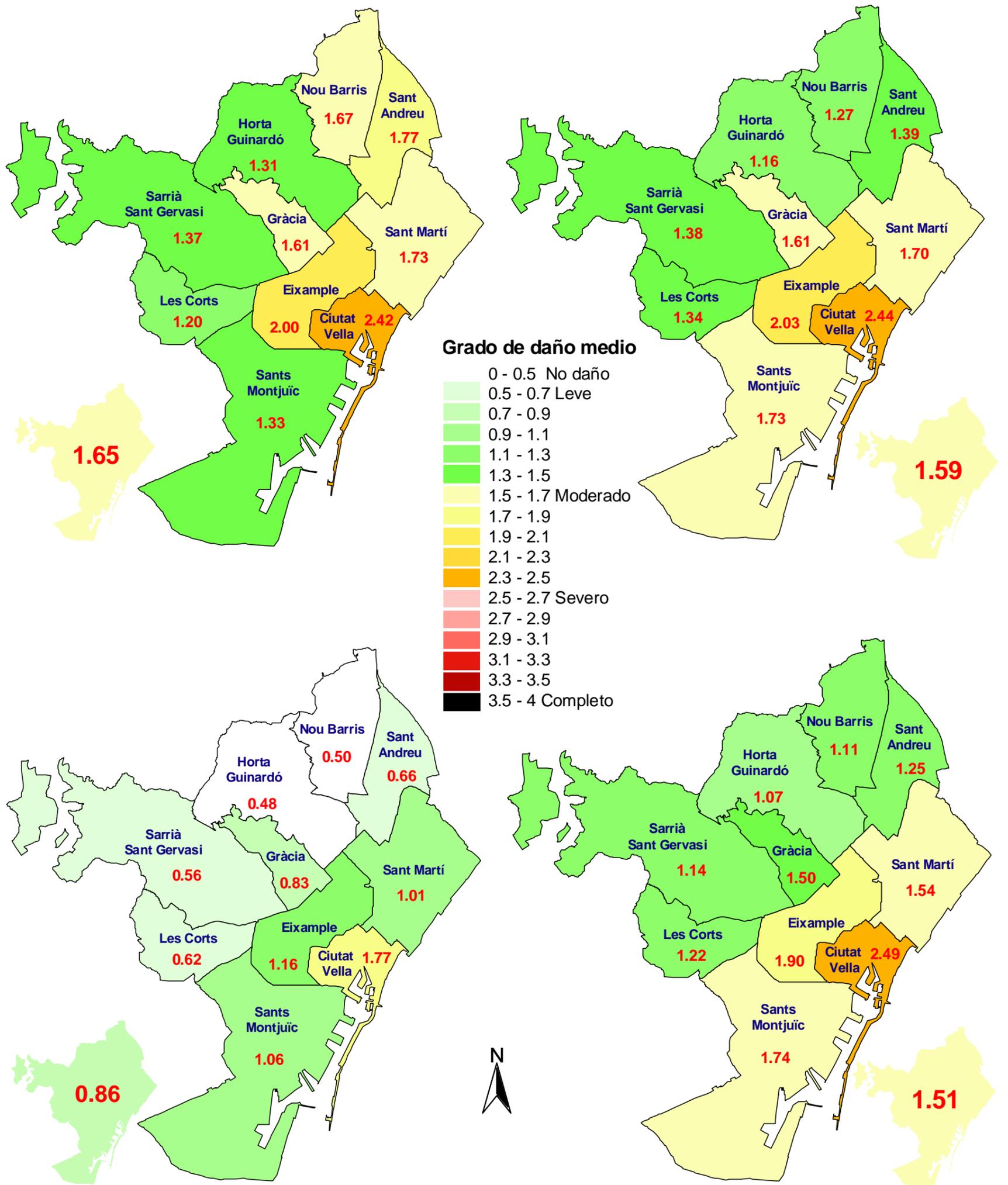


Figura 10.2. Síntesis de resultados del daño esperado para los dos métodos adoptados y escenarios sísmicos considerados. Método del índice de vulnerabilidad (arriba) y método del espectro de capacidad. Escenario determinista (Izquierda) y probabilista. Se dan los valores medios del factor de daño para la ciudad y por distritos.

Obsérvese también en la misma Tabla 10.3 cómo el distrito de *l'Eixample* destaca por ser el que tiene una mayor población y un mayor número de habitantes por km², siendo también el año medio de construcción de sus edificios (1933), el más antiguo después del de *Ciutat Vella* (1896), lo que hace que la vulnerabilidad media de sus edificios (0.884) sea también la segunda más alta de la ciudad. *Les Corts* es el distrito con menos población y con menos edificios, y *Sarrià-Sant Gervasi* el que tiene la densidad de población más baja. *Sants-Montjuïc* es el más extenso y *Horta-Guinardó* el que tiene un mayor número de edificios.

Víctimas, coste y volumen de escombros

Es importante considerar de forma conjunta los datos y cifras de la Tabla 10.2, (mostrados en la Figura 10.2) y de la Tabla 10.3, ya que la primera sin la segunda puede inducir a conclusiones sesgadas. El análisis conjunto de ambas nos va a permitir efectuar una discusión, clara y concisa, del impacto económico de los diferentes escenarios, así como otros aspectos relevantes como, por ejemplo, los efectos sobre la población y el volumen de escombros generados.

La Tabla 10.4 muestra los resultados numéricos referentes al número de personas fallecidas, al número de personas heridas, al número de personas sin hogar, al coste económico y al volumen de escombros para los escenarios menos y más dañinos. El escenario más favorable es el determinista evaluado con el MEC y los más desfavorables el determinista y probabilista, cuando se analizan con el MIV. La Tabla 10.4 resume los números obtenidos para el escenario menos dañino, y el escenario probabilista del MIV, por considerar que la acción sísmica de éste es más consistente con la del primero.

Para ambos escenarios, en todos los parámetros evaluados destaca claramente el *Eixample*. En este distrito emblemático de la ciudad se produce el mayor número de fallecidos, heridos y personas sin hogar y el mayor volumen de pérdidas económicas y de escombros.

En el escenario más favorable el menor número de fallecidos y de personas sin hogar se dan en los distritos de *Sarrià-Sant Gervasi* y *Horta-Guinardo*. En *Sarrià-Sant*

Gervasi probablemente debido a la baja densidad de población y al relativamente bajo nivel de daño esperado; y en *Horta-Guinardó* debido al bajo nivel de daño esperado. El menor número de personas sin hogar, el menor coste económico, el menor volumen de escombros se dan en el distrito de *Les Corts*, probablemente por causa de que se une el hecho de ser el distrito con un menor número de edificios y con un nivel de daño relativamente bajo (véanse Tabla 10.2, Tabla 10.3 y Figura 10.2).

Tabla 10.4. Resumen del impacto de los escenarios sísmicos. Se dan el número de fallecidos, el número de heridos, el número de personas sin hogar, el coste económico y el volumen de escombros para los escenarios menos y más dañino.

DISTRITOS		Escenario Determinista MEC					Escenario Probabilista MIV				
N.	Nombre	F	H _T	NT _{PSH}	T _{COST}	Es	F	H _T	NT _{PSH}	T _{COST}	Es
01	Ciutat Vella	110	333	18896	653	603	466	1384	35328	1443	1497
02	Eixample	249	800	22632	982	927	1339	4169	64612	3032	3405
03	Sants-Montjuïc	169	544	14522	805	864	516	1578	30872	1856	2063
04	Les Corts	69	223	3180	105	116	235	751	7945	280	369
05	Sarrià-Sant Gervasi	13	37	5100	262	234	369	1169	17751	1010	1164
06	Gràcia	38	120	7125	264	242	325	999	21135	797	853
07	Horta-Guinardó	13	37	5727	185	165	241	757	15752	413	472
08	Nou Barris	13	41	6528	146	131	389	1249	17156	374	454
09	Sant Andreu	68	219	5205	159	167	366	1158	17395	501	607
10	Sant Martí	493	1603	19416	591	685	1126	3622	33322	1052	1316
Totales		1235	3957	108331	4152	4134	5372	16836	261268	10758	12200

F: Número de personas fallecidas.
H_T: Número total de heridos.
NT_{PSH}: Número de personas sin hogar.
T_{COST}: Coste en millones de euros.
Es: Volumen de escombros en toneladas.

En el escenario más desfavorable todos los parámetros evaluados favorecen al distrito de *Les Corts*, probablemente debido a la confluencia de factores como menor número de edificios, con un año de construcción relativamente reciente (1954), menor número de habitantes y una vulnerabilidad y grado de daño también relativamente bajos con respecto a los de los otros distritos (véanse la Tabla 10.2, Tabla 10.3 y Figura 10.2).

10.3 Comparación con estudios previos

La comparación de los resultados aquí obtenidos con estudios previos en la ciudad de Barcelona (Caicedo, 1993; Yépez, 1996; Chávez, 1998; Mena, 2002) no es inmediata, debido a diferencias en los métodos empleados, en los datos disponibles y en los escenarios sísmicos analizados. Respecto a los datos, sólo Mena (2002) usó una base de datos comparable, en volumen, a la aquí utilizada aunque la información disponible era menos completa.

Estudios Preliminares

Caicedo (1993) es el primero que aplica el “*método italiano*” tal como fue propuesto por Benedetti y Petrini (1984), a 181 edificios de mampostería del distrito del *Eixample*; el estudio califica su vulnerabilidad y estima el daño esperado para intensidades macrosísmicas MSK-64 entre VI y X. Considerando cinco grados o estados de daño no nulo que denomina como “*ligero*”, “*moderado*”, “*grave*”, “*destrucción*” y “*colapso*”, obtiene que, para una intensidad VII, todos los edificios estudiados sufrirían daños ligeros. Yépez (1996) da continuidad al estudio de Caicedo (1993) y desarrolla funciones semiempíricas de vulnerabilidad-daño para tres tipos de edificios: “*mampostería no reforzada*”, “*hormigón armado con pórticos*” y “*hormigón armado con forjados de losas planas*”, también conocidos como “*forjados reticulares*”. La aplicación se limita a 181 edificios de “*mampostería no reforzada*”, 14 de “*hormigón armado con pórticos*” y 23 de “*hormigón armado con forjados reticulares*”. Para analizar la vulnerabilidad se evalúan parámetros que caracterizan la capacidad resistente de los edificios siguiendo el método italiano. De nuestra experiencia, no es posible correlacionar la vulnerabilidad obtenida mediante este método con la que se obtiene con el MIV ya que la relación vulnerabilidad-daño es diferente para cada tipología y los índices de vulnerabilidad no son homogéneos. Tampoco es directamente comparable el daño, ya que dichos autores usan un índice de daño cuyo sentido es diferente respecto del que aquí se usa. Así pues, tanto los estudios de Yépez (1996) como el de Mena (2002) solo son comparables con nuestros resultados de forma cualitativa. Según

Yépez (1996), el 54.5% de los edificios de mampostería y el 39% de los de hormigón, presentan una vulnerabilidad considerada como media-alta. El daño esperado es mayor que el estimado por Caicedo (1993), ya que para una intensidad VII, más del 2% de los edificios analizados alcanzaría el grado de daño *grave* y el 11% el grado de daño *moderado*. Por lo tanto, teniendo en cuenta las diferencias metodológicas y los datos empleados, podemos concluir que los resultados de Yépez (1996) son compatibles con los aquí hallados.

Estudio del ITEC (1997)

Mañà (1997), por encargo expreso del Ayuntamiento de Barcelona a l'*Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya* (ITEC), efectúa una estimación del daño sísmico esperado en algunos distritos y barrios de la ciudad. El estudio se basa en la escala MSK-64, que se adapta a los edificios típicos de Barcelona mediante el juicio experto. Los grados de daño utilizados en este estudio son: "*efectos inapreciables*", "*daños ligeros*", "*daños moderados*" y "*daños graves*" e incluyen un grado o tipo de daño específico que se define como "*daños graves en fachadas*". El estudio analiza zonas muy locales de la ciudad, de forma que sólo pueden efectuarse comparaciones con los resultados obtenidos en los distritos de *Ciutat Vella* y de *l'Eixample*. Concretamente, en el distrito de *l'Eixample*, para una intensidad entre VI y VII (6.5) el estudio establece que un 6.5% de los edificios obtendrían "*daños graves*", el 16.5% "*daños moderados*", el 28% "*daños ligeros*" y el 49% "*efectos inapreciables*". En el caso de *Ciutat Vella* los daños esperados serían el 2.5% "*daños graves*", el 27.3% "*daños moderados*", el 43.05% "*daños ligeros*" y el 27.15% "*efectos inapreciables*". Es interesante destacar como este estudio, en el que se involucraron arquitectos, profundos conocedores de los edificios, detalles y prácticas constructivas en la ciudad, puso de manifiesto el mal comportamiento sísmico de sus edificios, lo que concuerda con la alta vulnerabilidad aquí estimada.

El trabajo de Chávez (1998)

Pero el primer estudio global del daño esperado en la ciudad, es el de Chávez (1998), quien, con el objetivo de estimar la vulnerabilidad y daño sísmico esperados en Cataluña, usa los datos del daño causado en Italia por el terremoto de Irpinia de 1980 para desarrollar matrices de probabilidad de daño para las clases de vulnerabilidad establecidas en la escala EMS-98. Los edificios de Cataluña se clasifican en base a la opinión experta de arquitectos con experiencia en los hábitos constructivos en la región y en datos sobre su antigüedad, altura y situación rural o urbana. Por lo que aquí concierne obtiene escenarios específicos para la ciudad de Barcelona. La Tabla 10.5 muestra la distribución de los edificios de Barcelona, por distrito, de acuerdo a las clases de vulnerabilidad previstas en la escala EMS-98.

Tabla 10.5. Distribución (%) de los edificios de Barcelona, por distritos, de acuerdo a las clases de vulnerabilidad de la escala macrosísmica europea EMS-98 (Chávez 1998; véase también Mena, 2002).

CLASE	DISTRITOS DE BARCELONA										TOTAL CIUDAD
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	
A	29.86	28.16	19.57	13.78	15.86	18.11	11.80	10.99	15.08	17.10	18.03
B	66.47	59.51	63.87	54.09	57.56	61.83	57.09	56.08	64.17	64.43	60.52
C	3.31	11.55	15.47	29.65	24.53	18.63	29.33	31.31	19.40	17.46	20.06
D	0.36	0.78	1.09	2.48	2.05	1.43	1.78	1.62	1.35	1.01	1.39
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Se observa como la mayoría de los edificios de la ciudad se tipifican en grupos de vulnerabilidad alta o muy alta. En efecto, casi el 80% de los edificios de la ciudad se consideran de tipo A (18.03%) o de tipo B (60.52%); el resto de los edificios se tipifican como de clase C (el 20.06%) y de clase D (1.39%). Se observa, también en la Tabla 10.5, cómo el distrito más vulnerable es el de *Ciutat Vella* (01) y los menos vulnerables son los de *Les Corts* (04), *Sarrià-Sant Gervasi* (05) y *Horta-Guinardó* (07) donde se dan los mayores porcentajes de edificios de las clases C y D. La Tabla 10.6 muestra los valores del índice de vulnerabilidad posibles para las clases de vulnerabilidad EMS-98. Se observa como la distribución de edificios de la ciudad, de acuerdo a Chávez (1998), prevé que aproximadamente el 90% de los edificios de la

ciudad presentaría índices probables de vulnerabilidad con valores de entre el 54 y el 94% pero con índices también posibles en el rango entre 46 y 102%. Estos rangos de los índices corresponden a las clases de vulnerabilidad A, B y C. Los pocos de tipo D (1.39%) pueden aportar índices típicos entre el 38 y 46 %.

Tabla 10.6. Índices plausibles, probables y posibles para las clases de vulnerabilidad de la Escala EMS-98 (Giovinazzi, 2004)

Índices de clase y rangos de pertenencia	Clases de vulnerabilidad en la escala EMS-98					
	A	B	C	D	E	F
V^{\min} (%)	78	62	46	30	14	-2
V^- (%)	86	70	54	38	22	6
V_0 (%)	90	74	58	42	26	10
V^+ (%)	94	78	62	46	30	14
V^{\max} (%)	102	86	70	54	38	22

La distribución de edificios efectuada por Chávez (1998) muestra un excelente grado de acuerdo con este trabajo. En efecto, en el presente estudio, el índice de vulnerabilidad medio de los edificios de mampostería es de 87 %, con unos índices que van desde el 70% hasta valores cercanos al 100%. Los índices correspondientes a los edificios de hormigón armado se hallan en el rango entre el 40 y el 85%, con un valor medio del 65 %.

Por otra parte, la Tabla 10.7 muestra el daño esperado en la ciudad para un sismo de intensidad VII, según Chávez (1998). El daño esperado en los diferentes distritos, es coherente con la vulnerabilidad correspondiente, pero las diferencias en los escenarios considerados complican una comparación directa con los niveles de daño establecidos en el Capítulo 8. El mayor nivel de daño se espera en el distrito de *Ciutat Vella* (01) y los menores en los barrios más periféricos de *Les Corts* (04) *Sarrià-Sant Gervasi* (05), *Horta-Guinardó* (07) y *Nou Barris* (08). Con todo, teniendo en cuenta las diferencias metodológicas y de escenarios, los resultados de Chávez (1998) muestran un alto nivel de consistencia con los escenarios de daño aquí obtenidos.

Tabla 10.7. Distribución del daño sísmico en las edificaciones de Barcelona para un terremoto de intensidad VII en la escala EMS-98 (Chávez, 1998). La última fila contiene el grado de daño medio o grado de daño más probable considerando 5 grados de daño diferentes del nulo.

NIVEL DE DAÑO	DISTRITOS										TOTAL CIUDAD
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	
0	17.98	20.30	22.47	27.16	25.49	23.55	27.01	27.50	24.07	23.22	23.87
1	34.78	35.00	36.04	36.71	36.46	36.20	37.02	37.15	36.59	36.36	36.23
2	29.62	28.24	27.06	24.33	25.31	26.44	24.43	24.14	26.15	26.65	26.24
3	13.78	12.88	11.48	9.51	10.21	11.01	9.35	9.12	10.59	11.03	10.90
4	3.48	3.24	2.70	2.10	2.32	2.56	2.01	1.94	2.38	2.52	2.53
5	0.36	0.34	0.27	0.19	0.21	0.24	0.17	0.17	0.21	0.24	0.24
d*	1.51	1.45	1.37	1.23	1.28	1.34	1.22	1.21	1.31	1.34	1.33

Ello pone de manifiesto cómo, dependiendo de los objetivos del estudio y del nivel de detalle que se requiera, pueden usarse métodos simplificados obteniendo resultados robustos, si se interpretan de forma global y probabilista.

El estudio de Mena (2002)

Mena (2002) dispone ya de una base de datos que cubre todos los distritos de la ciudad y aplica el método italiano, tal como fue adaptado por Yépez (1996), para estimar la vulnerabilidad y el daño físico directo esperado para escenarios sísmicos definidos mediante la intensidad macrosísmica. Respecto a la vulnerabilidad, las diferencias en los conceptos del índice de vulnerabilidad y en los procedimientos para su obtención dificultan y desaconsejan cualquier comparación cuantitativa. A nivel cualitativo Mena (2002) concluye que la vulnerabilidad de los edificios de Barcelona es entre mediana y alta, lo que es consistente con los resultados aquí encontrados. Respecto al daño, Mena (2002) analiza escenarios para intensidades VI, VII, VIII y IX, concluyendo que el distrito más castigado por un terremoto sería *Ciutat Vella* y el distrito con menos daño esperado en caso de terremoto sería *Les Corts*, mostrando un buen acuerdo con los resultados de este trabajo. Ni las funciones de daño ni los estados de daño considerados por Mena corresponden a los aquí utilizados. Mena (2002) define hasta seis estados de daño para los que usa un índice

central de daño que toma valores de 1.25, 5, 18, 22.5, 45 y 80 en una escala de 0 a 100. Para poder comparar con nuestro factor de daño medio, se ha procedido de la siguiente forma: se han sumado los productos de estos índices centrales de daño por las probabilidades de ocurrencia del estado de daño correspondientes y el resultado obtenido se ha dividido por 100 y se ha multiplicado por 5. De esta forma se llega a un índice entre 0 y 5 que puede ser comparable con el factor o grado de daño medio aquí utilizado. Pues bien, para intensidades VII y VIII y para *Ciutat Vella* se han obtenido respectivamente valores de 1.41 y 2.4 mientras que para *Les Corts* se obtiene 1.10 y 2.10. Los índices de daño medio en este estudio para *Ciutat Vella* varían entre 1.77 y 2.51 mientras que para *Les Corts* se obtienen valores entre 0.63 y 1.20. De forma que, a pesar de las diferencias en los métodos, en la calidad de los datos, en los escenarios y en la consideración de los estados e índices de daño, se observa una consistencia razonable de los resultados obtenidos por Mena (2002); aunque, a nuestro entender, Mena (2002) carece de la capacidad de resolución y de la riqueza de los resultados aquí obtenidos.

10.4 Conclusiones

De forma análoga al apartado anterior, se describen a continuación las principales conclusiones referentes a los métodos, a los datos, al uso de Sistemas de Información Geográfica y a los resultados.

10.4.1 Los métodos

Básicamente se han usado dos métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico, métodos que se han denominado MIV y MEC, Método del Índice de Vulnerabilidad y Método del Espectro de Capacidad respectivamente.

Las principales conclusiones sobre el MIV son:

- Requiere poca información sobre la acción sísmica, que se define mediante la intensidad macrosísmica.

- El edificio se define mediante un sólo índice cuya determinación no requiere de un gran detalle de información sobre las características estructurales.
- La incorporación de modificadores a los índices de clase permite muestrear bien las características geométricas, estructurales y de situación de los edificios.
- La caracterización del daño mediante estados discretos y el uso de funciones de distribución de probabilidad, que se definen mediante un sólo parámetro, permite representar bien tanto el nivel de daño esperado como las probabilidades de los diferentes estados.
- La función que relaciona el daño esperado con la intensidad macrosísmica y el índice de vulnerabilidad es sencilla y de fácil aplicación.
- Por consiguiente, es un método robusto, versátil y fácil de aplicar a grandes ciudades.

Las principales conclusiones sobre el MEC son:

- La definición de la acción sísmica es más sofisticada ya que se define en términos de espectros de respuesta. Por consiguiente su definición es más fina pero requiere una buena infraestructura de datos de aceleración.
- La definición del edificio se efectúa en términos de espectros de capacidad y, por lo tanto, requiere también información detallada de su estructura y arquitectura y su obtención precisa de análisis estructurales no lineales.
- Tanto la acción sísmica como el edificio se definen de forma más realista y completa pero la complejidad de los entornos urbanos obliga a efectuar simplificaciones importantes.
- La agrupación de los estados de daño *extensivo* y *completo* del MIV en un solo estado de daño *completo*, puede inducir a interpretaciones sesgadas, si no se es cuidadoso.

- La evaluación del daño esperado, también presenta una mayor complejidad ya que, para cada escenario y para cada edificio, requiere conocer las curvas de fragilidad y obtener el punto de desempeño.
- Se trata de un método más adecuado a los avances de la ingeniería sísmica y, por consiguiente, con una mayor proyección de futuro, pero su aplicación masiva a grandes ciudades obliga a simplificaciones drásticas que tienden a suavizar los resultados y a filtrar las características de los edificios individuales.

10.4.2 Los datos

Este estudio no habría sido posible sin una serie de trabajos previos que han permitido disponer de una importante información sobre la acción sísmica y sobre los edificios. Se resumen a continuación las principales conclusiones sobre este aspecto.

- El estudio y análisis de la sismicidad histórica, del periodo instrumental y la vigilancia sísmica continuada son condiciones “*sine qua non*”, para poder llevar a término estudios creíbles de riesgo sísmico.
- Igualmente imprescindible es la realización de estudios de microzonificación sísmica de los suelos de las grandes ciudades. Sin ellos no es posible incorporar, de forma adecuada, fenómenos de amplificación de la acción sísmica.
- La mayor complejidad de los estudios de riesgo sísmico en grandes aglomeraciones es el conocimiento detallado y fiable de las características estructurales, arquitectónicas, geométricas y de posición de los edificios. La base de datos utilizada en este trabajo ha demostrado ser suficiente para alcanzar unos resultados con una gran resolución.
- La base de datos usada en esta tesis está actualizada a 1996 y contiene el 93.4 % de los edificios de viviendas del censo de edificios del 2001. Teniendo en cuenta el dinamismo del sector de la construcción y las posibles diferencias en los criterios de contabilización de los inmuebles, se concluye

que nuestra base de datos tiene una muy alta calidad, fiabilidad y representatividad.

10.4.3 El Sistema de Información Geográfica

El manejo adecuado de más de 70000 parcelas, cada una con sus características catastrales, geométricas y otras referentes al suelo, al edificio y a la acción sísmica esperada, hace imprescindible el uso de sistemas avanzados de información geográfica. Se describen a continuación las conclusiones más relevantes respecto a herramienta GIS diseñada y utilizada en este trabajo.

- Los Sistemas de Información Geográfica son imprescindibles para depurar, homogeneizar y georreferenciar las bases de datos disponibles.
- El análisis de riesgo en una gran ciudad requiere la creación de una herramienta GIS específica y “*a medida*”.
- Para la obtención de algunos de los modificadores del índice de vulnerabilidad en el MIV, es indispensable emplear este tipo de programas, ya que muchos de estos modificadores dependen de propiedades geométricas de las manzanas, parcelas y subparcelas y de relaciones topológicas entre estas entidades geográficas.
- El Sistema de Información Geográfica implementado ha sido de gran utilidad a la hora de obtener los escenarios con distintos niveles de resolución. Permitiendo de esta manera realizar la evaluación del riesgo con el máximo detalle, a nivel de edificio, y mostrar también los resultados de forma agrupada, según las diferentes zonas administrativas de la ciudad.
- La herramienta GIS desarrollada en este trabajo ha demostrado ser adecuada y eficiente, permitiendo obtener escenarios sísmicos y de riesgo sísmico “*a la carta*”. A su vez, es la única forma de mantener actualizado el estudio del riesgo, debido a los continuos cambios que se producen en las zonas urbanas, relacionados con las edificaciones, población, infraestructuras y costes.

10.4.4 Los resultados

La disponibilidad de métodos avanzados de análisis de daño y riesgo sísmicos, la existencia de estudios recientes de peligrosidad sísmica y microzonificación de suelos en Barcelona y la recopilación, depurado y adaptación de una completa y fiable base de datos sobre los edificios de viviendas de la ciudad y su integración y tratamiento mediante un GIS han permitido obtener y contrastar diferentes escenarios de riesgo sísmico con diferentes métodos. Se resumen a continuación las conclusiones más relevantes sobre los resultados obtenidos.

- La vulnerabilidad de los edificios de Barcelona es entre moderada y alta.
- El daño esperado para los escenarios y métodos ensayados es consistente.
- El MIV permite afinar más en la definición del edificio. En este sentido, los escenarios de riesgo obtenidos, mediante este método, captan mejor las características geométricas y de situación de los edificios, por lo que muestran una mayor resolución.
- El MEC suaviza la diversidad de edificios mediante sólo seis categorías. Sin embargo, la definición de la acción sísmica es más sofisticada, incorporando las funciones de transferencia de los suelos de la ciudad y los espectros de respuesta de forma que incorpora aspectos referentes al comportamiento estructural.
- En el MEC, los edificios de mampostería altos son los que sufren mayor daño mientras que los bajos sufren menos daño que los edificios de hormigón armado de la misma clase. Con todo, los edificios de hormigón clasificados como bajos son edificios de entre uno y tres pisos mientras que los de mampostería son de uno o dos pisos.
- Las diferencias en la forma de definir la acción sísmica y el edificio en ambas metodologías complica la comparación de los resultados, aunque muestran un razonable nivel de consistencia.

- Los modelos de evaluación de otros daños en la población y del coste económico usan la probabilidad del estado de daño de *colapso*. Como se ha apuntado más arriba, la inclusión de los estados de daño *extensivo* y *completo* del MIV en el estado de daño *completo* del MEC y la forma como se definen las curvas de fragilidad en el MEC, puede inducir a valoraciones sesgadas de estos números. En nuestro caso, los números de víctimas mortales, heridos, personas sin hogar y volumen de escombros pueden ser conservadores.
- No forma parte de los objetivos de este estudio efectuar un análisis de errores. Tanto la definición de la acción sísmica como la de los edificios tienen importantes incertidumbres. A pesar de la alta consistencia de los resultados obtenidos es conveniente precisar que:
 - Hay que interpretar los resultados desde una óptica probabilista y hay que considerarlos como valores medios.
 - En el caso de los daños a la población y del coste económico hay que interpretar las cifras obtenidas como representativas de su orden de magnitud.

10.5 Líneas de progreso

Este trabajo es un paso más hacia la evaluación del riesgo de la ciudad de Barcelona, pero contiene también importantes aportaciones metodológicas. A partir de la experiencia adquirida en él y a partir de otros trabajos previos o recientes relacionados con la evaluación del riesgo sísmico en entornos urbanos, se exponen a continuación algunas recomendaciones y líneas de investigación abiertas. Estos aspectos de complementación y de progreso se han estructurado, también como en los apartados anteriores, de acuerdo a los métodos, los datos, el GIS y los resultados.

10.5.1 Los métodos

Son múltiples los aspectos de progreso de los métodos aquí empleados. Se destacan sólo algunos de ellos en referencia a la consistencia entre los MIV y MEC y a la incorporación explícita de elementos probabilistas.

Con respecto a la consistencia y calibración de los métodos se propone:

- Desarrollar el MEC de forma que permita incorporar a los espectros de capacidad las características específicas de los edificios particulares, especialmente las que conciernen a su geometría y a su situación en agregados.

En este sentido, el profesor Lagomarsino ha introducido ya mejoras que han sido presentadas en el reciente Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica celebrado en Girona entre los días 8 y 11 de mayo de 2007 (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006; Lagomarsino, 2007). También ha calibrado el MIV, aunque en este caso las diferencias no son relevantes (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006; Bernardini *et al.*, 2007).

- Obtener curvas de fragilidad considerando los mismos estados de daño en el MEC que en el MIV.
- Incorporar el análisis dinámico no lineal tanto en la evaluación de curvas de fragilidad como en la predicción del comportamiento esperado (*performance point*) de los edificios.

Con respecto al enfoque probabilista se proponen algunas recomendaciones respecto a la definición de la acción sísmica y a la definición del edificio.

En cuanto a la acción sísmica:

- Conviene incorporar la incertidumbre tanto en términos macrosísmicos como en términos espectrales.
- Para ello se propone definir funciones de distribución de probabilidad para los parámetros que la definen y efectuar simulación de Monte-Carlo para efectuar tests de sensibilidad.

- Esta aleatoriedad y técnica de simulación se debe incorporar también si se realizan los análisis en términos de análisis dinámico no lineal.

En cuanto a la definición de los edificios:

- Definir los índices de vulnerabilidad mediante funciones de densidad de probabilidad, que permitan también la simulación intensiva Monte-Carlo y la realización de análisis de sensibilidad.
- Procedimientos análogos pueden emplearse en la definición de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

10.5.2 Los datos

Los datos son imprescindibles en todo trabajo científico que se fundamenta en la dialéctica observación, modelización y contraste, calibración y validación del modelo. En este sentido distinguimos también aquí entre los aspectos de modelado y de aplicación.

Con respecto a los modelos y métodos:

- Es conveniente crear y mantener bases de datos que inventarién los tipos de edificios y clasifiquen los daños observados en terremotos. Dada la gran diversidad de tipologías constructivas, esta base de datos podría tomar como referencia, por ejemplo, la iniciativa de la *World Housing Encyclopedia*. Estas bases de datos serían una fuente inestimable para la calibración de los modelos y métodos de análisis de daño.

En cuanto a la aplicación a Barcelona, y a pesar de la alta calidad y fiabilidad de la base de datos aquí utilizada, existen algunos detalles mejorables referentes a la definición de los edificios y a otra información útil de la que no se dispone.

- El edificio se define mediante el concepto de parcela. En algunos casos identificar parcela con edificio resulta ambiguo ya que, dentro de la misma parcela, pueden coexistir diferentes *Unidades Constructivas*, es decir varias edificaciones aisladas cuyo tipo y uso pueden ser diferentes. En estos casos la

interpretación de esta información como edificio no es única y complica el análisis. En este sentido se propone incorporar a las bases de datos la localización geográfica de cada una de las unidades constructivas (UC) dentro de cada parcela. Ello ha de permitir asociar edificio y UC mediante un polígono concreto dentro de cada parcela catastral, desapareciendo las ambigüedades en la definición de sus características tipológicas, estructurales y geométricas.

- Con respecto a otra información útil, es importante incorporar a los protocolos de obtención de información el detalle de su sistema estructural y el nivel de reformas que ha sufrido a lo largo del tiempo.

Con respecto a otra información relacionada con la evaluación de los efectos sobre la población y sobre el funcionamiento de sistema social, económico y cultural se destacan los siguientes aspectos:

- El conocimiento detallado de la superficie destinada a cada uno de los diferentes usos del edificio.
- El censo de edificios debe complementarse con el de población y con un censo de viviendas, estableciendo claramente el número de viviendas de cada edificio y el número de habitantes de cada vivienda.
- Dado el dinamismo y la complejidad económica del sector de la construcción que incluye en sus precios aspectos financieros y especulativos, para una evaluación razonable del coste económico, se echa en falta disponer de valores actualizados del coste económico de reparación y reposición de cada edificio que excluya los aspectos no estrictamente relacionados con el coste físico de estas reparaciones.

Los escenarios aquí desarrollados se refieren a un evento sísmico acaecido durante una jornada laboral, en periodo no vacacional y en horario nocturno. Para analizar la evolución espacio-temporal del riesgo es conveniente tener datos sobre los siguientes aspectos:

- Hábitos y actividades de los habitantes de la ciudad.

- Flujos de población hacia o desde la ciudad en días festivos, periodos vacacionales y en jornadas singulares.

Finalmente se incluyen en los últimos ítems de este subapartado la necesidad de disponer de datos que permitan, entre otros, realizar revisiones y actualizaciones del análisis de riesgo, expandir el estudio a la zona metropolitana de Barcelona, incluir aspectos relacionados con los servicios esenciales y líneas vitales, con el patrimonio cultural y, en general, con la integración de toda esta información orientada hacia la evaluación conjunta y global del riesgo sísmico.

- Los datos disponibles se consideran consistentes con el parque de edificios del año 1996. Es conveniente establecer protocolos de actualización, por ejemplo, coordinados con el censo de edificios. Estos protocolos deberían contener las especificaciones técnicas mínimas requeridas para este tipo de estudios.
- La realidad demográfica y socioeconómica rebasa los límites administrativos y territoriales de los municipios. La existencia de datos fiables, por ejemplo de grandes conurbaciones, permitiría estudios y análisis más realistas y útiles para la predicción, minoración, planificación y gestión de las emergencias.
- La disfunción de los servicios esenciales y líneas vitales son cruciales en el impacto de una crisis sísmica. Los organismos y empresas involucrados en este tipo de instalaciones y servicios deberían establecer protocolos de creación de bases de datos específicas que permitieran una evaluación rápida y fiable del riesgo de interrupción y de su impacto.
- Las ciudades y sociedades modernas son más que edificios, estructuras e infraestructuras. Son sistemas vivos que evolucionan de forma dinámica y compleja. Es preciso establecer protocolos y formatos de bases de datos que permitan cuantificar parámetros clave en el impacto socioeconómico y en el normal funcionamiento y progreso de la sociedad. Sólo así es posible abordar, con éxito, estudios *holísticos* que incorporen, entre otros, el número, cantidad y calidad de servicios y recursos de atención, la capacidad de organización, respuesta y recuperación de las comunidades, la resiliencia social y, en fin, la

capacidad de autoorganización y de adaptación a la evolución de la emergencia.

- Son convenientes bases de datos sobre el estrato social y capacidad económica de las familias. Esta información permitiría establecer procedimientos orientados a la cuantificación de la seguridad financiera de la población y de las instituciones ante este tipo de riesgos.

10.5.3 El Sistema de Información Geográfica

Los SIG o GIS han nacido con vocación de gestión de bases de datos relacionales georreferenciadas pero son aún poco eficientes para incorporar cálculo científico intensivo. En este sentido y en este tipo de aplicaciones complejas, en las que frecuentemente es preciso no solo cartografiar sino también efectuar cálculos sofisticados es necesario recurrir a funciones y programas externos realizados en lenguajes diferentes al del propio GIS. Todo ello va en detrimento de la generación de una herramienta compacta.

Por consiguiente, es conveniente avanzar en la incorporación de herramientas de cálculo científico a los GIS, concretamente los aspectos que hacen referencia a las distribuciones de probabilidad y al análisis 2D de distribuciones espaciotemporales como, por ejemplo, las transformaciones del dominio espacio-tiempo (x,t) al dominio frecuencia-número de onda (F-K).

10.5.4 Los resultados

Se han obtenido escenarios detallados de daño físico directo en los edificios y se han considerado sus efectos en la población, el coste y el volumen de escombros. Sin embargo, se es muy consciente de que las dimensiones de los efectos de grandes terremotos en las grandes ciudades van más allá. En este sentido, la disponibilidad de métodos mejorados, de datos actualizados y adaptados a este tipo de estudios y la evolución de los GIS han de permitir también avances significativos en los

resultados. Se apuntan aquí algunas líneas de progreso que se refieren a la actualización y expansión de los escenarios aquí presentados, a la incorporación de nuevos elementos y a la simulación de emergencias.

Concretamente, respecto la revisión y expansión de los escenarios se propone:

- Expandir los escenarios a la región metropolitana de Barcelona, donde habita más de la mitad de la población de Cataluña.
- Efectuar análisis de la evolución espaciotemporal del riesgo definiendo los escenarios más favorable y más desfavorable. Incorporar a los resultados las consecuencias de otros efectos inducidos.

Con respecto a la incorporación de nuevos elementos se propone:

- Agregar estudios de las líneas vitales y servicios esenciales.
- Promover la colaboración sistemática y orgánica de los gestores de la protección civil y de los servicios esenciales y líneas vitales. En el caso del sistema de salud es crucial la implicación de los gestores de hospitales y de personal médico; en el caso de las líneas vitales es crítica la implicación de empresas y técnicos de los diferentes servicios como por ejemplo, agua, gas, electricidad y comunicaciones.
- Sistematizar y protocolizar la revisión y actualización de estos estudios. Ello permitiría incorporar nueva información, nuevos avances o cambios en la organización administrativa del territorio. En este sentido por ejemplo, el 22 de diciembre de 2006, el Consejo Plenario del Ayuntamiento de Barcelona aprobó una nueva división administrativa de la ciudad substituyendo los 38 barrios actuales por 77 nuevos barrios (Ajuntament, 2007), lo que ya hace conveniente una revisión de este aspecto.

Respecto a la prevención, predicción y gestión de la emergencia es conveniente efectuar simulaciones reales o virtuales de la atención a la emergencia. En este sentido sería conveniente:

- Explotar los datos sobre parques y grandes espacios abiertos con el objetivo de definir zonas de refugio y atención para las personas desalojadas.

- Asignar centros prioritarios de atención sanitaria mediante cálculos de distancia hasta los hospitales más cercanos desde las zonas donde se espera que se produzcan más heridos que necesitarán hospitalización.
- Efectuar un estudio de viabilidad estableciendo el potencial de bloqueo de movilidad producido por los escombros y soluciones alternativas.

10.6 Epílogo

En el siglo XIX desconocíamos las causas de los terremotos y las catástrofes eran aceptadas como inevitables. En el siglo XX aprendimos sobre las causas y los efectos de los terremotos, pero sólo en su segunda mitad aprendimos a diseñar y construir edificios sismorresistentes. Con todo, en el siglo XXI siguen existiendo grandes catástrofes sísmicas golpeando a los pueblos en vías de desarrollo, con pocos recursos y a aquellos que han perdido la memoria y el respeto por estos peligros. Las causas son complejas y trascienden los ámbitos científico y tecnológico. No es nuestro objetivo entrar en su análisis y valoración. Pero la paradoja persiste. ¡Ojala en el actual siglo XXI seamos capaces de conseguir que todas las ciudades de nuestro mundo global sean seguras y resistentes a los terremotos! Este trabajo ha pretendido ser un pequeño esfuerzo en esta dirección.