



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 9

OTROS ASPECTOS DEL RIESGO SÍSMICO

9.1 Introducción

Como se ha ido apuntando a lo largo de esta memoria, el análisis del riesgo sísmico es una tarea multidisciplinar que, además del daño físico directo, abarca otros muchos puntos. Unos, como por ejemplo el impacto de la interrupción o disfunción de los servicios básicos, de los edificios e instalaciones esenciales y las líneas vitales, requieren de información técnica que no siempre es posible obtener, ya que pertenece a compañías privadas que la suelen considerar altamente sensible y muy reservada; Otros están intrínseca y estrechamente ligados al deterioro físico del entorno edificado, y pueden ser abordados complementando la información utilizada para evaluar los escenarios de daño físico directo, con datos sobre la población y sobre las características y el valor de la construcción. En este capítulo se abordan cuatro aspectos que se modelan a partir del daño físico directo. Concretamente se trata de evaluar: a) el número de víctimas, entendiendo víctima en un sentido amplio que

incluye heridos y fallecidos; b) el número de personas que quedan sin hogar (“homeless”); c) el coste económico y d) el volumen de escombros. Estos cuatro importantes aspectos se analizan mediante los dos escenarios sísmicos, el determinista y el probabilista, analizados mediante las dos metodologías utilizadas para evaluar el daño físico directo: el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y el del Espectro de Capacidad (MEC). De esta forma, al igual que en el capítulo anterior, para cada una de las cuestiones estudiadas se dispondrá de cuatro contextos que enriquecerán el análisis, la comparación y la discusión.

La vida es nuestro valor máspreciado y, por consiguiente, la importancia de los efectos a la población es incuestionable. Por otra parte, la evaluación del número de víctimas permite estimar los recursos sanitarios y de asistencia humanitaria que se harán necesarios. El coste económico es fundamental para conocer el impacto financiero de la crisis y su repercusión en la desaceleración del desarrollo y en las tasas de crecimiento de la comunidad. Finalmente el volumen de escombros permite evaluar las acciones de limpieza y recuperación de las calles que, previsiblemente, quedarán intransitables.

Existe un amplio consenso en que, no ya la predicción de estos números sino incluso su estimación después de un sismo catastrófico muestran una alta variabilidad, dependiendo, entre otros factores, del organismo que efectúa la estimación y de la finalidad y uso que se da a estas cifras. Estos factores conducen, frecuentemente, a subestimar o a sobreestimar estos trágicos pero trascendentales números. Por consiguiente, además de las dificultades de calibración que conllevan el alto grado de desconocimiento de lo ocurrido en terremotos pasados, los resultados de los modelos predictivos y, muy particularmente, de sus aplicaciones, pueden ser muy sesgados ya que, además de los factores más arriba apuntados, heredan las incertidumbres de la definición de la acción sísmica, de la vulnerabilidad y fragilidad de las viviendas, de las funciones y matrices de probabilidad de daño, de criterios de valoración de la reparación o restitución de las viviendas dañadas y, finalmente, en el caso de la población, de su distribución en el momento del terremoto. En efecto, existe una notable variación de estos números globales dependiendo de la hora del día, del día de la semana y del mes del año en que se produce el terremoto, debido a la fuerte

movilidad de la población en las ciudades modernas. Martí (1999) analizó este aspecto y puso de manifiesto cómo en Barcelona, el peor escenario se produciría en horario nocturno de un día laborable de los meses entre septiembre y julio. Éste es el caso conservador que se ha utilizado en este capítulo. Por consiguiente, hay que entender los resultados de estas simulaciones como valores orientativos, que dan una información complementaria y fiable del orden de magnitud del impacto de la crisis sísmica. Además, esta información es sumamente útil por su trascendencia e importancia en la prevención, planificación y gestión de una emergencia. Vacareanu *et al.* (2004) discuten los detalles de aplicación y establecen directrices para dimensionar los modelos de estimación de los aspectos tratados en este capítulo.

9.2 Víctimas

Por su importancia, el primer aspecto tratado en este capítulo es la estimación de lesiones producidas por el terremoto en las personas. Entre las personas dañadas, el modelo de lesiones que se presenta a continuación permite diferenciar cuatro categorías de víctimas: 1) heridos leves, 2) heridos que requieren hospitalización, 3) heridos graves y 4) personas fallecidas. Es obvio que los heridos graves, también requieren hospitalización y, muy probablemente, cuidados especiales o intensivos para asegurar su supervivencia.

9.2.1 El modelo

La ocurrencia de víctimas humanas, como consecuencia de la acción de terremotos, está directamente relacionada con el daño físico sufrido por los edificios en los que reside la población. Por lo tanto, los datos básicos para su estimación, son las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño y la densidad y distribución de la población en el instante en que ocurre el terremoto. Es muy importante saber el número de personas que hay en cada edificio afectado, lo que a su vez depende del número de habitantes y del número de viviendas. Detalles sobre la distribución de

víctimas en función del tipo de edificio, del tipo de terremoto y del momento en que éste ocurre pueden seguirse en Vacareanu *et al.* (2004).

Dado un tipo de edificios y una categoría de personas dañadas, Coburn y Spence (1992) modelan el correspondiente número K_S de víctimas como:

$$K_S = C \cdot [M1 \cdot M2 \cdot M3 \cdot (M4 + M5 \cdot (1 - M4))] \quad [9.1]$$

donde C es el número de edificios colapsados y se obtiene multiplicando el número de edificios de la clase considerada por la correspondiente probabilidad de colapso. Para cada edificio, $M1$ es el número de personas que en él residen, $M2$ es el porcentaje de ocupación y $M3$ es el porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapados por su colapso. De esta forma el producto $M1 \cdot M2 \cdot M3$ es el número de personas que el terremoto ha dejado atrapadas dentro del edificio dañado. Finalmente, $M4$ y $M5$ son los parámetros que permiten estimar la distribución de los diferentes tipos de víctimas. Concretamente, para cada tipo de víctimas, $M4$ da el porcentaje de las personas atrapadas que sufrirán este tipo de daño. $M5$ sólo toma valores distintos de cero en el caso del número de fallecidos; en este caso, $M4$ representa el número de fallecidos causados directamente por el colapso del edificio y $M5$ representa la mortalidad post-terremoto. Para entender mejor la ecuación [9.1] consideremos un sencillo ejemplo. Sea un edificio que colapsa, en el que viven 100 ($M1$) personas y que en el momento del colapso estaba ocupado al 80% ($M2$) de las cuales quedan atrapadas el 20% ($M3$). Es decir el producto $M1 \cdot M2 \cdot M3$ vale 16 y representa el número de personas que no han podido abandonar el edificio. Consideremos que $M4$ arroja los valores del 30%, 25%, 20% y 25% respectivamente para heridos leves, heridos que requieren hospitalización, heridos graves y fallecimientos directos, lo que arroja unos números de 4.8 heridos leves, 4 heridos que requieren hospitalización, 3.2 heridos graves y 4 fallecidos. El modelo supone que estas cuatro clases de víctimas representan el 100% de las personas atrapadas. Finalmente se sabe que la mortalidad post-colapso entre las personas atrapadas que se encuentran con vida (16-4) es del 30% ($M5$); es decir 3.6 fallecidos como consecuencia de las heridas sufridas y/o de la lentitud de los servicios de rescate. El

número total de fallecidos será por tanto, de 7.6 (4+3.6), que coincide con $16 \cdot (25\% + 30\% \cdot (1 - 25\%))$.

Tabla 9.1. Ejemplo de aplicación de la ecuación [9.1], para el cálculo del número de personas atrapadas en un edificio de 100 inquilinos (M1).

Parámetro	Valor (%)	Cálculo número de personas	
M1: número de inquilinos censados	100	Inquilinos =	100
M2: ratio de ocupación en el momento del terremoto	80	Ocupantes al ocurrir el terremoto (80% de 100) =	80
M3: ratio de atrapados	20	Atrapados (20% de 80) =	16
M1·M2·M3: número de atrapados	16	Atrapados (16% de 100) =	16

Tabla 9.2. Ejemplo de aplicación de la ecuación [9.1], para el cálculo del número de víctimas de cada tipo*.

Caso	Parámetros ó porcentaje	Nº de víctimas		
Heridos leves que no requieren hospitalización	M4=30% M5=0	30% de 16=	4.8	
Heridos que requieren hospitalización	M4=25% M5=0	25% de 16=	4.0	
Heridos graves, que necesitan atención médica inmediata	M4=20% M5=0	20% de 16=	3.2	
Fallecidos	Directos	M4=25%	25% de 16=	4.0
	Post-terremoto	(M5=30%)(1-M4)	30% de (16-4)=	3.6
	Total	M4+M5 (1-M4)	4 + 3.6=	7.6

* Los porcentajes se aplican sobre el nº de personas atrapadas en el edificio, 16 (según la Tabla 9.1)

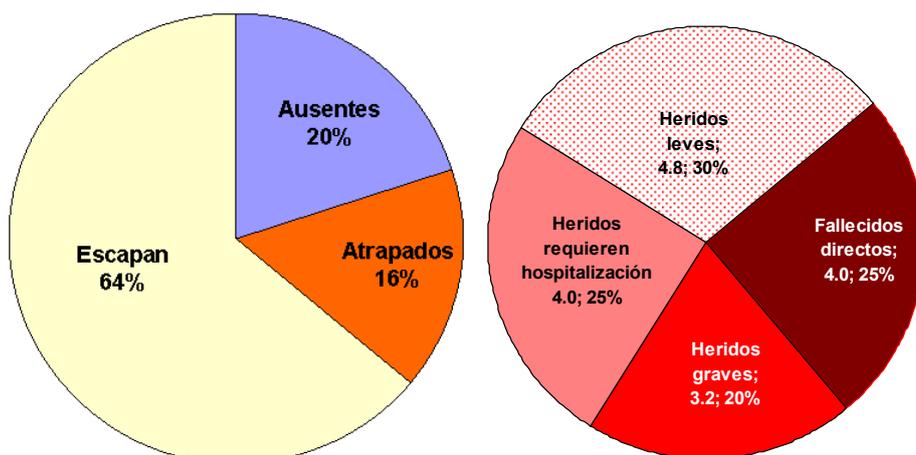


Figura 9.1. Ilustración del modelo de víctimas. Izquierda: distribución de los inquilinos de un edificio. Derecha: distribución de los inquilinos atrapados según las categorías de “heridos leves”, “heridos requieren hospitalización”, “heridos graves” y “fallecidos directos” (véase también Tabla 9.1, Tabla 9.2 y explicación en el texto). Los valores adoptados son sólo ilustrativos y arbitrarios y no responden a la realidad.

Se mantienen los números decimales para hacer énfasis en el sentido probabilista del modelo. Se trata de probabilidades o tasas de ocurrencia. La Figura 9.1 detalla la distribución de los inquilinos del edificio en el momento de ocurrir el sismo y la distribución de los inquilinos atrapados según las categorías de “heridos leves”, “heridos que requieren hospitalización”, “heridos graves” y “fallecidos directos” o inmediatos a causa del colapso, de acuerdo a los valores del parámetro M4 de la Tabla 9.1. La tasa de fallecidos con posterioridad al terremoto puede incluir personas de cualquiera de las tres primeras categorías anteriores, por lo que la intersección entre estas clases no suele ser disjunta y el cardinal de su unión no es igual al número de personas atrapadas en el edificio.

9.2.2 Escenarios

El mayor o menor acierto de la predicción de víctimas reside en el mayor o menor acierto en la calibración de los parámetros del modelo definido por la ecuación [9.1]. Se comenta a continuación los criterios y valores adoptados para generar escenarios razonables de víctimas.

El número de víctimas esperadas está fuertemente correlacionado con la densidad de población y el área edificada. En la estimación del número de personas afectadas o número de víctimas es crucial el parámetro MI , es decir, el número de personas que habitan en cada edificio. En las ciudades europeas, para un edificio de vivienda unifamiliar de una sola planta, este número está entre 2 y 3. Una estimación de este número en grandes ciudades requiere conocer, para cada zona de estudio, el número de habitantes, el número de edificios y el número de viviendas y personas en cada edificio. Estos valores permiten efectuar una estimación razonable de este parámetro para la obtención de los escenarios de personas afectadas. Frecuentemente suele darse el parámetro MI en términos de densidad de inquilinos por m^2 de vivienda edificada. Una vez conocida la superficie destinada a vivienda de un edificio, esta densidad permite conocer el número de vecinos del edificio.

En el caso que nos ocupa necesitamos aplicar el modelo de forma masiva a una gran población de edificios y personas. Para ello se ha utilizado una forma simplificada de estimación de este número crítico. La Tabla 9.3 muestra el número de edificios de la ciudad de Barcelona, la superficie dedicada a viviendas y el número medio de plantas para los inmuebles de mampostería y de hormigón armado. Se observa cómo, aproximadamente, las casas de mampostería son 4 veces más numerosas que las de hormigón, pero tienen la mitad de altura y, en su conjunto, una superficie total edificada muy similar a las de hormigón, indicando claramente que en los edificios de hormigón hay más viviendas que en los de mampostería.

Tabla 9.3. Número de edificios de viviendas, superficie construida y altura media (en número de plantas) en Barcelona.

	Mampostería	Hormigón armado
Número de edificios	52847	14375
Superficie construida (*) (en millones de m^2)	41.49	39.63
Número medio de plantas	3.99	6.92

(*) La superficie edificada se refiere a la superficie total destinada a viviendas (eventualmente esta área puede incluir otros usos además del de vivienda). Concretamente, para un edificio o bloque de pisos es la suma de la superficie útil de todos los pisos o viviendas.

Este hecho se ha utilizado en la estimación del número MI . Para cada zona de estudio se dispone del número de edificios de cada tipología y el número de habitantes. En base a la información de la Tabla 9.3 se ha ponderado la población residente en los edificios de mampostería y de hormigón armado con una relación del 45% y 55% respectivamente. Es decir, supongamos que en una zona de estudio existen 4000 habitantes que residen en 80 edificios de mampostería y 20 de hormigón armado. La siguiente ecuación define los valores de MI para edificios de hormigón armado y de mampostería:

$$4000 = 0.45M \times 80 + 0.55M \times 20 \quad [9.2]$$

De forma que, en este ejemplo concreto, M da un valor de 85.11 y, en consecuencia, MI vale 38.30 (85.11×0.45) y 46.81 (85.11×0.55) para los edificios de mampostería y hormigón armado respectivamente.

Esta simplificación se ha utilizado para estimar MI para cada una de las zonas de estudio. Por otra parte, la Tabla 9.4 muestra los valores de los otros términos de la ecuación [9.1] adoptados para las tipologías de mampostería y hormigón armado. Estos valores se basan en las recomendaciones de Vacareanu *et al.* (2004), y de Coburn y Spence (1992) y corresponden a un terremoto ocurrido en horario nocturno de un día laborable de invierno, en el que se da la máxima ocupación de los edificios de viviendas. Nótese los diferentes valores de $M4$ en función de la gravedad de los heridos así como el gran potencial dañino de los edificios de hormigón armado.

Tabla 9.4. Valores de los coeficientes de la ecuación [9.1] adoptados en este estudio.

	M2 (%)	M3 (%)	M4 (%)				M5 (%)
			Heridos leves	Heridos que requieren hospitalización	Heridos graves	Fallecidos directos	
Edificios de mampostería	80	5	30	30	25	15	60
Edificios de hormigón armado	80	50	10	40	10	40	90

La Tabla 9.5 resume el número estimado de las cuatro clases de víctimas aquí consideradas para los escenarios determinista y probabilista utilizando los métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y del Espectro de Capacidad (MEC).

Tabla 9.5. Resumen del número de víctimas de la ciudad de Barcelona para los escenarios y métodos considerados en este estudio. MIV indica el Método del Índice de Vulnerabilidad. MEC indica el Método del Espectro de Capacidad.

	Heridos leves	Heridos que requieren hospitalización	Heridos graves	Total Heridos	Total Fallecidos
MIV. Escenario determinista	1581	2057	1272	9710	6510
MIV. Escenario probabilista	1231	1710	1131	4072	5372
MEC. Escenario determinista	219	387	459	1066	1233
MEC. Escenario probabilista	513	1171	705	2394	3695

Puede apreciarse como el escenario determinista obtenido mediante el MIV es el más severo y, por tanto, también el que provoca mayor número de víctimas. La Figura 9.2 muestra la distribución de fallecidos a nivel de zonas de estudio. La Figura 9.3 muestra la distribución de heridos. Se confirma la mayor gravedad del escenario determinista analizado mediante el MIV.

Las Figura 9.2 y Figura 9.3 y la Tabla 9.5 han sido elaboradas utilizando la herramienta GIS implementada en esta tesis.

9.2.3 Discusión

Coburn y Spence (1992; 2002) y Vacareanu *et al.* (2004), ponen de manifiesto la dificultad de calibrar los parámetros de los modelos de víctimas. Los parámetros involucrados están sujetos a una alta variabilidad. Para valorar la fiabilidad de los escenarios obtenidos de personas fallecidas, se ha usado el estudio de Smardjjeva y Badal (2002) en el que analizan el número de víctimas producidas por seísmos, investigando una extensa base de datos de terremotos pasados.

Una estimación simplificada y rápida del número de fallecidos esperado es de 2562. Este número se obtiene utilizando los siguientes valores de los parámetros de la ecuación [9.1]:

- $C=75900 \times 0.079=5996$; 75900 es un valor ligeramente sobreestimado del número de edificios residenciales de la ciudad y 0.079 es la probabilidad del estado de daño completo para edificios de mampostería de altura media situados en un suelo blando (tipo I) y para el escenario determinista.
- $MI=19.92$ es el número de habitantes por edificio; este número se obtiene suponiendo un promedio de 2.52 personas por vivienda y 600000 viviendas en 75900 edificios, según el censo de edificios y el censo de población y vivienda de 2001 del Instituto de Estadística de Cataluña.
- $M2=65\%$ es la ratio de ocupación en el momento del terremoto, que es inferior a la ratio de ocupación nocturna.
- $M3=5\%$ es un valor que corresponde a edificios de mampostería no reforzada y a una intensidad VII en la escala EMS-98 (Coburn y Spence, 2002).
- $M4=15\%$ es el ratio de personas fallecidas directamente, valor que corresponde al punto medio del rango que, para esta ratio, Coburn y Spence (2002) asignan a edificios de mampostería con un bajo nivel de resistencia sísmica.
- $M5=60\%$ corresponde a la mortalidad posterior producida por edificios de mampostería y a una comunidad con capacidad para organizar tareas de rescate.

Por otra parte, Smardjieva y Badal (2002) modelan el número de fallecidos, N_k , mediante la siguiente ecuación:

$$\log_{10} N_k(D) = a(D) + b(D) \cdot M \quad [9.3]$$

M es la magnitud, a y b son parámetros que dependen de la densidad de población D . La máxima densidad de población considerada en el estudio citado es de 200 personas por km^2 y para este caso $a = -2.09$ y $b = 0.86$. Por lo tanto el número esperado de personas fallecidas durante terremotos de magnitudes 5.5, 6 y 6.5 son, respectivamente, 436, 1175 y 3162.

Teniendo en cuenta la alta densidad media de la ciudad de Barcelona — más de 15000 personas por km^2 — se puede concluir que el valor estimado de 2562 personas fallecidas es un valor razonable, y en consecuencia, los números de la Tabla 9.5 y los escenarios de la Figura 9.2 y Figura 9.3 son razonables y plausibles. A pesar de su amplio margen de dispersión, pueden ser de suma utilidad en la prevención y gestión de catástrofes sísmicas.

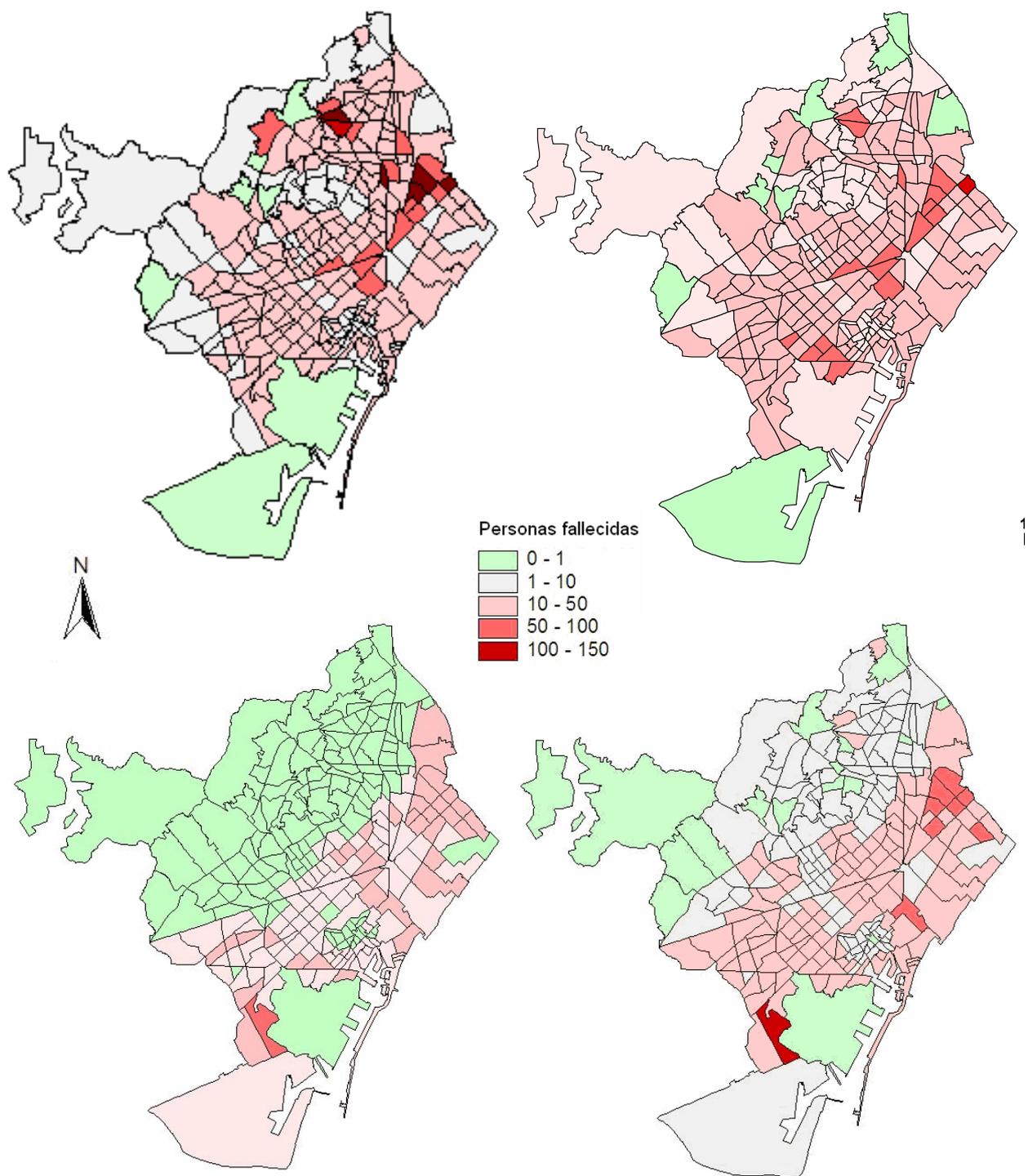


Figura 9.2. Distribución de personas fallecidas estimadas mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo), para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

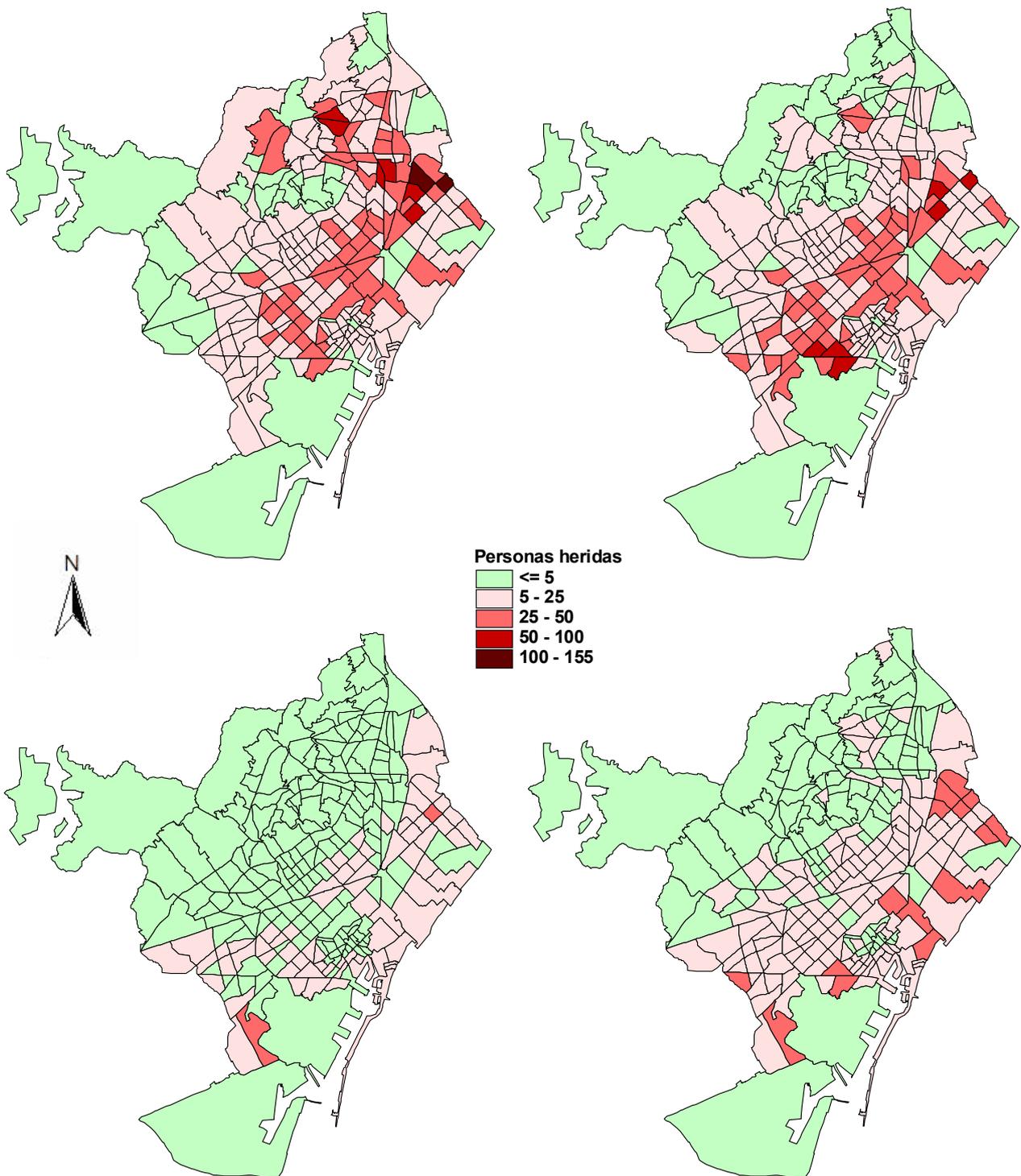


Figura 9.3. Distribución de personas heridas (incluyendo heridos leves, heridos graves y heridos que requieren hospitalización) estimadas mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

9.3 Personas sin hogar

Otro de los aspectos importantes de una catástrofe, además de las personas que pueden resultar muertas o heridas de diversa gravedad, es el número de personas que quedan sin hogar. Este número es una cifra que debe tenerse muy en cuenta a la hora de diseñar estrategias y planes de emergencia, ya que será necesario habilitar espacios para alojarlas durante un determinado período de tiempo. En este apartado se formula un modelo para estimar el número hogares arruinados y el número de personas que no pueden seguir viviendo en ellos. Asimismo se estiman los escenarios determinista y probabilista con los métodos del Índice de Vulnerabilidad y del Espectro de Capacidad.

9.3.1 El modelo

Una vivienda se considera arruinada o inhabitable cuando su nivel de degradación impide su uso normal como hogar. Nuestro modelo considera los grados de daño *severo* y *completo* como estados de daño que incapacitan una vivienda para su uso como tal. Concretamente se considera que el 90% de las viviendas que se hallan en edificios que sufren daño *severo* y el 100% de las que pertenecen a edificios con daño *completo* quedan inhabitables.

El número de personas de un edificio i de la tipología t que quedarían sin hogar ($Npsh_{it}$) se define como:

$$Npsh_{it} = Npv_{it} \cdot Nviv_{it} [0.9P_{it}(severo) + P_{it}(completo)] \quad [9.4]$$

donde Npv_{it} es el número de personas por vivienda en el edificio i de la tipología t , $Nviv_{it}$ es el número de viviendas del edificio y $[0.9 \cdot P_{it}(severo) + P_{it}(completo)]$ define la probabilidad de que las viviendas de este edificio i de la tipología t queden inutilizadas.

Consideremos el sencillo caso de un edificio (i) de determinado tipo (t) que contiene 50 ($N_{viv_{it}}$) viviendas con 2 ($N_{pv_{it}}$) inquilinos en cada una de ellas. Si suponemos que las probabilidades de los estados de daño *severo* [$P_{it}(severo)$] y *completo* [$P_{it}(completo)$] causadas por un terremoto son de 0.1 y 0.05 respectivamente, la probabilidad de que las viviendas de este edificio quede inutilizadas es del 14% ($0.9 \cdot 0.1 + 0.05 = 0.14$). Por lo tanto, en este caso, quedan inutilizados 7 (14% de 50) domicilios, dejando 14 (7×2) personas sin cobijo.

En el caso general de una zona de estudio donde hay Net edificios de cada tipología t y tenemos Nt tipologías, el número de personas sin hogar $NTps_h$ vendrá dado por la integral o suma de la ecuación [9.4] para todas las tipologías y para todos los edificios de cada tipología. Es decir:

$$NTps_h = \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Net} Nps_{h_{it}} = \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Net} Npv_{it} \cdot Nviv_{it} [0.9P_{it}(severo) + P_{it}(completo)] \quad [9.5]$$

El mayor o menor acierto en la predicción de este importante número dependerá de la cantidad de información disponible en cada aplicación y de la habilidad del analista para estimar cada uno de los términos que intervienen en la ecuación [9.5]

9.3.2 Escenarios

De forma análoga al caso de víctimas se han estimado los cuatro casos que resultan de aplicar las metodologías del Índice de Vulnerabilidad y del Espectro de Capacidad a los escenarios determinista y probabilista. Para cada uno de los cuatro escenarios se dispone de las matrices de probabilidad de daño para todos y cada uno de los edificios de la ciudad por lo que las probabilidades de los estados de daño severo y completo se conocen para todos y cada uno de los edificios de la ciudad. Para estimar el número de viviendas de cada edificio y el número de habitantes de cada vivienda se ha utilizado nuestro Sistema de Información Geográfica, el censo de viviendas del año 1996 y el censo de población del mismo año (AjuntamentdeBarcelona, 2004).

De los censos de viviendas y de población, se dispone de la siguiente información a nivel de distrito, barrio y zona de estudio (ZRP): área destinada a viviendas ($Areav$), superficie media por vivienda (Amv), número de viviendas (Nv) y número de personas por vivienda ($Hviv$). Por otra parte, nuestro Sistema de Información Geográfica permite obtener para cada edificio, y por lo tanto para cada zona de estudio, el área edificada o área cubierta total de cada tipología k (Ac_k). Eventualmente esta área puede incluir otros usos además del de vivienda. El estudio se ha efectuado a nivel de zonas de estudio (ZRP) tomando las probabilidades de daño *severo* y *completo* correspondientes¹; el número de habitantes por vivienda (Npv_{it}) se ha considerado constante para todas las topologías, e igual a su valor medio, Npv ; y la suma desde $i=1$ hasta Net de la ecuación [9.5] para todos los edificios de una determinada tipología t se ha efectuado de forma compacta. Así pues, la ecuación [9.5] queda:

$$NSH = Npv \sum_{t=1}^{Nt} Nviv_t [0.9P_t(\textit{severo}) + P_t(\textit{completo})] \quad [9.6]$$

donde sólo queda obtener el número de viviendas de cada tipología ($Nviv_t$). Para ello se reparte el número total de viviendas ($Nviv$) de la zona en una proporción (C_t), definida por la razón entre el área destinada a vivienda construida en edificios de esta tipología ($Areav_t$) y la superficie total destinada a vivienda construida en la zona ($Areav$) es decir:

$$Nviv_t = Nviv \cdot C_t = Nviv \frac{Areav_t}{Areav} \quad [9.7]$$

Como valor de $Nviv$ se ha tomado el número de viviendas principales ocupadas de cada ZRP, correspondientes al Padrón Municipal de Viviendas de 1996 del Instituto de Estadística de Cataluña, proporcionados por el Ayuntamiento de Barcelona. Se

¹ En algunos casos, las zonas de estudio (ZRP) contienen secciones de suelo con diferentes matrices de probabilidad de daño. En estos casos se han usado los valores medios de las probabilidades de los estados de daño severo y completo.

entiende como viviendas ocupadas principales, aquellas viviendas destinadas a ser habitadas por una o diversas personas, excluyendo las que se encuentran desocupadas, y las llamadas secundarias, que sólo se utilizan en períodos estivales, fines de semana o para trabajos temporales. El número total de estas viviendas principales ocupadas para la ciudad de Barcelona es de 577904, lo que indica un alto grado de correlación con las poco más de 578000 (véase Tabla 9.6) obtenidas en el seno del presente estudio mediante la ecuación [9.7].

La Tabla 9.6 y la Tabla 9.7 resumen los resultados obtenidos, el número de viviendas por tipologías, el número de viviendas inutilizadas y el número de personas sin hogar para las tipologías de mampostería y de hormigón armado y para los escenarios determinista y probabilista analizados mediante el MIV y el MEC. En ella se han sumado los valores correspondientes a todas las zonas de estudio (ZRP). Esta evaluación se ha realizado con la herramienta GIS empleada en este estudio.

Tabla 9.6. Número total de viviendas de la ciudad de Barcelona según tipología.

TIPOLOGÍA	VIVIENDAS
Mampostería	267754
Hormigón armado	270001
Otras	40468
Total	578223

Tabla 9.7. Número de viviendas inhabitables y de personas sin hogar por tipologías, y para el escenario determinista y probabilista según el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y el del Espectro de Capacidad (MEC).

	VIVIENDAS NO HABITABLES			PERSONAS SIN HOGAR	
	Mampostería	Hormigón armado	TOTAL	TOTAL	%
MIV. Escenario determinista	86782	22543	109325	275782	18.3
MIV. Escenario probabilista	85357	19212	104569	261268	17.3
MEC. Escenario determinista	34221	9038	43259	108331	7.2
MEC. Escenario probabilista	78375	17471	95846	240313	16.0

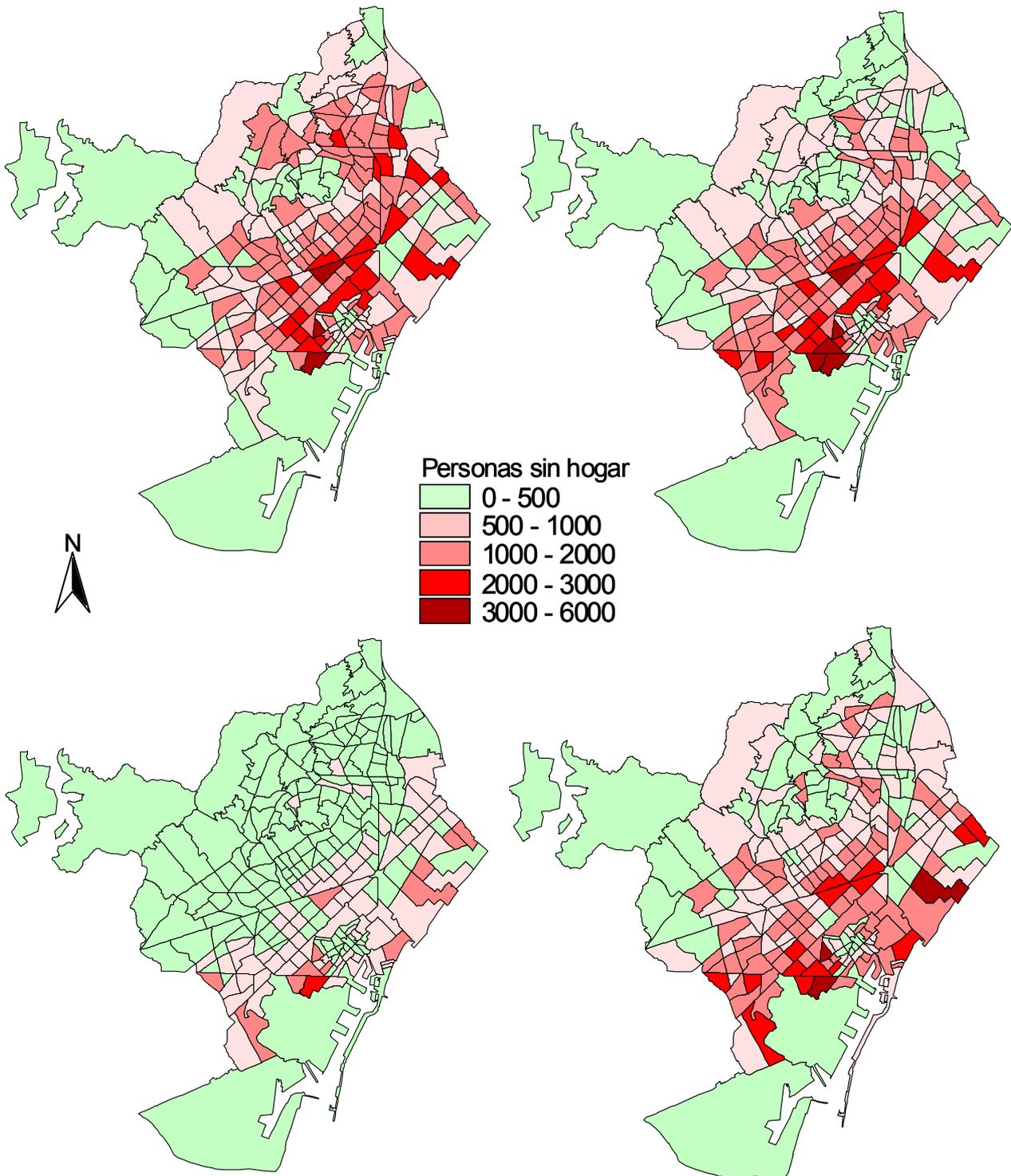


Figura 9.4. Distribución de personas sin hogar (“homeless”) estimadas mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

La Figura 9.4 muestra la distribución de personas sin hogar para los casos de los escenarios determinista y probabilista obtenidos mediante los Métodos del Índice de Vulnerabilidad y del Espectro de Capacidad. Se obtiene una buena correlación con la densidad de población y la vulnerabilidad y fragilidad de los edificios de la ciudad.

9.3.3 Discusión

Se halla un alta consistencia entre el censo de viviendas del año 1996 (Ajuntament de Barcelona, 2004) y el número de viviendas obtenido de acuerdo a las hipótesis simplificadoras para su estimación en este estudio (véase Tabla 9.7). Se pronostica un alto número de viviendas afectadas por los escenarios sísmicos considerados, con una mayor incidencia en los edificios de mampostería, debido a su mayor frecuencia en la ciudad. Esta incapacitación funcional de las viviendas causa que varios centenares de miles de personas se queden sin hogar. El escenario más desfavorable es el determinista cuando se analiza mediante el MIV que deja sin cobijo a 275782 personas, lo que supone el 18% de la población (véase Tabla 9.7). El escenario probabilista proporciona resultados comparables a éste, tanto cuando se analiza mediante el MIV, como cuando se analiza mediante el MEC; respectivamente estos escenarios pronostican que el 17% y el 16% de la población quedará sin hogar. El mayor impacto del escenario determinista en términos de intensidad se debe a la cercanía de la fuente, a los efectos de suelo en zonas cercanas al epicentro y a la mayor habilidad del MIV para considerar las características específicas de fragilidad de cada edificio. Los mapas de distribución de personas sin hogar, en su globalidad, (véase Figura 9.4) responden bien a los patrones de amplificación de los suelos, a los correspondientes al crecimiento histórico de la ciudad y a los de densidad de edificios y población.

9.4 Coste Económico

El coste económico de un desastre es otro de los parámetros de difícil evaluación. Es evidente que el impacto financiero trasciende la reposición de los bienes dañados e incluye la repercusión en la actividad productiva, en la recuperación de funcionamiento de empresas e instituciones financieras y en el restablecimiento de las tasas de crecimiento económico anteriores a la crisis. Por otra parte, a pesar de existir tarifas que las compañías de seguros establecen como compensación por daños físicos en las personas, incluida la muerte, resulta poco adecuado valorar el coste económico de la recuperación de los heridos y, sobre todo, de los fallecimientos. Sin embargo, existe un amplio consenso en que la dimensión de una catástrofe está directamente relacionada con su coste económico. En este apartado se hace una aproximación a la estimación pecuniaria. La aproximación cuantitativa evalúa sólo el coste de restitución de los edificios dañados incluyendo el continente y el contenido.

Incluso esta simplificación drástica en la evaluación del valor monetario de cada escenario sísmico no está exenta de dificultad, ya que se fundamenta en el coste de reposición. La construcción en España es un sector económico muy dinámico que hace que el precio de los edificios y viviendas incrementen considerablemente su precio cada año. Por ejemplo, en el año 2003 los precios de las viviendas se incrementaron aproximadamente un 17% en Barcelona, y según los datos presentados en noviembre de 2006 por el presidente del Patronato Municipal de la Vivienda de Barcelona, Eugeni Forradellas, tan sólo en los seis primeros meses del año, el incremento del precio medio de la obra nueva fue del 15.2% respecto al semestre anterior.

Convenimos que en la evaluación de costes, en caso de terremoto, hay que alejarse de los precios brutales de la compra-venta de viviendas que incluyen el precio del suelo, enormes beneficios para las empresas constructoras o intermediarias y la esperanza, por parte del comprador, de una alta rentabilidad de la inversión efectuada. Debemos situarnos cerca de los costes reales de materiales y mano de obra

necesarios para restituir el bien dañado. Para ello se ha considerado como un valor razonable el de 722.82 €/m^2 . Esta cantidad se ha tomado de los precios oficiales de construcción (2005) de un edificio de clase media, edificado con hormigón armado con forjados reticulares y destinado a uso residencial. Con todo se ha considerado oportuno construir también escenarios relativos en términos del área destruida. El paso a términos absolutos depende sólo de fijar este precio del m^2 construido o rehabilitado. De forma análoga a los apartados anteriores de este capítulo se formula primero el modelo de evaluación económica para posteriormente construir y analizar los escenarios.

9.4.1 El modelo

El coste de rehabilitación de los edificios dañados depende de su nivel de degradación. Por lo tanto, todos los grados o estados de daño, diferentes del grado de daño nulo, contribuyen, en mayor o menor medida a degradar el edificio y por lo tanto comportan una pérdida económica. Así pues, para un edificio (j) del tipo (t), los parámetros que intervienen en la evaluación de la probabilidad de la pérdida económica de reparación de su degradación son:

1. El coste V_{C_t} de la unidad (m^2) de área dañada, que se supone el mismo para todos los edificios del mismo tipo (t).
2. El número de metros cuadrados equivalentes que hay que reponer.

A su vez, el número de metros cuadrados que hay que reponer para cada grado o estado de daño depende del producto del número de metros cuadrados del edificio ($Area_{jt}$) por la probabilidad del estado de daño k (P_{jtk}) y de los metros equivalentes en costo de reparación de cada grado de daño (RC_{tk}); evidentemente hay que sumar para todos los estados de daño. Cuando se aplica a una gran población de edificios hay que integrar (sumar) para todos los edificios (j) de cada tipología y para todos los tipos (t) de edificios, lo que conduce al siguiente modelo de evaluación:

$$Coste = \sum_{t=1}^{Nt} \left\{ Vc_t \sum_{j=1}^{Net} \left[Area_{jt} \sum_{k=1}^{Ns} P_{jtk} \cdot RC_{tk} \right] \right\} \quad [9.8]$$

donde RC_{tk} es el coste del daño causado por el grado de daño k en los edificios del tipo t y se define como un porcentaje del coste unitario del m^2 , P_{jtk} es la probabilidad del estado de daño k del edificio j del tipo t , y se obtiene de la correspondiente matriz de probabilidad de daño; Ns es el número de estados de daño diferentes del estado de daño nulo, que se considera para $k=0$; $Area_{jt}$ es la superficie construida en metros cuadrados del edificio j del tipo t . Net es el número de edificios del tipo t y Vc_t es el coste estimado del metro cuadrado para los edificios del tipo t . Finalmente Nt es el número de tipos de edificios considerados en nuestra matriz tipológica.

Por otra parte, además de las pérdidas económicas debidas al deterioro del continente o estructurales, suelen considerarse también las pérdidas económicas debidas al daño sufrido por su contenido. Nuestro modelo es sencillo y se basa en el informe ATC-13 (McCormack y Rad, 1997) que estima que el contenido en los edificios residenciales es el 50 % del valor de reposición del edificio. El coste total de las pérdidas económicas directas ($Tcoste$) será la suma de ambos conceptos.

9.4.2 Escenarios

Suele considerarse la aproximación de que Vc_t en la ecuación [9.8] es el mismo para todas las tipologías, ya que los materiales, técnicas y mano de obra utilizados en la actualidad tienen costos muy similares. Esta suposición, que es muy razonable para edificios clásicos de viviendas, no sería correcta en el caso de edificios especiales o con un alto valor patrimonial. El valor tomado para este costo Vc ha sido el que se ha mencionado más arriba de 722.82 €/m^2 . En este caso, tomando $Vc=Vc_t$ en la ecuación [9.8], puede definirse un escenario relativo ($Rcoste$), que escapa de la dependencia de este potencialmente polémico valor, mediante la siguiente expresión:

$$R_{coste} = \frac{Coste}{V_c} = \sum_{t=1}^{N_t} \left\{ \sum_{j=1}^{N_e} \left[Area_{jt} \sum_{k=1}^{N_s} P_{jtk} \cdot RC_{tk} \right] \right\} \quad [9.9]$$

Ahora R_{coste} tiene el significado de superficie equivalente destruida. Para los valores de los coeficientes RC_{tk} se han seguido las recomendaciones de Vacareanu *et al.* (2004), y se han tomado los valores del 0%, 2%, 10%, 50% y 100% respectivamente para los estados de daño *nulo* (0), *leve* (1), *moderado* (2), *severo* (3) y *completo* (4) respectivamente. En este sentido hablamos del coste de una superficie destruida equivalente. Si se divide el coste total directo debido al daño estructural, $Coste$, por V_c , se obtiene el coste relativo total R_{coste} , que también tiene un significado de superficie equivalente destruida.

Tabla 9.8. Resumen de pérdidas económicas directas, en superficie destruida equivalente y en millones de euros, para los escenarios determinista y probabilista analizados mediante los Métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y del Espectro de Capacidad (MEC).

	Superficie colapsada equivalente (Ha)	Coste en cada estado de daño (millones €)					Coste daño estructural (millones €)	Coste contenido edificios (millones €)	Coste Total (millones €)
		0-No daño	1- Leve	2- Moderado	3-Severo	4-Completo			
MIV. Escenario determinista	1466	0	317	1288	4375	4615	10595	5298	15893
MIV. Escenario probabilista	1488	0	320	1288	4412	4738	10758	5379	16137
MEC. Escenario determinista	574	0	256	745	2494	657	4152	2076	6228
MEC. Escenario probabilista	1256	0	252	1180	5016	2630	9078	4539	13617

La Tabla 9.8 resume los valores de superficie colapsada equivalente y el coste económico absoluto total, incluyendo contenido y continente, para los escenarios determinista y probabilista obtenidos mediante los Métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y del Espectro de Capacidad (MEC).

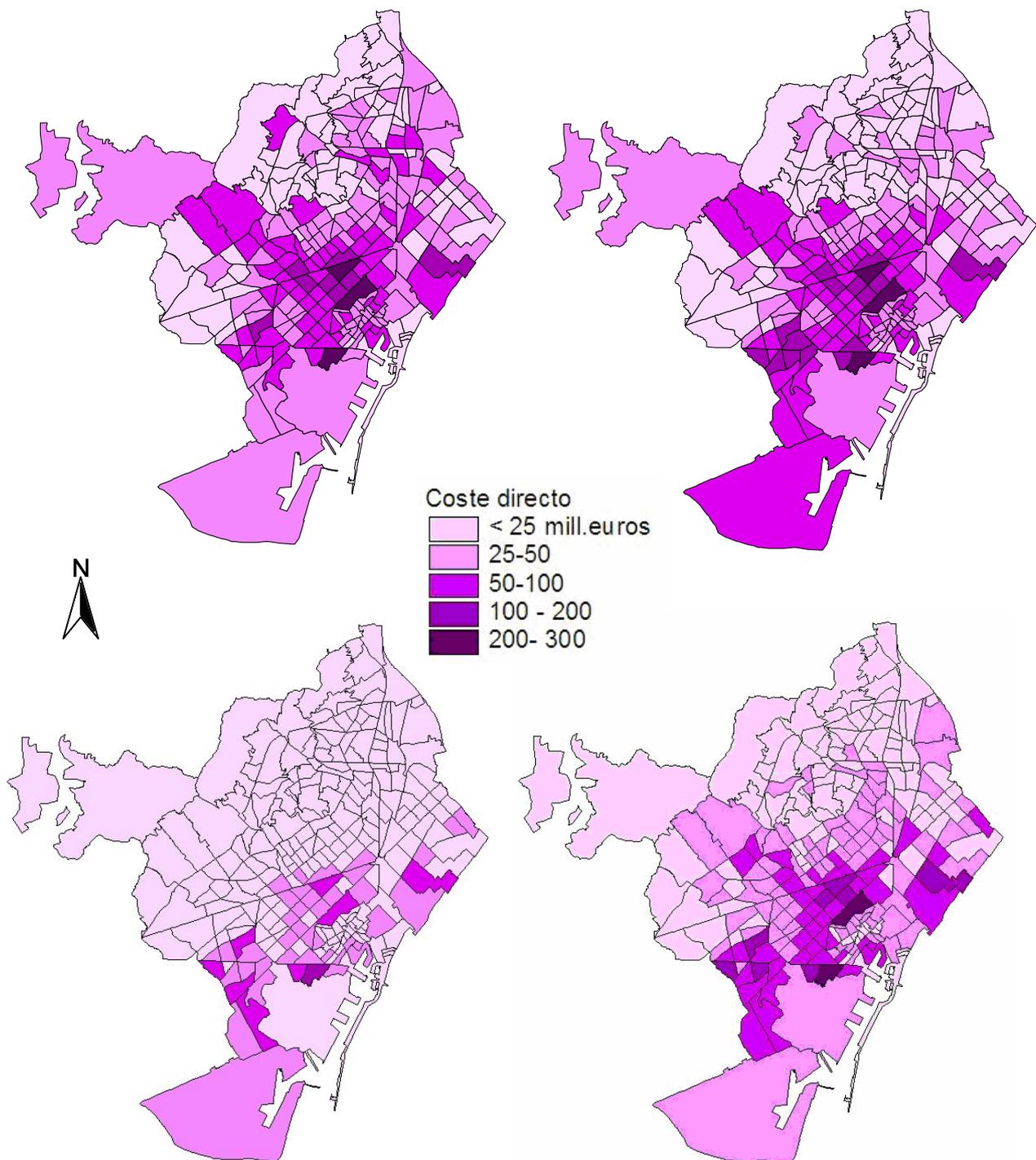


Figura 9.5. Distribución de coste económico en millones de Euros, estimada mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

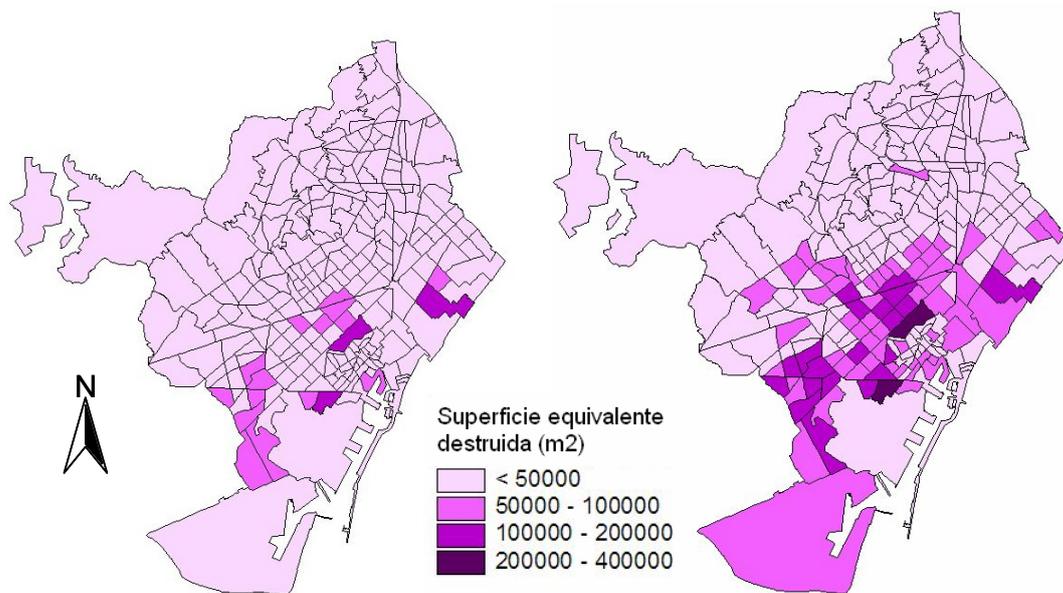


Figura 9.6. Simulación de pérdidas económicas (coste relativo en m^2 de superficie equivalente destruida) para el escenario determinista (izquierda) y para el escenario probabilista (derecha) obtenidos mediante el Método del Espectro de Capacidad. De hecho ambas figuras son proporcionales a las correspondientes de la Figura 9.5.

Se observa cómo los escenarios con un mayor coste económico son los escenarios determinista y probabilista cuando se analizan mediante el MIV. El valor global de una crisis sísmica de las características de las aquí analizadas podría exceder los 15 000 millones de Euros.

La Figura 9.5 muestra el resultado de la simulación del coste económico total ($Tcoste$), y la Figura 9.6 muestra el resultado correspondiente al coste relativo total ($Rcoste$) en metros cuadrados de superficie destruida equivalente, obtenido mediante el MEC. Las tablas y figuras anteriores se han confeccionado mediante herramienta GIS personalizada para esta tesis.

9.4.3 Discusión

Las distribuciones de coste de la Figura 9.5 y, de forma análoga, las correspondientes de la Figura 9.6, son el resultado de la severidad del escenario sísmico considerado y de la vulnerabilidad y fragilidad de los edificios de la ciudad. La Tabla 9.8 permite hacerse una idea de la magnitud del costo económico de estos escenarios que se ha estimado de entre 6000 y 16000 millones de Euros. Coburn y Spence (2002) ponen de manifiesto la dificultad e imprecisión de este tipo de evaluaciones pero constatan también el crecimiento del costo económico de las catástrofes sísmicas debido a una mayor ocupación del espacio urbano y al aumento del valor de las propiedades y de los enseres de los inquilinos. Como ejemplo muestran el caso del terremoto de San Francisco de 1906. Para ese año se estima el coste del terremoto en 300 millones de dólares. Una crisis sísmica similar en la actualidad costaría entre 170 000 y 225 000 millones de dólares, incluso considerando que San Francisco es una ciudad preparada para resistir sismos. Es difícil imaginar si los números obtenidos para Barcelona están sobrevalorados o infravalorados. Las mayores pérdidas se obtienen cuando se aplica el MIV. El mayor o menor acierto depende del mayor o menor atino en la adjudicación de los índices de vulnerabilidad. En cualquier caso, la información utilizada en este método es mucho más rica que la usada en el MEC en el que todos los edificios quedan clasificados en 6 clases. Con todo, no nos atrevemos a tomar partido por ninguno de los cuatro escenarios de daño. Es relevante que la herramienta GIS permite identificar sectores que de forma sistemática aparecen con una importante degradación sea por su alta vulnerabilidad, sea por su alta densidad, sea por ambos factores. No deberíamos cerrar los ojos ante estas constancias. En cualquier caso, dadas las características de la ciudad, entendemos que un costo entre 6000 y 16000 millones de euros es razonable y que probablemente el costo real se situaría en la banda alta de este amplio rango.

9.5 Escombros

Tanto HAZUS'99 como los informes relacionados con el proyecto Risk-UE (Vacareanu *et al.*, 2004) dan una especial importancia y utilidad a la estimación del volumen de escombros generado. Esta estimación es particularmente interesante y útil en los núcleos urbanos antiguos donde la trama urbana sigue manteniendo una gran densidad y las calles y vías principales son estrechas. Estas zonas, aún en condiciones de normalidad, suelen ser difícilmente transitables por los modernos automóviles y, aún más, por los vehículos que deben intervenir en la atención de una emergencia. Así pues la previsión del volumen de escombros generado en los diferentes escenarios y métodos aquí considerados se convierte en un aspecto esencial para planificar la accesibilidad a la población afectada, para trazar vías de evacuación e incluso para establecer zonas para el establecimiento de campamentos de soporte a las víctimas y personas sin hogar.

9.5.1 El modelo

El modelo para la estimación de escombros permite considerar diferentes tipos de ruinas. Es obvio que, por ejemplo, un edificio de adobe generará materiales de escombros de una constitución muy diferente de la de aquellos que puedan proceder de un edificio de estructura metálica o de las construcciones modernas. Así por ejemplo, un edificio típico de hormigón armado incluye elementos de mampostería y, en consecuencia, un mismo tipo de edificio puede dar lugar a diferentes clases de escombros que estarán directamente relacionadas con los distintos materiales constructivos de los edificios. Por otra parte, la cantidad de derrubios resultante de un edificio que ha experimentado el terremoto será una función del grado de daño por él sufrido. Por tanto, los parámetros que intervienen en el modelo de escombros para cada edificio (j) de tipo (t), para cada tipo de escombros (e) y para cada estado de daño (k) son:

1. Peso unitario del material de tipo e para el edificio de tipo t (W_{et} que suele darse en toneladas por m^2).

2. Fracción de escombros del material del tipo e del edificio del tipo t que se produce cuando el edificio experimenta un grado de daño k (F_{etk}).
3. Probabilidad del estado de daño k para el edificio tipo t (P_{kt}).
4. Superficie edificada del edificio j de tipo t (A_{jt}).

Para este edificio (j) de tipo (t), para este tipo de escombros (e) y para este grado de daño (k) la contribución a la masa de escombros vendrá dada por:

$$D_{ejtkl} = A_{jt} \cdot W_{et} \cdot F_{etk} \quad [9.10]$$

donde D_{ejtk} es la contribución al peso total de escombros de tipo e por parte del edificio j de tipo t cuando experimenta un grado de daño k ; A_{jt} es la superficie edificada del inmueble j del tipo t ; W_{et} es el peso unitario (ton/m²) del material del tipo e para el edificio del tipo t y F_{etk} es la fracción del peso unitario que resulta en ruina para este tipo de escombros e , para este tipo de edificio t y para este estado de daño k . Para un escenario sísmico, la frecuencia de escombros resultará del producto entre esta cantidad D_{ejtk} por la probabilidad de que el edificio j del tipo t sufra un grado de daño k (P_{jtk}).

Consideremos, por ejemplo, un edificio de mampostería que contiene diversos materiales como por ejemplo, muros de carga de ladrillo y mortero, pilares metálicos y forjados de hormigón armado; se estima que el peso de ladrillo y mortero por metro cuadrado de superficie útil es de 0.5 toneladas y que, cuando el edificio sufre un estado de daño moderado, el 10% de este material origina escombros de este tipo. Si este edificio consta de 400 m² de superficie útil, el volumen de escombros probable de este tipo, si el edificio está situado en un escenario en el que la probabilidad del estado de daño moderado es del 30%, será: de $400 \times 0.5 \times 0.10 \times 0.30 = 6$ toneladas de escombros de ladrillo y mortero.

En el caso general de un población de edificios de diferentes tipos que pueden generar escombros de diferentes clases en diferentes y situados en lugares con diferentes probabilidades de los estados de daño, es necesario efectuar la integración o suma de los elementos definidos en la ecuación [9.10] multiplicados por la

probabilidad del estado de daño correspondiente, para todos los tipos de escombros, para todos los tipos de edificios y para todos los estados de daño; es decir que el volumen total de escombros (ES_{Total}) queda definido por la ecuación:

$$ES_{total} = \sum_{t=1}^{Nt} \left(\sum_{j=1}^{Net} \left\{ \sum_{e=1}^{Nd} \left[\sum_{k=0}^{Ns} Area_{jt} \cdot W_{et} \cdot F_{etk} \cdot P_{jtk} \right] \right\} \right) \quad [9.11]$$

donde el índice k recorre los diferentes estados de daño entre 0 (nulo) y Ns (completo), e recorre los diferentes tipos de escombros y varía desde 1 y el número Nd de tipos de escombros. Por su lado, j recorre el número de edificios de la tipología t y va desde 1 hasta el número de edificios Net de la tipología t ; y t recorre las diferentes tipologías entre 1 y el número Nt de tipologías distintas.

De esta forma los datos para la evaluación de los escenarios de escombros para cada edificio i son: tipo de edificio t , superficie edificada A_{jt} , pesos por unidad de superficie de los diferentes tipos de materiales que pueden ocasionar escombros W_{et} , fracción de este peso que da lugar a escombros para cada estado de daño F_{etk} y probabilidades de los estados de daño k para cada edificio j del tipo t (P_{jtk}).

Los modelos aquí usados son muy simplificados y consideran sólo dos tipos de edificios y dos tipos de escombros. Los valores típicos de la ecuación [9.11] se definen en el siguiente apartado.

9.5.2 Escenarios

Para estimar los parámetros del modelo definido por las ecuaciones [9.10] y [9.11] se han usado los valores proporcionados por Vacareanu *et al.* (2004), que, a su vez, han sido adaptados de HAZUS'99 (FEMA, 2000). La Tabla 9.9 proporciona el peso, en toneladas por m^2 , de los elementos estructurales de edificios de mampostería y hormigón armado.

Para los diferentes estados de daño, la Tabla 9.10 proporciona las fracciones de las cantidades de la Tabla 9.9 que producen escombros del tipo ladrillo, madera y otros.

La Tabla 9.11 proporciona las fracciones de estas cantidades que producen escombros del tipo hormigón armado y acero de refuerzo.

Tabla 9.9. Peso unitario, en ton/m^2 para elementos estructurales de edificios de hormigón armado y mampostería. Adaptado de Vacareanu et al. (2004) y de HAZUS'99 (FEMA, 2000).

Tipo de edificio	Tipos de materiales	
	Ladrillo, madera y otros (ton/m^2)	Hormigón y acero de refuerzo (ton/m^2)
Mampostería	0.38	0.45 – 0.6
Hormigón armado	0.2 – 0.25	0.85 – 1.05

Estos son los datos básicos empleados para generar los escenarios de escombros. En los casos en que estas tablas dan un rango de variabilidad se ha utilizado el valor medio. Las probabilidades de los estados de daño para cada edificio se toman de las matrices de probabilidad de daño correspondientes a los escenarios y métodos aquí analizados.

De esta forma se ha simulado el peso total de escombros para los escenarios determinista y probabilista estimados mediante los Métodos del Índice de Vulnerabilidad y del Espectro de Capacidad, usando la herramienta GIS personalizada en esta tesis.

Tabla 9.10. Escombros de ladrillo, madera y otros, generados por los elementos estructurales dañados en función de los grados de daño. Se dan las fracciones de los pesos unitarios de la Tabla 9.9 (FEMA, 2000; Vacareanu et al., 2004).

Tipo de edificio	Estados de daño estructural			
	Leve	Moderado	severo	completo
Mampostería	0.05	0.25	0.55	1
Hormigón armado	0.05	0.25	0.60	1

Tabla 9.11. Escombros de hormigón y acero de refuerzo generados por los elementos estructurales dañados en función de los grados de daño. Se dan las fracciones de los pesos unitarios de la Tabla 9.9 (FEMA, 2000; Vacareanu et al., 2004).

Tipo de edificio	Estados de daño estructural			
	Leve	Moderado	severo	completo
Mampostería	0	0.02	0.25	1
Hormigón armado	0.01	0.08	0.35	1

La Tabla 9.12 sintetiza los resultados obtenidos para los edificios de mampostería, de hormigón armado y los números totales. La Figura 9.7 muestra su distribución en zonas de estudio (ZRP) para los escenarios determinista y probabilista y para los Métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y del Espectro de Capacidad (MEC).

Tabla 9.12. Resumen de los escombros generados en millones de toneladas. Se muestran los valores correspondientes a edificios de mampostería, de hormigón armado y valores totales. Se separan los resultados correspondientes a los escenarios determinista y probabilista, analizados mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y el del Espectro de Capacidad (MEC).

	Escombros causados por daños en edificios de mampostería	Escombros causados por daños en edificios de hormigón	ESCOMBROS TOTALES (millones de toneladas)
MIV. Escenario determinista	8219	3825	12080
MIV. Escenario probabilista	8517	3648	12201
MEC. Escenario determinista	2986	1148	4134
MEC. Escenario probabilista	7149	2406	9554

9.5.3 Discusión

El volumen de escombros generado en todos los escenarios es del mismo orden de magnitud y varía entre los 4134 millones de toneladas del escenario determinista analizado mediante el Método del Espectro de Capacidad y los 12201 millones de toneladas correspondientes al escenario probabilista analizado con el MIV. Se trata de un amplio rango, el valor máximo es casi tres veces el valor mínimo. Esta situación se repite incluso para el mismo escenario determinista según se analice usando el MEC (4134) o por medio el MIV (12080).

Las diferencias no son tan acentuadas en el caso del escenario probabilista, en el que los resultados obtenidos dan valores de 12201 toneladas cuando se analiza mediante el MIV y de 9554 cuando se analiza mediante el MEC. Las causas de estas diferencias hay que buscarlas básicamente en la habilidad del MIV para captar, de forma más precisa, las características constructivas de los edificios. En el escenario determinista estas diferencias son mucho mayores probablemente por causa de la incorporación de los efectos de cercanía de la fuente y de la atenuación de la intensidad con la distancia en términos de intensidad. El escenario determinista en términos de espectros de demanda pierde parte de esta información. En ambos escenarios la caracterización de los edificios mediante espectros de capacidad es menos fina ya que se reduce a 6 tipos, perdiendo capacidad para muestrear bien la enorme diversidad de los edificios de la ciudad.

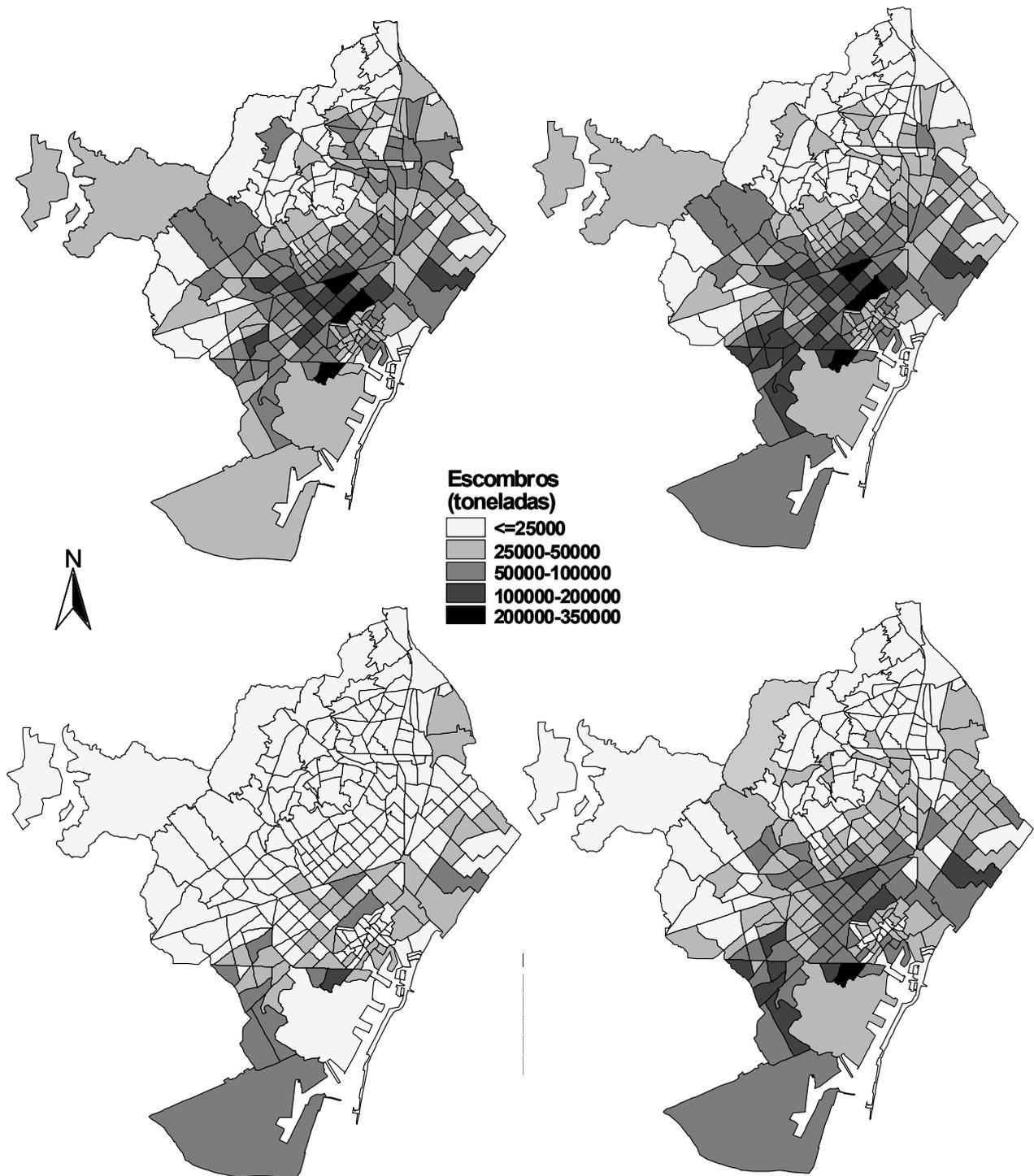


Figura 9.7. Distribución de Escombros generados, en toneladas, estimada mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y del Espectro de Capacidad (abajo) y para los escenarios determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

Algunas diferencias adicionales pueden provenir del establecimiento de las equivalencias entre los estados de daño usados en el MIV y de los estados de daño empleados en el MEC.

De nuevo, se hace difícil apostar directamente por un escenario y método, pero nuestra impresión, por las razones más arriba apuntadas, es que los resultados obtenidos mediante el MIV se hallarían más cerca de los valores esperados para escenarios de las características de los aquí analizados.

9.6 Resumen y conclusión

Este capítulo complementa el capítulo anterior. Allí se han obtenido escenarios de daño físico directo en los edificios de viviendas. Aquí se han analizado aspectos que, por una parte, tienen en cuenta información adicional sobre la densidad y distribución de población y por otra aprovechan el detalle y resolución de las bases de datos utilizadas y gestionadas mediante la herramienta GIS que se ha creado. El manejo adecuado de toda esta información ha hecho posible, para los métodos y escenarios ensayados, el análisis de otros aspectos de vital importancia como son: la predicción de los daños a las personas incluyendo heridos y fallecidos, la estimación del número de personas que quedan sin cobijo, la valoración del coste económico y la evaluación del volumen de escombros generado. Aspectos todos ellos de gran interés para una planificación inteligente de la emergencia sísmica.

A pesar de la alta variabilidad de estos parámetros en terremotos pasados y, por ende, a pesar de la dificultad de calibración de los modelos propuestos, todos los aspectos de riesgo y escenarios ensayados han permitido pronosticar el impacto de terremotos factibles en la ciudad de Barcelona, destacando los distritos, barrios y zonas de estudio que, por sus características de población o por la alta densidad y vulnerabilidad de sus edificios, presentan un riesgo específico singular. La Tabla 9.13 sintetiza, para cada método y escenario, las zonas de estudio (ZRP) donde se

han obtenido más víctimas, un mayor número de personas sin hogar, un mayor impacto económico y un mayor volumen de escombros.

Tabla 9.13. Zonas de estudio (ZRP) con mayor número de fallecidos, heridos, personas sin hogar, coste económico directo y escombros generados. Para cada aspecto se indica el nombre de la zona de estudio y el valor.

ESCENARIO	HERIDOS	MUERTOS	PERSONAS SIN HOGAR	COSTE (millones de €)	ESCOMBROS (toneladas)
MIV. Escenario determinista	La Pau	La Pau	C/Riera Alta	Plaça Catalunya-Rondes	Poble Sec-Satalia
	155	289	3962	275	290400
MIV. Escenario probabilista	Poble Sec-Satalia	La Pau	Poble Sec-Satalia	Poble Sec-Satalia	Plaça Catalunya-Rondes
	68	123	5898	317	332500
MEC. Escenario determinista	Passeig Zona Franca Est	Passeig Zona Franca Est	Poble Sec-Satalia	Poble Sec-Satalia	Poble Sec-Natalia
	29	50	2180	120	109000
MEC. Escenario probabilista	Passeig Zona Franca Est	Passeig Zona Franca Est	Poble Sec-Satalia	Poble Sec-Satalia	Poble Sec-Satalia
	48	104	4907	254	249000

9.6.1 Víctimas

En cuanto a las víctimas, destacan principalmente dos zonas de estudio. *La Pau*, en el barrio de *La Verneda* del distrito de *Sant Martí*, es la zona que presenta un mayor número de fallecidos y de heridos para los escenarios determinista y probabilista analizados para el MIV. Los números más elevados de heridos y fallecidos se dan para el escenario determinista analizado con el Método del Índice de Vulnerabilidad que son respectivamente 155 y 289 (véase Tabla 9.13). Sin embargo, cuando se aplica el Método del Espectro de Capacidad la zona de estudio que sobresale es la del *Passeig Zona Franca Est* en el barrio de la *Zona Franca-Port* del distrito de *Sants-Montjuïc*.

En el caso de *La Pau*, existe un gran número de edificios de hormigón de gran altura con un promedio 8 plantas. Se trata de edificios de viviendas, de calidad y costes

menores al promedio, típicos de cinturones dormitorio que suelen abundar en la periferia de grandes ciudades industriales. Estas características aumentan su vulnerabilidad que es bien captada y representada por el Método del Índice de Vulnerabilidad. Así pues, tanto para el escenario determinista como para el probabilista, la convolución entre la intensidad básica, la amplificación de los suelos y la vulnerabilidad sísmica predice un índice de daño correspondiente al grado de daño *moderado* y con probabilidades de colapso significativas. El escenario determinista es claramente más dañino por causa de la proximidad de la fuente.

El *Passeig Zona Franca Est*, con poco más de 21000 habitantes, es la zona de estudio con más habitantes y la segunda con mayor superficie edificada y, por lo tanto, también la segunda en número de viviendas. Un 90% de sus edificios son de mampostería, la mayoría construidos en los años 60. Sin embargo, no es de las zonas que presentan mayores daños. La explicación del alto número de víctimas puede residir en el hecho de que el MEC considera sólo 6 clases de casas cuyas curvas de fragilidad corresponden a modelos de edificios representativos. El MEC carece de modificadores que permitan incorporar particularidades de edificios concretos. De esta forma la zona de *La Pau* se vería beneficiada mientras que la del *Passeig Zona Franca Est* quedaría perjudicada y, de nuevo la conjunción de la acción sísmica, definida ahora en el formato de espectros de demanda, los factores de amplificación y la población serían los responsables de estos resultados. El escenario probabilista domina sobre el determinista debido a que para este método no se ha tenido en cuenta la proximidad de la fuente, lo que de nuevo ha beneficiado a las zonas más septentrionales.

9.6.2 Personas sin hogar

Con respecto a los escenarios de personas sin hogar, sobresalen las zonas de *Poble Sec-Satalia*, en el barrio de *Poble Sec* del distrito de *Sants-Montjuïc* y la zona *c/Riera Alta* del Barrio del *Raval* del distrito de *Ciutat Vella*. Esta última zona despunta para

el escenario determinista analizado con el MIV; la primera destaca en los otros casos (véase Tabla 9.13).

El elevado número de personas sin hogar pronosticado para la zona *c/Riera Alta* es fruto de la gran antigüedad de su parque de edificios cuya edad media data del 1897 con una longevidad media cercana a los 110 años; el MIV capta bien este fenómeno y el escenario determinista, al incluir los efectos de atenuación con la distancia asigna una mayor intensidad a esta zona que a la de *Poble Sec-Satalia*, cuyas características de edificación son similares a las de la *c/Riera Alta* con entre el 85 y 95% de edificios de mampostería de cinco plantas en promedio. El hecho que los dos escenarios probabilista y el determinista analizados con el MEC no consideren la atenuación con la distancia a la fuente causa este cambio de zona dominante.

El peor escenario es el probabilista analizado con el MIV para el que se pronostican casi 6000 personas sin hogar; este método permite incorporar a los índices de vulnerabilidad, entre otras, las características de calidad y ancianidad de sus edificios.

9.6.3 Coste económico

Se produce un efecto análogo al caso de las personas sin hogar. Para el escenario determinista analizado mediante el MIV destaca la zona de *Plaza Catalunya-Rondes* en el barrio de *Dreta de l'Eixample* en el distrito de *l' Eixample* donde de nuevo convergen los efectos de aumento de la intensidad con la cercanía a la fuente y de la habilidad del MIV para considerar las características de los edificios individuales. Más de la mitad de los edificios de esta zona fueron construidos antes del año 1900.

Poble Sec-Satalia vuelve a destacar en el resto de escenarios. El caso extremo absoluto, con un coste de 317 millones de euros (véase Tabla 9.13), se da para el escenario probabilista analizado con el MIV, que ha puesto de manifiesto su habilidad para usar la extensa e intensa información de las bases de datos (fundamento de la herramienta GIS usada) para representar mejor las características específicas de los edificios individuales.

9.6.4 Escombros

Se observa un efecto análogo al de la evaluación del coste económico y al de personas sin hogar (véase Tabla 9.13). La zona dominante es ahora *Plaça Catalunya-Rondes* con 332500 toneladas de escombros. Con respecto al pronóstico del coste económico, esta zona se permuta con la de *Poble Sec-Satalia* que dominaba en el caso de coste económico. Estas diferencias no nos deben sorprender debido a la cantidad de parámetros involucrados en estas complejas simulaciones. Probablemente las características de tipos y composición de escombros (véase Tabla 9.9) junto con las proporciones de edificaciones de cada categoría y los escenarios sísmicos pueden hacer variar ligeramente las zonas dominantes.

Seguramente en este apartado sería de gran interés analizar la anchura media de las calles y las alturas de los edificios. Muy probablemente la consideración de estos dos aspectos, orientaría la atención de los gestores de Protección Civil y de emergencias hacia otras zonas del distrito de *Ciutat Vella*, donde incluso menores volúmenes de escombros dificultarían en mayor grado la circulación por sus calles y callejuelas y el acceso a zonas necesitadas de socorros.

9.6.5 Conclusión final

En este capítulo se han modelado y analizado diversos aspectos de gran interés para la valoración del impacto de los escenarios sísmicos sobre la población y su entorno y sobre la sociedad. Los resultados obtenidos avalan la utilidad de este tipo de simulaciones y han permitido avanzar en las consecuencias de las diversas hipótesis latentes o explícitas tanto de los escenarios sísmicos como de los modelos utilizados. A pesar de su variabilidad, se obtiene una amplia consistencia de los resultados, poniendo de manifiesto la robustez de los métodos empleados. Con todo, es preciso concluir con dos comentarios básicos: 1) se deben considerar los valores numéricos concretos como pronósticos del orden de magnitud de las cantidades evaluadas; 2)

los resultados obtenidos se deben interpretar desde una óptica totalmente probabilista.

En cuanto a las cantidades estimadas, los cuatro aspectos analizados (víctimas, personas sin hogar, coste y volumen de escombros) se apoyan en hipótesis altamente simplificadoras e, incluso en terremotos pasados importantes, su evaluación “*post*” depende del momento de la evaluación y de la fuente de procedencia. Particularmente sensible es el coste económico cuya tasación en terremotos recientes no se ha cerrado hasta varios años después de ocurrir la catástrofe. Los terremotos golpean nuestra civilización de forma casi instantánea, pero sus efectos son de difícil evaluación ya que perduran años y décadas y, en no pocos casos, algunas de sus magulladuras pueden perdurar durante siglos, incluso aún no cicatrizadas. Lisboa y su famoso terremoto de 1755 constituyen un ejemplo paradigmático.

Por otra parte, el carácter probabilista es omnipresente. Recorre la elección de los escenarios sísmicos concretos, la caracterización de la acción sísmica tanto en términos de intensidad como en términos de espectros de demanda, incluye la caracterización de los edificios y la especificación de las matrices de probabilidad de daño. Finalmente está implícita en los modelos de los aspectos aquí considerados. De hecho, para el escenario determinista, pronosticamos los valores medios de las pérdidas probables que terremotos de estas características causarían en la ciudad de Barcelona. En el caso probabilista, de hecho, estamos simulando las pérdidas probables, que serían esperables, en promedio, como consecuencia de la ocurrencia de un terremoto cuya probabilidad de ocurrencia es del 10 por ciento en 50 años. El establecimiento de intervalos de confianza va más allá de los objetivos de este trabajo. Además, el alto nivel de incertidumbre, en todos y cada uno de los parámetros involucrados, hace poco viable este tipo de análisis. Las muestras son escasas y por tanto su tratamiento estadístico, en sentido clásico, carece de sentido.

Estas dos observaciones sobre la interpretación y alcance de los resultados obtenidos no desmerecen un ápice su relevancia. Los mapas obtenidos son de gran resolución y altamente consistentes con las características de los suelos, con la evolución histórica

de la ciudad y con su condición actual. Por ejemplo, la influencia de la microzonificación sísmica de la ciudad sobre los escenarios es clara.

Con el objeto de transferir toda esta información sensible a los responsables de Protección Civil, se ha elaborado el Anejo E detallado con los números concretos obtenidos para los dos escenarios y para los dos métodos ensayados, y para todos los aspectos analizados. Este anejo incluye todas y cada una de las zonas de estudio y los valores globales para barrios y distritos. Su utilidad para la prevención, preparación, planificación y gestión de emergencias y riesgos es incuestionable.

Pero quizás la aportación más relevante de esta investigación ha sido la creación de una potente herramienta de gestión masiva de información geográfica que ha permitido integrar los estudios de peligrosidad, vulnerabilidad y población para analizar diferentes modelos de daño y de riesgo. Esta herramienta, aplicada a una gran ciudad, ha permitido reproducir escenarios previsibles destacando y discriminando los puntos fuertes y débiles de su tejido urbano residencial. Pero, además de la habilidad para proporcionar escenarios “*a la carta*”, también permite fácilmente su actualización y mejora, por ejemplo poniendo al día las bases de datos o incorporando nuevas técnicas, aspectos y modelos. Finalmente, su uso para otras ciudades y escenarios sólo requiere alimentar el sistema con la información adecuada y proporcionarle las matrices de probabilidad de daño correspondientes a cada zona sísmica de la ciudad y a cada tipo de edificio.

- Ajuntament de Barcelona (2004), Departament d'Estadística de l'Ajuntament de Barcelona, <http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/timm/index.htm> (último acceso 23 de marzo de 2007)
- Boletín Económico de la Construcción (2005). (Año 65 1r.trimestre. No. 257-259 ene.-marzo 2005): 206-211.
- Coburn, A. y Spence, R. (1992). *Earthquake Protection*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 355 pp.
- Coburn, A. y Spence, R. (2002). *Earthquake Protection (2nd edition)*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 420 pp.
- FEMA, Federal Emergency Management Agency (2000). *HAZUS 99 Estimated annualised earthquake losses for the United States*. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, USA. pp.
- Martí, O. (1999). Anàlisi del risc sísmic en la ciutat de Barcelona. Aspectes relacionats amb l'evolució espacial temporal del risc sísmic. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 96 pp. (en catalán)
- McCormack, T. C. y Rad, F. N. (1997). "Earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21". *Earthquake Spectra* **13** (4): 605-621.
- Smardjieva, E. y Badal, J. (2002). "Estimation of the Expected Number of Casualties Caused by Strong Earthquakes". *Bulletin of the Seismological Society of America* **92** (6): 2310-2322.
- Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, A. y Arion, C. (2004). *WP07. Report Seismic Risk Scenarios Handbook*. Risk-UE Project, Bucarest. 50 pp.