



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 8

MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO

8.1 Introducción

Como se ha visto en el Capítulo 3, el daño esperado en entornos urbanos suele analizarse mediante *curvas de fragilidad* o *matrices de probabilidad de daño*. Dado un estado de daño y un edificio, para cada nivel de la acción sísmica, la *curva de fragilidad* define la probabilidad de que se iguale o exceda el estado de daño considerado. Asimismo, para cada edificio, para cada terremoto y para cada estado de daño, la Matriz de Probabilidad de Daño define la probabilidad de que el edificio considerado sufra este nivel de daño. Por consiguiente, las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño son equivalentes y para un edificio dado, establecen el nexo entre el escenario sísmico considerado y el daño esperado. Tanto la definición de las curvas de fragilidad como la de las matrices de probabilidad de daño requieren establecer cómo se cuantifica la acción, cómo se tipifica el edificio, cuántos estados de daño se consideran y cómo se definen éstos.

En el Capítulo 6 se ha establecido la forma de caracterizar los edificios mediante índices de vulnerabilidad y espectros de capacidad; en el Capítulo 7 se han definido los escenarios sísmicos en términos de intensidad macrosísmica y espectros de respuesta. Este capítulo se dedica al desarrollo de matrices de probabilidad de daño para los escenarios sísmicos escogidos, aplicando dos metodologías de análisis de daño de última generación: el *Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV)* (apartado 8.3) y el *Método del Espectro de Capacidad (MEC)* (apartado 8.4). El primero define la acción mediante la intensidad macrosísmica, y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad. El segundo define la acción mediante el espectro de respuesta y el edificio mediante el espectro de capacidad; el cruce de ambos espectros produce el llamado punto de desempeño (*performance point*) que define el nivel de demanda que sufrirá el edificio sometido a la acción. Este punto se da en términos de aceleración (S_a) y desplazamiento (S_d) espectrales, parámetros que permiten entrar en las curvas de fragilidad para estimar las matrices de probabilidad de daño.

Así pues, a pesar de que ambos métodos pretenden estimar el daño esperado, estas diferencias metodológicas complicarán la comparación de los resultados obtenidos. Por otra parte, el MIV, de acuerdo con la escala macrosísmica EMS-98, considera seis grados o estados de daño, mientras que el MEC utiliza una clasificación simplificada según cinco estados de daño. El establecimiento de equivalencias entre los estados de daño de ambos métodos no es trivial y diversos expertos han establecido correlaciones diferentes. En este trabajo se han adoptado los estados de daño y las equivalencias tal como se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Relación entre los estados de daño de las metodologías empleadas.

	Método del Índice de Vulnerabilidad	Método del Espectro de Capacidad
Estado de daño	0. Sin daño	0. Sin daño
	1. Leve	1. Leve
	2. Moderado	2. Moderado
	3. Severo	3. Severo
	4. Extensivo	4. Completo
	5. Completo	

Esta correlación se ha considerado razonable y se ha establecido atendiendo a las descripciones que de los grados de daño se dan en la escala EMS-98 y en los

manuales de HAZUS'99. Además, para poder comparar gráficamente los resultados obtenidos por ambas metodologías, las leyendas de color de los mapas resultantes se han homogeneizado de acuerdo a esta correlación; es decir, los tonos y gradaciones de color correspondientes a los estados de daño 0 a 3 son idénticos para representar los resultados que provienen de ambas metodologías. Por otra parte, los colores y tonos asignados al intervalo entre los estados 4 y 5 del MIV son los mismos que para el estado 4 en el MEC (véase leyendas en Figura 8.6 a Figura 8.8).

8.2 Estado o grado de daño medio

Dada una intensidad sísmica, se supone que la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño sigue una distribución Binomial o Beta equivalente. Este tipo de distribuciones se caracteriza mediante un solo parámetro que llamaremos Estado o Grado de Daño Medio, DS_m , que suele definirse mediante la siguiente expresión:

$$DS_m = \sum_{i=0}^N i P[DS_i] \quad [8.1]$$

donde N es el número de estados de daño considerados, i es el número correspondiente al estado de daño DS_i , es decir, toma valores de 0 a N para cada estado de daño considerado en el análisis: de 0 a 5 en el MIV y de 0 a 4 en el MEC. $P[DS_i]$ es la probabilidad de ocurrencia del estado de daño i .

DS_m representa el estado de daño más probable. Por ejemplo, de acuerdo con la Ecuación [8.1], un valor $DS_m=0$ indica que la probabilidad de todos los estados de daño distintos del estado de daño nulo (0) es nula, mientras que un valor elevado¹ indica que la probabilidad del estado de daño de colapso es 1; finalmente un valor

¹ $DS_m=4$ en el Método del Espectro de Capacidad y $DS_m=5$ en el Método del Índice de Vulnerabilidad

$DS_m=1.3$, indica que el estado de daño más probable de ese edificio o colección de edificios, varía entre leve y moderado, siendo más probable el estado de daño leve.

Aunque el cartografiado de escenarios de daño puede efectuarse mediante la representación de la distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia $P[DS_i]$ para cada estado de daño específico i (5 o 6 mapas), el grado de daño medio es particularmente útil pues permite hacerse una idea clara y precisa del nivel de daño global y de su distribución geográfica en un solo mapa. También es un parámetro altamente eficiente para establecer comparaciones entre escenarios sísmicos diferentes.

8.3 Método del Índice de Vulnerabilidad

Una vez conocido el índice de vulnerabilidad de un edificio y la intensidad esperada en su emplazamiento, el establecimiento del daño probable se efectúa a partir de un parámetro de daño, que define la función de distribución de probabilidad de los estados de daño para este edificio, para este emplazamiento y para esta intensidad esperada. Así pues, el establecimiento de este tipo de relaciones entre intensidad, vulnerabilidad y daño son fundamentales para determinar el daño probable y los escenarios de daño y de riesgo sísmico. Para ello hemos seguido la metodología propuesta por Giovinazzi y Lagomarsino (2002) y descrita en Milutinovic y Trendafiloski (2003). Esta metodología, que utiliza funciones semi-empíricas, se describe brevemente a continuación.

8.3.1 Funciones de vulnerabilidad

Conociendo la intensidad que afecta a cada edificio y su índice de vulnerabilidad definitivo, se puede obtener el grado de daño medio o grado de daño más probable μ_D , cuyo valor varía entre 0 y 5 y cuyo significado es igual al de DS_m (Ecuación [8.1]). Este parámetro define una distribución de probabilidad de daño para cada edificio, que se verá en el apartado 8.3.2. De este modo, para cada edificio, se puede obtener fácilmente la probabilidad de daño asociada a cada uno de los seis estados de

daño. Valores pequeños de μ_D indican poco daño mientras que valores grandes corresponden a daños severos de acuerdo a los estados de daño adoptados: 0) nulo (*None*), 1) leve (*Slight*), 2) moderado (*Moderate*), 3) severo (*Heavy*), 4) extensivo (*Extensive*), y 5) completo (*Destruction*).

Para cada edificio, este grado de daño medio μ_D , se estima a partir de su índice de vulnerabilidad \bar{V}_I y de la correspondiente intensidad sísmica I , según la siguiente función semi-empírica propuesta por Giovinazzi y Lagomarsino (2002):

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 \bar{V}_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad [8.2]$$

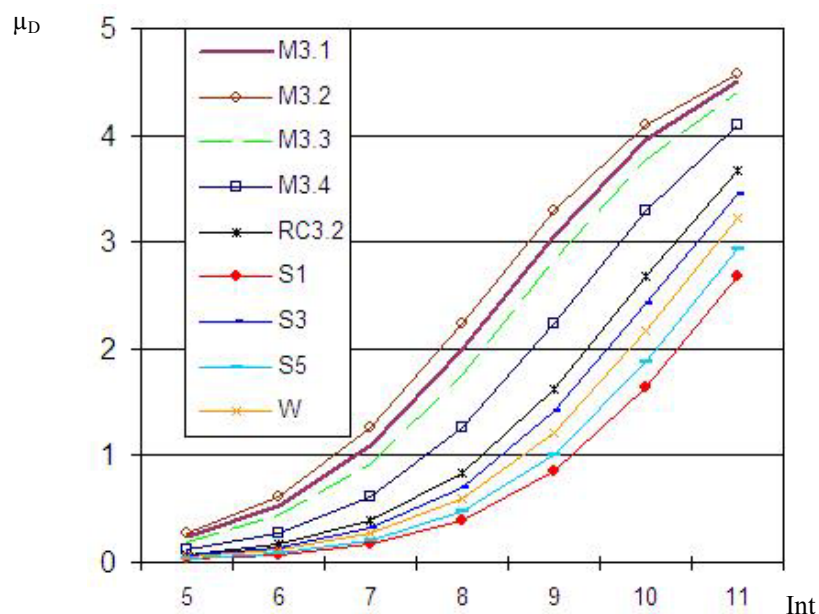


Figura 8.1. Funciones semi-empíricas de vulnerabilidad para las tipologías más representativas de Barcelona.

Ajustando los índices de vulnerabilidad \bar{V}_I y los correspondientes grados de daño medio para cada tipología, se obtienen unas funciones de vulnerabilidad, que correlacionan el grado de daño medio μ_D , la intensidad macrosísmica I y el índice de vulnerabilidad V_I . La Figura 8.1 muestra estas funciones para diferentes tipos de edificios considerados en el proyecto Risk-UE. Obsérvese cómo la tipología M3.2 corresponde al tipo de edificio más vulnerable y la S1 al menos vulnerable.

8.3.2 Matrices de probabilidad de daño

La probabilidad $P_{\beta}(x)$ de que un edificio de una tipología determinada sufra un cierto grado de daño, al ser afectado por un terremoto de una intensidad sísmica determinada x , puede modelarse mediante una función de distribución Beta o Binomial equivalente (Ecuación [8.3]) que vendrá definida por un único parámetro, el grado de daño medio μ_D :

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1}(b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x < b \quad [8.3]$$

En esta ecuación, Γ es la función Gamma, a y b definen los valores extremos de la función de densidad de probabilidad de la distribución, y deben tomar valores que permitan hallar las probabilidades de ocurrencia o de excedencia de cada uno de los estados de daño considerados. En nuestro caso, como los estados de daño considerado son seis, $a=0$ y $b=6$. El parámetro t afecta a la dispersión de la distribución y su valor se fija en 8, para que la distribución Beta en este caso sea similar a la distribución Binomial (Giovinazzi y Lagomarsino, 2002). Finalmente el parámetro r se ajusta de forma que la distribución Binomial de parámetro μ_D sea equivalente a la distribución Beta definida por la ecuación [8.3].

La ecuación [8.4] define esta relación entre los parámetros de las distribuciones Binomial (μ_D) y Beta (r y t):

$$r = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad t = 8 \quad [8.4]$$

En general, la distribución Beta es más versátil que la distribución Binomial pero, con los parámetros así ajustados, es equivalente a ella (en el Anejo A puede verse más información acerca de estas funciones estadísticas empleadas).

La probabilidad de que el estado de daño se halle entre los valores a y x se define mediante la función de Distribución Beta Acumulada (*Cumulative Distrribute Function, CDF*) y se obtiene mediante la integración de la función definida en [8.3], de la siguiente manera:

$$P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon \quad [8.5]$$

De esta manera la probabilidad de cada grado de daño k , para k desde 0 hasta 5, se obtiene mediante:

$$p_k = P_{\beta}(k+1) - P_{\beta}(k) \quad [8.6]$$

Para una intensidad y un edificio dados, p_k define una celda de la *matriz de probabilidad de daño* correspondiente.

Otro concepto manejado en estudios de daño y riesgo sísmico es la curva de fragilidad, que para un edificio y un estado de daño dado, define la probabilidad de excedencia en función de la intensidad sísmica. Esta curva también puede obtenerse directamente a partir de la Distribución Beta Acumulada (CDF) de la siguiente forma:

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_{\beta}(k) \quad [8.7]$$

El procedimiento descrito se ha aplicado para obtener las matrices de probabilidad de daño correspondientes a los edificios y escenarios analizados de la ciudad de Barcelona. Como ejemplo, se muestran los resultados obtenidos (matrices de probabilidad de daño) para los edificios más vulnerables y menos vulnerables de cada una de las cuatro áreas correspondientes a la microzonificación sísmica de la ciudad. La Tabla 8.2 corresponde a los edificios de mampostería y al escenario determinista. La Tabla 8.3 corresponde a los edificios de hormigón armado y al escenario determinista. Cada una de estas tablas muestra la zona, el índice de vulnerabilidad I_v (máximo y mínimo de la zona), el correspondiente parámetro central de daño μ_D , las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los seis estados de daño y el factor o estado de daño medio DS_m . Este factor tiene el mismo significado que μ_D aunque los algoritmos para su cálculo, y por lo tanto sus valores, no coinciden exactamente. La Tabla 8.4 y la Tabla 8.5 son análogas a las dos anteriores y corresponden al escenario probabilista.

Tabla 8.2. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería de cada zona sísmica (escenario determinista con efectos de suelo).

Zona	Iv	μ_D	Probabilidades (para el estado de daño)						DS _m	
			0	1	2	3	4	5		
R	Min	0.423	0.1131	0.9497	0.0442	0.0056	0.0005	0.0000	0.0000	0.0569
	Max	1.158	3.2997	0.0019	0.0413	0.1769	0.3419	0.3382	0.0997	3.2724
I	Min	0.423	0.1916	0.9127	0.0753	0.0109	0.0011	0.0000	0.0000	0.1003
	Max	1.158	3.7492	0.0003	0.0133	0.0884	0.2583	0.4088	0.2309	3.7546
II	Min	0.423	0.1553	0.9309	0.0601	0.0082	0.0008	0.0000	0.0000	0.0789
	Max	1.218	3.9419	0.0001	0.0072	0.0583	0.2062	0.4080	0.3203	3.9756
III	Min	0.423	0.1725	0.9225	0.0671	0.0094	0.0010	0.0000	0.0000	0.0889
	Max	1.178	4.119	0.0001	0.0038	0.0370	0.1569	0.3833	0.4188	4.1760

Tabla 8.3. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad para los edificios de hormigón de cada zona sísmica (escenario determinista con efectos de suelo).

Zona	Iv	μ_D	Probabilidades (para el estado de daño)						DS _m	
			0	1	2	3	4	5		
R	Min	0.360	0.0899	0.9576	0.0375	0.0045	0.0004	0.0000	0.0000	0.0477
	Max	1.030	2.3235	0.0266	0.1926	0.3462	0.3005	0.1227	0.0114	2.3343
I	Min	0.360	0.1113	0.9497	0.0442	0.0056	0.0005	0.0000	0.0000	0.0569
	Max	1.010	3.125	0.0033	0.0588	0.2139	0.3561	0.2978	0.0702	3.0968
II	Min	0.360	0.1113	0.9497	0.0442	0.0056	0.0005	0.0000	0.0000	0.0569
	Max	1.070	3.125	0.0033	0.0588	0.2139	0.3561	0.2978	0.0702	3.0968
III	Min	0.360	0.1698	0.9238	0.0660	0.0093	0.0009	0.0000	0.0000	0.0871
	Max	1.010	3.2506	0.0022	0.0458	0.1873	0.3469	0.3272	0.0905	3.2226

Tabla 8.4. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad, para edificios de mampostería de cada zona sísmica (escenario probabilista con efectos de suelo).

Zona	Iv	μ_D	Probabilidades (para el estado de daño)						DS _m	
			0	1	2	3	4	5		
R	Min	0.423	0.1553	0.9309	0.0601	0.0082	0.0008	0.0000	0.0000	0.0789
	Max	1.158	3.1758	0.0028	0.0533	0.2032	0.3531	0.3098	0.0779	3.1474
I	Min	0.423	0.2359	0.8876	0.0956	0.0151	0.0016	0.0001	0.0000	0.1311
	Max	1.158	3.6446	0.0005	0.0180	0.1072	0.2832	0.3996	0.1915	3.6378
II	Min	0.423	0.2359	0.8876	0.0956	0.0151	0.0016	0.0001	0.0000	0.1311
	Max	1.218	3.9419	0.0001	0.0072	0.0583	0.2062	0.4080	0.3203	3.9756
III	Min	0.423	0.2359	0.8876	0.0956	0.0151	0.0016	0.0001	0.0000	0.1311
	Max	1.178	3.7492	0.0003	0.0133	0.0884	0.2583	0.4088	0.2309	3.7546

Tabla 8.5. Matriz de probabilidad de daño para valores máximos y mínimos del índice de vulnerabilidad, para edificios de hormigón de cada zona sísmica (escenario probabilista con efectos de suelo).

Zona	Iv	μ_D	Probabilidades (para el estado de daño)						DS _m	
			0	1	2	3	4	5		
R	Min	0.360	0.1113	0.9497	0.0442	0.0056	0.0005	0.0000	0.0000	0.0569
	Max	1.030	2.3235	0.0266	0.1926	0.3462	0.3005	0.1227	0.0114	2.3343
I	Min	0.360	0.1698	0.9238	0.0660	0.0093	0.0009	0.0000	0.0000	0.0871
	Max	1.010	2.7303	0.0099	0.1135	0.2914	0.3506	0.2045	0.0300	2.7164
II	Min	0.360	0.1698	0.9238	0.0660	0.0093	0.0009	0.0000	0.0000	0.0871
	Max	1.070	3.125	0.0033	0.0588	0.2139	0.3561	0.2978	0.0702	3.0968
III	Min	0.360	0.1698	0.9238	0.0660	0.0093	0.0009	0.0000	0.0000	0.0871
	Max	1.010	2.7303	0.0099	0.1135	0.2914	0.3506	0.2045	0.0300	2.7164

8.4 Método del Espectro de Capacidad

8.4.1 Punto de desempeño

En el Capítulo 6 se han descrito los espectros de capacidad de edificios de mampostería y de hormigón armado. Los correspondientes a los edificios de mampostería han sido desarrollados por Bonett (2003) mientras que los correspondientes a los edificios de hormigón armado han sido desarrollados por Moreno (2006). En ese mismo capítulo mediante un método simplificado se han desarrollado curvas de fragilidad para las seis tipologías constructivas analizadas, tres de mampostería y tres de hormigón. En el Capítulo 7 se han desarrollado espectros de demanda para un escenario determinista y uno probabilista para las cuatro zonas sísmicas en que se han clasificado los suelos de la ciudad. El cruce del espectro de demanda con el espectro de capacidad permite estimar el Punto de Desempeño (*Performance Point*), caracterizado por su desplazamiento y aceleración espectrales (Sd_p , Sa_p). Éste es el punto de máxima solicitud de capacidad de la estructura por parte de la demanda a la que se ve sometida. La Figura 8.2 ilustra el procedimiento de obtención del punto de desempeño para un edificio de mampostería de 5 plantas situado en un suelo de la zona II del escenario determinista. La Figura 8.3 es análoga a la anterior para el escenario probabilista. En esta última figura se

puede observar la reducción del espectro de respuesta elástica por causa del comportamiento inelástico de la estructura.

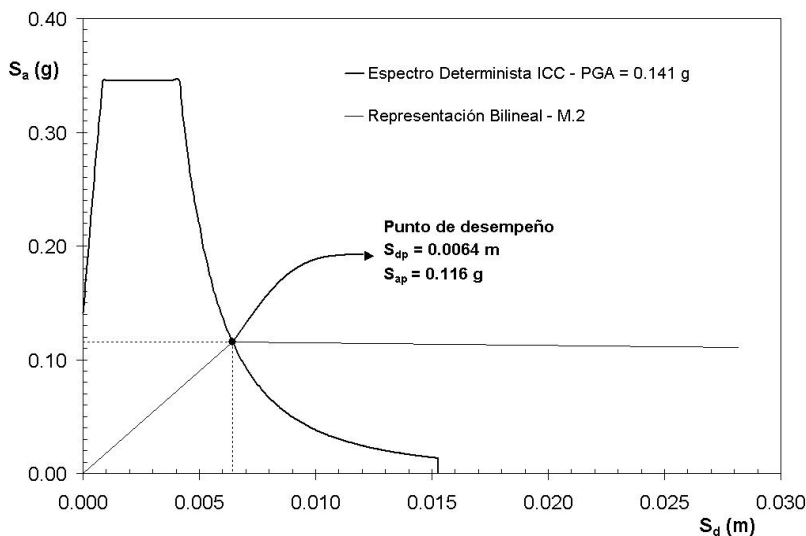


Figura 8.2. Punto de desempeño sísmico de un edificio de mampostería no reforzada de 5 plantas, para el caso determinista (Bonett, 2003).

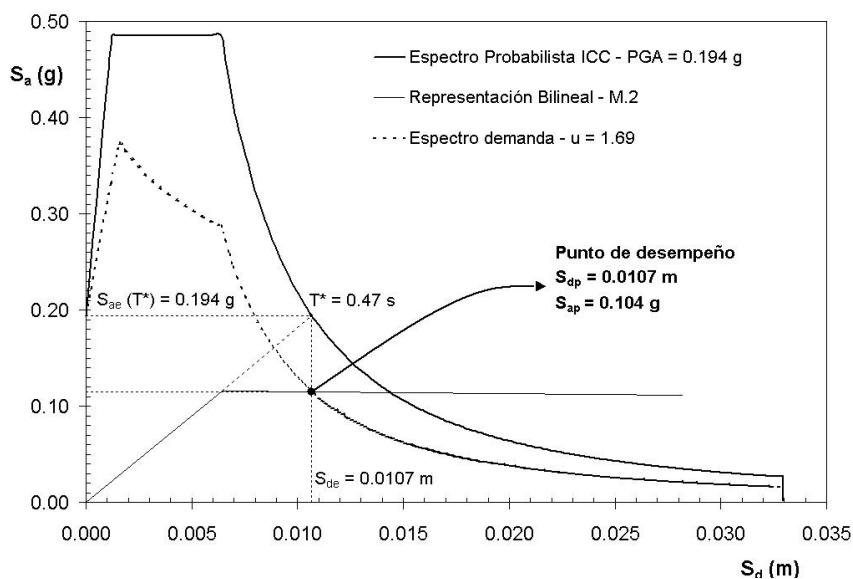


Figura 8.3. Punto de desempeño sísmico de un edificio de mampostería no reforzada de 5 plantas, para el caso probabilista (Bonett, 2003).

El desplazamiento espectral del punto de desempeño permite entrar en las curvas de fragilidad para determinar las matrices de probabilidad de daño correspondientes al terremoto definido por su espectro de demanda.

8.4.2 Matrices de probabilidad de daño

Así pues, a partir de los desplazamientos espectrales obtenidos del cruce entre espectros de capacidad y de demanda, utilizando las correspondientes curvas de fragilidad, se han obtenido las matrices de probabilidad de daño para las seis tipologías consideradas, para los dos escenarios y para los cuatro tipos de suelo. La Tabla 8.6 muestra estas matrices para los edificios de mampostería.

Tabla 8.6. Matriz de probabilidad de daño para edificios de mampostería no reforzada.

		Escenario Determinista						Escenario Probabilista					
		Probabilidades (para el estado de daño)					DS_m	Probabilidades (para el estado de daño)					DS_m
		0	1	2	3	4		0	1	2	3	4	
Zona	0	1	2	3	4		0	1	2	3	4		
Edificios bajos (1-2 plantas)	I	0.950	0.037	0.011	0.002	0.000	0.066	0.632	0.257	0.095	0.014	0.002	0.498
	II	0.737	0.189	0.063	0.009	0.002	0.349	0.287	0.416	0.249	0.042	0.006	1.065
	III	0.917	0.061	0.018	0.003	0.001	0.109	0.432	0.365	0.173	0.027	0.004	0.807
	R	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.982	0.013	0.004	0.001	0.000	0.025
Edificios medianos (3-5 plantas)	I	0.009	0.169	0.419	0.340	0.063	2.281	0.000	0.032	0.322	0.453	0.193	2.807
	II	0.116	0.396	0.298	0.176	0.014	1.573	0.007	0.160	0.419	0.347	0.067	2.306
	III	0.240	0.423	0.210	0.120	0.006	1.229	0.029	0.270	0.396	0.271	0.035	2.012
	R	0.512	0.332	0.094	0.061	0.002	0.708	0.109	0.391	0.305	0.181	0.014	1.600
Edificios altos (≥6 plantas)	I	0.003	0.145	0.389	0.371	0.092	2.404	0.000	0.019	0.248	0.464	0.269	2.983
	II	0.135	0.388	0.281	0.178	0.018	1.556	0.002	0.133	0.386	0.381	0.099	2.441
	III	0.307	0.369	0.195	0.120	0.009	1.155	0.014	0.237	0.386	0.307	0.056	2.154
	R	0.647	0.205	0.086	0.059	0.003	0.566	0.076	0.360	0.323	0.215	0.026	1.756

Se observa cómo el daño esperado para un terremoto relativamente pequeño es relativamente alto. Por ejemplo, para el escenario determinista, aproximadamente un 45% de los edificios altos (de más de 6 plantas) y de altura media (de entre 3 y 5 plantas) de mampostería no reforzada localizados en la Zona II sufrirían un estado de daño entre moderado y severo. Para el escenario probabilista los edificios dañados estarían alrededor del 75%. Este hecho confirma la alta vulnerabilidad de este tipo de edificios.

La Tabla 8.7 muestra las matrices de probabilidad de daño para los edificios de hormigón armado. Tanto en esta tabla, como en la Tabla 8.6 se detallan los dos escenarios, determinista y probabilista, y las cuatro zonas sísmicas en que se han clasificado los suelos de la ciudad.

Tabla 8.7. Matriz de probabilidad de daño para edificios de hormigón armado.

		Escenario Determinista					Escenario Probabilista					DS_m		
		Probabilidades (para el estado de daño)					DS_m	Probabilidades (para el estado de daño)					DS_m	
		Zona	0	1	2	3		4	0	1	2			3
Edificios bajos (1-3 plantas)	I	0.020	0.280	0.450	0.220	0.030	1.960	0.020	0.240	0.450	0.250	0.040	2.050	
	II	0.180	0.420	0.300	0.090	0.010	1.330	0.080	0.380	0.400	0.130	0.010	1.610	
	III	0.420	0.340	0.170	0.070	0.000	0.890	0.200	0.400	0.310	0.080	0.010	1.300	
	R	0.760	0.180	0.020	0.040	0.000	0.340	0.470	0.340	0.130	0.060	0.000	0.780	
Edificios medianos (4-7 plantas)	I	0.220	0.440	0.240	0.090	0.010	1.230	0.120	0.410	0.330	0.120	0.020	1.510	
	II	0.680	0.230	0.060	0.030	0.000	0.440	0.430	0.370	0.150	0.040	0.010	0.830	
	III	0.840	0.120	0.030	0.010	0.000	0.210	0.610	0.280	0.080	0.030	0.000	0.530	
	R	0.920	0.060	0.010	0.010	0.000	0.110	0.670	0.240	0.070	0.020	0.000	0.440	
Edificios altos (≥8 plantas)	I	0.480	0.340	0.080	0.080	0.020	0.820	0.290	0.420	0.140	0.110	0.040	1.190	
	II	0.800	0.150	0.010	0.030	0.010	0.300	0.560	0.300	0.060	0.060	0.020	0.680	
	III	0.920	0.060	0.020	0.000	0.000	0.100	0.700	0.220	0.030	0.040	0.010	0.440	
	R	0.930	0.050	0.000	0.020	0.000	0.110	0.660	0.240	0.040	0.040	0.020	0.520	

Estas matrices de probabilidad de daño, se usarán en el capítulo siguiente para analizar el riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona. Con todo, para los edificios de mampostería no reforzada de 5 plantas y para los de hormigón armado de 3 plantas se han aplicado matrices de probabilidad específicas, por entender que representaban mejor a este tipo de edificios. Dichas matrices fueron obtenidas a partir de los espectros de capacidad desarrollados para estas tipologías por Bonett (2003) y Moreno (2006) respectivamente. De hecho, estos análisis fueron realizados para estimar la variabilidad de las curvas de capacidad y curvas de fragilidad, concluyéndose que las diferencias entre estas matrices y las correspondientes en las dos tablas anteriores (Tabla 8.6 y Tabla 8.7) son insignificantes.

8.5 Gestión del Sistema de Información Geográfica

Para cartografiar y analizar los escenarios de daño esperados, ha sido preciso incorporar las matrices de probabilidad de daño al Sistema de Información Geográfica. Para ello se han seguido procedimientos diferentes para el método del índice de vulnerabilidad y para el método del espectro de capacidad.

8.5.1 Método del Índice de Vulnerabilidad

En este caso, cada edificio en el GIS se caracteriza por su índice de vulnerabilidad y, para cada escenario por la intensidad correspondiente a su ubicación sobre los suelos de Barcelona. Conocido pues el índice de vulnerabilidad y la intensidad, la ecuación [8.2] permite estimar el grado o estado de daño medio, y las ecuaciones [8.3], [8.4], [8.5] y [8.6] la probabilidad del grado o estado de daño medio correspondiente a su ubicación. Las curvas de fragilidad permiten obtener las matrices de probabilidad de daño del tipo de las que se muestran en la Tabla 8.2 y en las tres tablas siguientes. Se pueden utilizar las herramientas de programación en el lenguaje *Avenue* (Lantada y Nuñez, 2002), propias de ArcView, para calcular y generar un listado con los índices de grado de daño medio concretos, y posteriormente, una vez calculadas fuera del GIS las probabilidades, incorporarlas mediante una tabla o listado a la base de datos de ArcView. No obstante, también pueden utilizarse tablas preconstruidas para un barrido de índices de vulnerabilidad e intensidades sísmicas (véase Figura 8.4). En este último caso se pueden utilizar técnicas de interpolación con un importante ahorro de tiempo de computación.

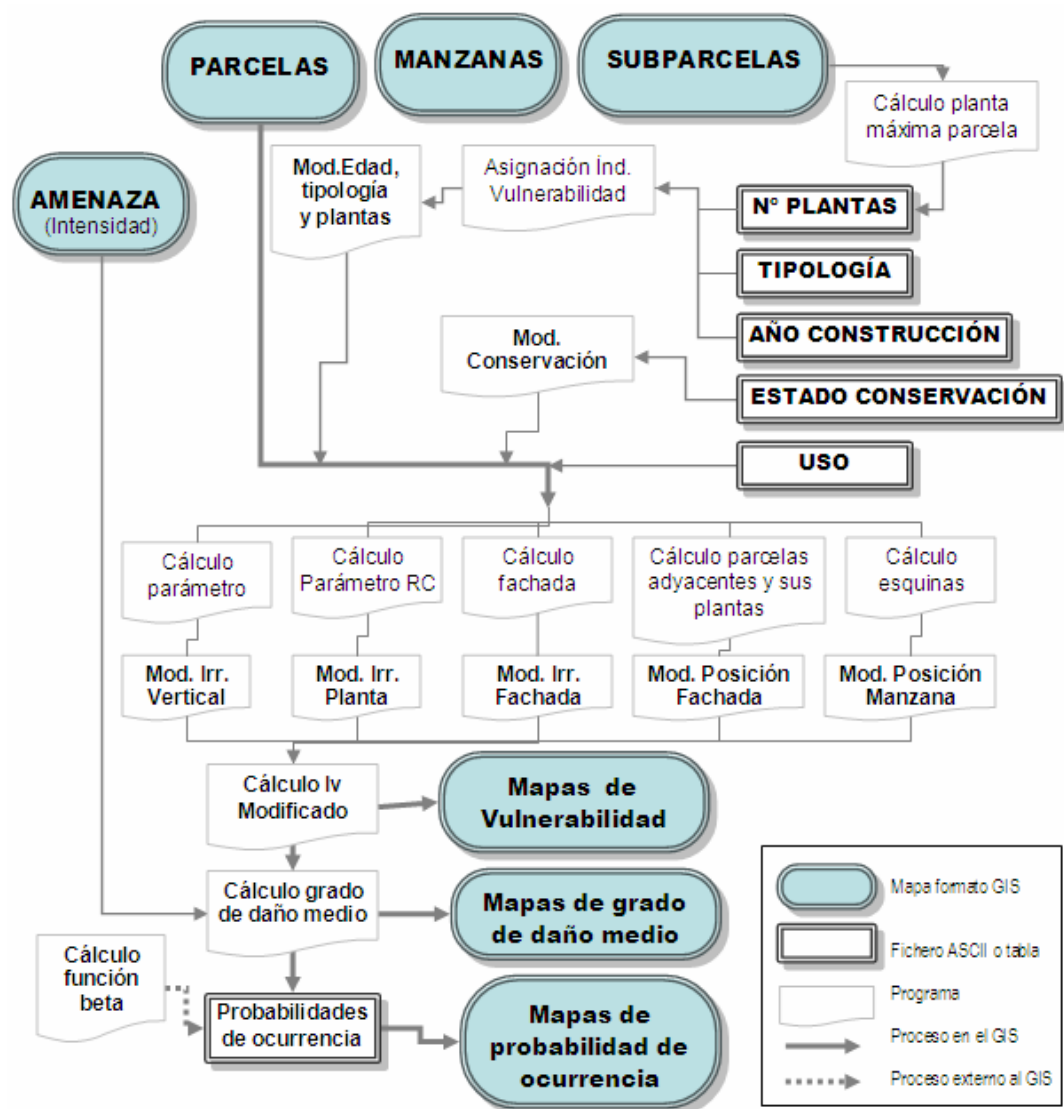


Figura 8.4. Esquema del proceso de generación de mapas de vulnerabilidad y daño en el GIS, según el Método del Índice de Vulnerabilidad.

8.5.2 Método del Espectro de Capacidad

En este caso, se ha asignado a cada edificio del GIS un código de 4 caracteres, que llamamos "ID_ZTTP". El primero puede tomar los valores 1, 2, 3, o R, y especifica la zona sísmica de los suelos de la ciudad donde se halla situado el edificio. Los dos siguientes caracteres especifican la tipología y pueden tomar los valores MN para mampostería y RC para hormigón armado. El último carácter informa de la altura del edificio (H, M, L para edificios altos, de altura intermedia y de altura baja, respectivamente). Por ejemplo, el código *RRCH* hace referencia a un edificio situado

en afloramiento rocoso (R), de hormigón armado (RC) y con una altura de más de 8 plantas (H).

Por otra parte se ha construido una tabla que, para cada código ID_ZTTP, cuantifica las probabilidades de los estados de daño para los escenarios determinista y probabilista. Concretamente, NOD_DET, LEV_DET, MOD_DET, SEV_DET y COL_DET definen las probabilidades de daño de los diferentes estados de daño: nulo, leve, moderado, severo, y completo respectivamente, para el escenario determinista; NOD_PRO, LEV_PRO, MOD_PRO, SEV_PRO y COL_PRO son análogos a los anteriores para el escenario probabilista. La tabla contiene también el grado o estado de daño medio para el escenario determinista (DSM_DET) y para el escenario probabilista (DSM_PRO).

De este modo el GIS incorpora las matrices de probabilidad de daño, uniendo la tabla creada con la tabla de atributos de los edificios que se encuentra en el GIS, y que incluye también el campo ID_ZTTP (véase Figura 8.5).

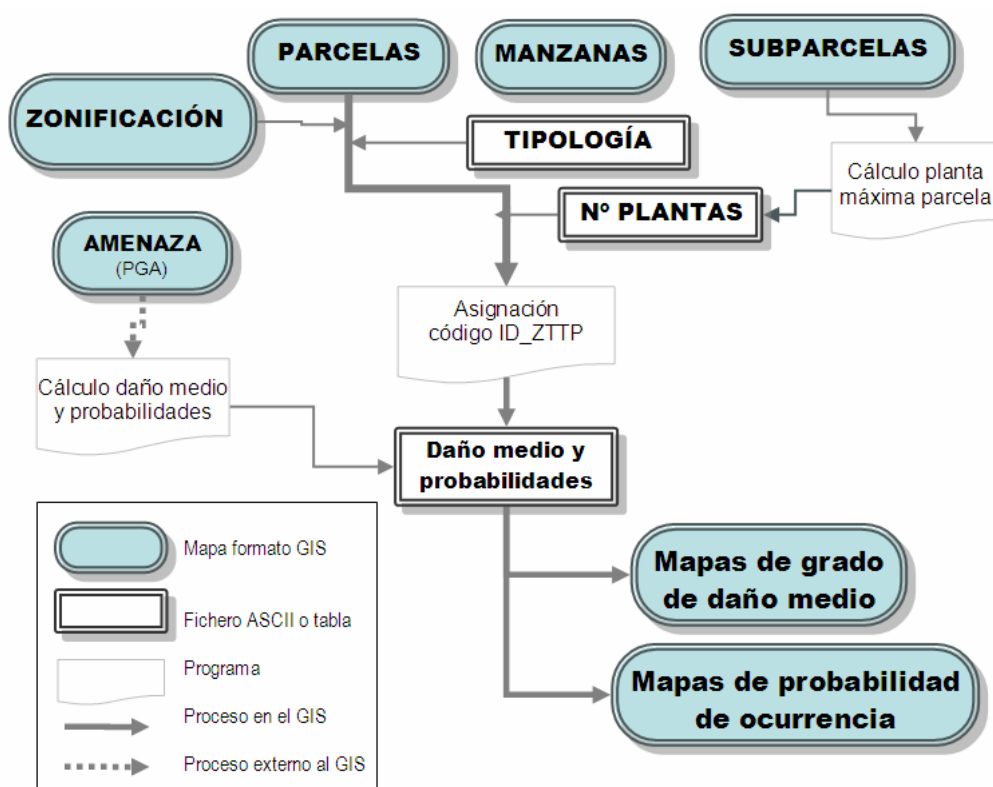


Figura 8.5. Esquema del proceso de generación de mapas daño en el GIS, según el Método del Espectro de Capacidad.

8.6 Resultados y escenarios

Las matrices de probabilidad de daño aquí obtenidas ponen de manifiesto un considerable daño esperado para escenarios sísmicos relativamente moderados, lo que es consecuencia directa de la alta vulnerabilidad y fragilidad de los edificios de la ciudad. La Tabla 8.8 sintetiza los valores máximos y mínimos de daño para el método del índice de vulnerabilidad. Los edificios de mampostería presentan estados de daño máximos mayores que los edificios de hormigón.

Tabla 8.8. Valores extremos de daño esperado con el MIV. Escenarios determinista y probabilista. Se dan los valores del grado de daño medio (DS_m), el índice de vulnerabilidad del edificio (I_v) y el suelo donde se halla.

			Método del índice de vulnerabilidad		
			DS_m	I_v	Suelo
Mampostería	Determinista	Max	4.176	1.178	III
		Min	0.057	0.423	R
	Probabilista	Max	3.976	1.218	II
		Min	0.079	0.423	R
Hormigón	Determinista	Max	3.223	1.010	III
		Min	0.048	0.360	R
	Probabilista	Max	3.097	1.070	II
		Min	0.057	0.360	R

Tanto para el escenario determinista como para el probabilista se obtienen estados de daño con valores alrededor de 4 para los edificios más vulnerables de mampostería y valores ligeramente por encima de 3 para los edificios más vulnerables de hormigón.

La zona II y la zona III es donde se dan los daños máximos esperados, en parte por la amplificación de los suelos blandos (sobre todo en la zona III para el escenario determinista) y, en parte, porque en la zona II se hallan los edificios más vulnerables. Los valores mínimos de daño se dan en la zona R, donde, además de ser menor la acción sísmica, los edificios son menos vulnerables. En cualquier caso es clara la gran heterogeneidad de los edificios de la ciudad, cubriendo índices de vulnerabilidad en un rango entre 0.36 y 1.22. Los escenarios finales de daño medio

esperado μ_D , obtenidos mediante el Método del Índice de Vulnerabilidad son fruto de esta combinación entre la acción sísmica básica, la consideración de los efectos de suelo y la distribución geográfica de edificios de una gran heterogeneidad.

La Tabla 8.9 es análoga a la anterior y refleja los valores extremos del daño esperado cuando se emplea el Método del Espectro de Capacidad.

La Figura 8.6 a Figura 8.8 muestran los escenarios de daño medio esperado (DS_m), para ambos escenarios y metodologías aplicadas, representado por los distritos, barrios y zonas de estudio (ZRP) de la ciudad de Barcelona respectivamente.

Tabla 8.9. Valores extremos de daño esperado con el MEC. Escenarios determinista y probabilista. Se dan los valores del grado de daño medio (DS_m), el tipo de edificio y el suelo donde se halla.

			Método del espectro de capacidad		
			DS_m	Tipo	Suelo
Mampostería	Determinista	Max	2.404	Ed. alto	I
		Min	0.001	Ed. Mediano	R
	Probabilista	Max	2.983	Ed. alto	I
		Min	0.025	Ed. bajo	R
Hormigón	Determinista	Max	1.960	Ed. bajo	I
		Min	0.100	Ed. alto	III
	Probabilista	Max	2.050	Ed. bajo	I
		Min	0.440	Ed. mediano	R

Los edificios de mampostería presentan grados de daño máximo mayores que los edificios de hormigón. Los máximos grados de daño se dan en terrenos tipo I, los más blandos, y el escenario probabilista produce mayores grados de daño máximo. Más próximos al estado de daño moderado (2) para el escenario determinista y el estado de daño severo (3) para el escenario probabilista.

Para los edificios de mampostería el máximo daño se da en edificios altos mientras que para hormigón los máximos se dan en edificios bajos. Sin embargo, los estados de daño mínimos son menores para los edificios de mampostería que para los edificios de hormigón. Estos grados de daño son prácticamente nulos en ambos escenarios para edificios bajos y medianos situados en la zona R. Los mínimos

estados de daño esperados para edificios de hormigón son ligeramente superiores: 0.10 para un edificio alto situado en la zona III, de características cercanas a la zona R, y 0.44 para edificios medianos situados en la zona R.

La Figura 8.9 representa la probabilidad de ocurrencia del grado de daño moderado (P_2) obtenido mediante la Ecuación [8.6] (véase también Tabla 8.6 y Tabla 8.7) para los edificios del distrito de *Ciutat Vella* y de *l'Eixample* de la ciudad de Barcelona.

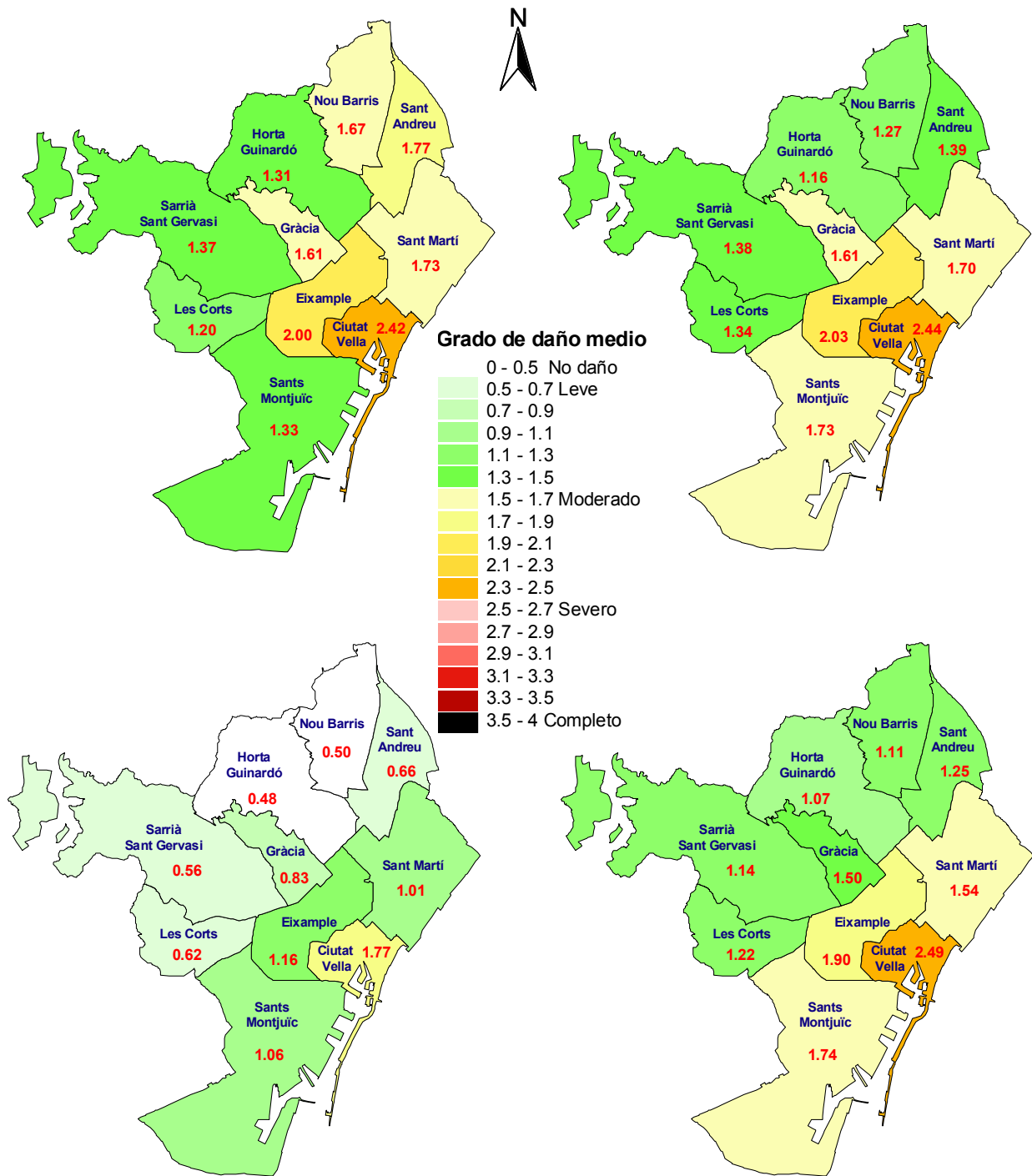


Figura 8.6. Grado de daño medio esperado (DS_m) por distritos. Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y Método del Espectro de Capacidad (abajo), para el escenario determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

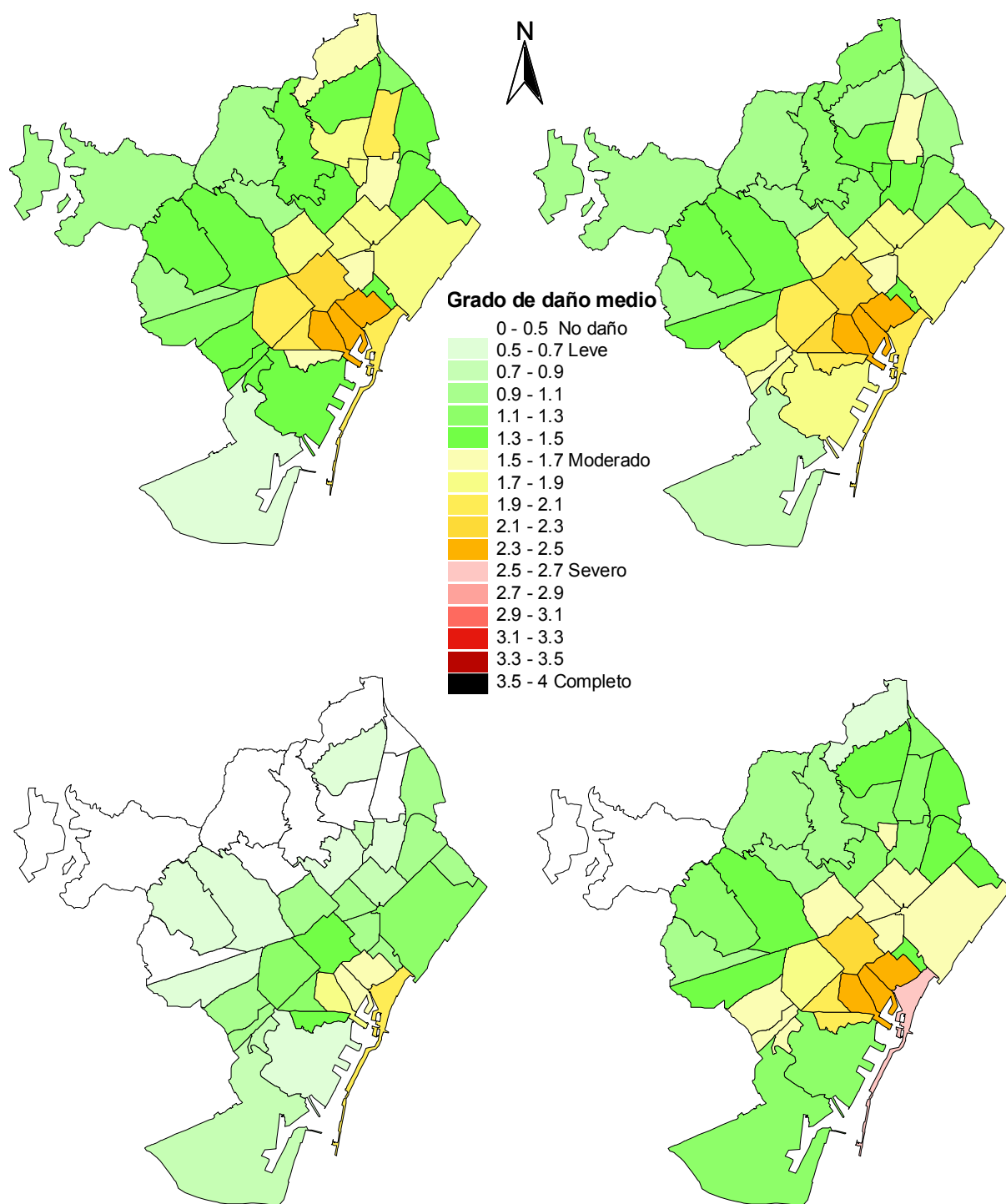


Figura 8.7. Grado de daño medio esperado (DS_m) por barrios. Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y Método del Espectro de Capacidad (abajo), para el escenario determinista (izquierda) y probabilista (izquierda).

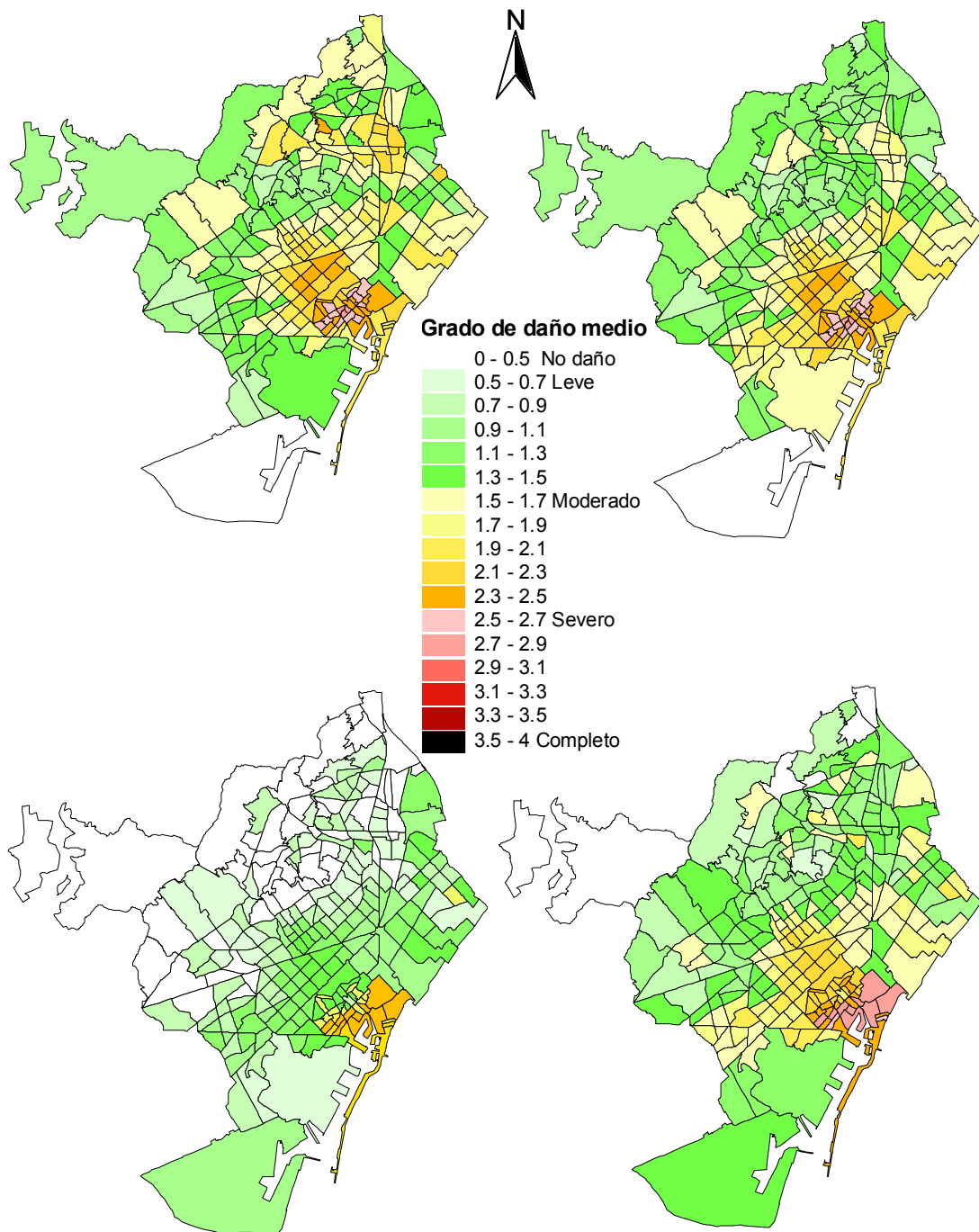


Figura 8.8. Grado de daño medio esperado (DS_m) por ZRP. Método del Índice de Vulnerabilidad (arriba) y Método del Espectro de Capacidad (abajo), para el escenario determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

e

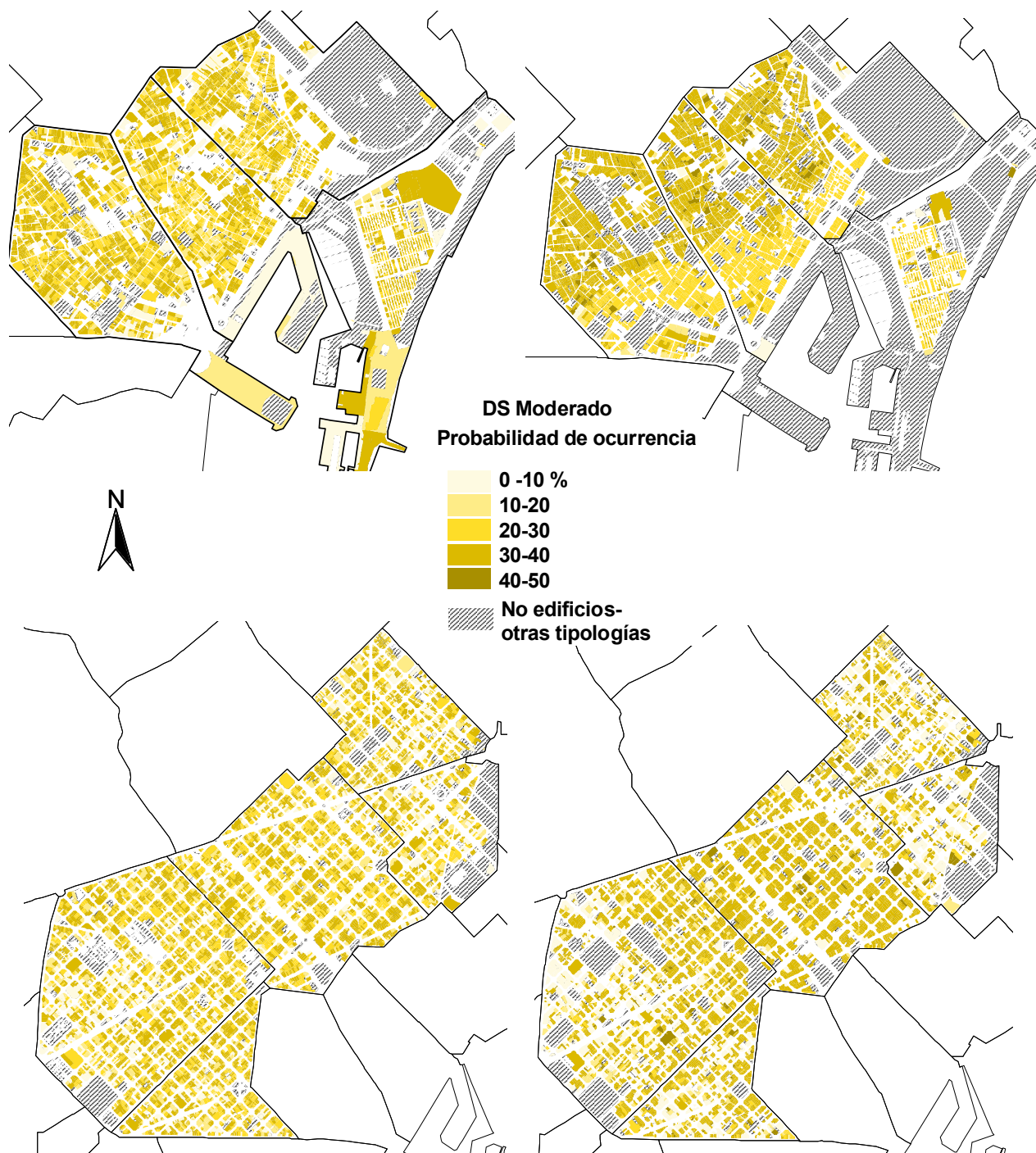


Figura 8.9. Probabilidad de ocurrencia del grado de daño moderado para el escenario probabilista según el MIV (izquierda) y el MEC (derecha) para el distrito de Ciutat Vella (arriba), y de l'Eixample (abajo).

8.7 Resumen y conclusión

En este capítulo se han desarrollado las matrices de probabilidad de daño que se usarán en el capítulo siguiente para realizar el análisis de daño y riesgo sísmico. Para ello se han definido los grados o estados de daño que consideran las dos metodologías aquí empleadas: la que se basa en índices de vulnerabilidad e intensidades macrosísmicas y la que usa espectros de capacidad, espectros de demanda y curvas de fragilidad. Las diferencias metodológicas en la caracterización de los edificios y en la definición de la acción sísmica hacen prever una complicación en la comparación de los resultados y escenarios obtenidos. Una dificultad adicional puede proceder del hecho que ambas metodologías utilizan distintos estados de daño. El Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) utiliza cinco estados de daño no nulo, de acuerdo con la escala macrosísmica europea (EMS-98); el Método del Espectro de Capacidad (MEC) usa 4 estados de daño no nulo, de acuerdo con HAZUS'99 y con el método de nivel 2 adoptado en el proyecto Risk-UE. Se define el grado de daño medio (DS_m) que es equivalente al parámetro de daño (μ_D) que define la distribución Binomial o Beta equivalente. Este parámetro indica el estado de daño más probable y puede ser utilizado para cartografiar el daño esperado. Evidentemente también se darán mapas con las probabilidades de estados de daño concretos. Ambos tipos de mapas son de gran utilidad para la predicción de otros daños inducidos, cuyo conocimiento es de vital importancia para la planificación y gestión de emergencias.

En principio, el MEC permite representar mejor tanto el edificio como la acción sísmica. El daño esperado depende de la demanda definida por el punto de desempeño que, a su vez, depende de la forma del espectro de demanda. Es bien conocido que edificios bajos pueden ser dañados por terremotos relativamente pequeños pero cercanos mientras que pueden resultar ilesos cuando sufren terremotos grandes y lejanos, debido básicamente a las diferencias en el ancho de banda de periodos y en las amplitudes espectrales correspondientes a los espectros de demanda de estos dos tipos de terremotos. Por otro lado, contrario el volumen de

trabajo necesario para desarrollar espectros de capacidad de un gran número de edificios obliga a simplificar las categorías de edificios en unas pocas tipologías, lo que le resta versatilidad cuando se compara con el MIV. En efecto, la heterogeneidad de edificios que permite reflejar el MIV se ha simplificado en seis categorías que se han representado por seis espectros de capacidad con sus correspondientes curvas de fragilidad. Esta simplificación y suavizado de las características de los edificios, las diferencias metodológicas, las diferencias en los grados o estados de daño y la diferente forma de considerar la acción sísmica, dificultan una comparación directa de los resultados y escenarios de daño obtenidos mediante estos dos métodos que, en cualquier caso, habrá que abordar con precaución.

Finalmente, las técnicas GIS han sido de gran utilidad para analizar de forma exhaustiva y georreferenciada los datos disponibles, y para incorporar la información referente a la tipología, vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño. Con respecto al método del índice de vulnerabilidad, el conocimiento de la tipología ha permitido asignar índices de vulnerabilidad medios. Este valor medio, la geometría de la planta, el número de pisos y otros detalles (como la situación del edificio dentro de un agregado y la edad), han permitido representar una amplia gama de características concretas de edificios del mismo tipo. En cuanto al MEC, se han agrupado los edificios en sólo seis categorías, cuya identificación sólo requiere conocer el número de plantas y si es de hormigón o de mampostería, lo que supone una simplificación y suavizado de la riqueza de información disponible. Se ha sacrificado la diversidad de edificios en aras de la aplicación simplificada de una metodología avanzada y de futuro.

La estimación del daño cuando se dispone del índice de vulnerabilidad y de la intensidad sísmica se efectúa de forma analítica y directa. Sin embargo, cuando se usa el MEC hay que incorporar al GIS las matrices específicas de cada tipología y escenario. Para ello se han desarrollado rutinas específicas que han permitido asociar la base de datos a tablas con las matrices de probabilidad de daño, aumentando la generalidad del tratamiento de la información y dejando listo el camino hacia la generación de escenarios de daño concretos. Así pues, una vez introducidos los datos base y programada la metodología elegida en el GIS, estas simulaciones se realizan

de forma automática. Esto permite, en cualquier momento, ajustar índices, incorporar nuevos índices para nuevas tipologías, incorporar modificadores y, en el caso del MEC, introducir nuevas matrices de probabilidad correspondientes a nuevas tipologías o a nuevos escenarios. Pero, lo que es más importante, la estructura y gestión del Sistema de Información Geográfica creado permite exportar la metodología a otras ciudades simplemente recalculando los valores de los índices de vulnerabilidad y sus modificadores regionales según el parque constructivo de la zona de estudio, o, en el caso del espectro de capacidad, incorporando nuevas tablas con las matrices de probabilidad de daño correspondientes a las tipologías y escenarios sísmicos de interés. En el capítulo siguiente se realiza esta gestión cuidadosa de esta depurada base de datos, mediante la implementación de estas dos metodologías de predicción de daño, para construir y analizar escenarios de daño sísmico para la ciudad de Barcelona.

- Bonett, R. L. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 474 pp.
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2002). *WP04: Guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings*. Genoa (Italy). pp.
- Lantada, N. y Nuñez, A. (2002). *Sistemas de Información Geográfica. Prácticas con ArcView*. Edicions UPC, Barcelona. 226 pp.
- Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings*. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.
- Moreno, R. (2006). Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en edificios: aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 332 pp.