

# Capítulo 12

## Fragilidad, desempeño y daño

### 12.1 Introducción

En Barcelona existe un interés creciente en evaluar la vulnerabilidad sísmica de la ciudad, motivada entre otros aspectos, por la discusión en los últimos años sobre la aplicación de la Norma Sísmica Española NCSE-94. Si hasta 1994, de acuerdo con la normativa P.D.S-1, Barcelona tenía asignada una intensidad de *VII* en la escala *MSK* y, se requería de un diseño sismorresistente, la normativa NCSE-94, la cual estuvo vigente durante casi 8 años, le asignó una aceleración de  $0.04 g$  para la cual, no era obligatorio considerar la acción sísmica en el diseño de edificios.

Durante los últimos 12 años, se han realizado varios estudios de evaluación global de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico existente en la ciudad (Caicedo, 1993; Yépez, 1996; Barbat et al., 1996; Mañà, 1997; Chávez, 1998; Mena, 2002), que han ido poniendo de manifiesto una alta vulnerabilidad de los edificios y, un riesgo sísmico considerable. Todos estos estudios consideran la acción sísmica en términos de intensidad *MSK* y utilizan técnicas de evaluación de la vulnerabilidad más o menos simplificadas.

En este capítulo, se aplican los procedimientos avanzados para la evaluación del desempeño y vulnerabilidad sísmica de los edificios, desarrollados en los capítulos anteriores, orientados a la obtención de escenarios de daño sísmico en el distrito más dinámico y, probablemente con un mayor peso económico y social de la ciudad: "L'Eixample".

Para determinar el punto de desempeño sísmico de estos edificios, para los tres espectros de demanda considerados en el capítulo 10, se utiliza el método N2 propuesto por Fajfar (Fajfar, 2000). Los puntos de desempeño se comparan con los límites de los estados discretos de daño o niveles de desempeño estructural, para verificar si se cumplen los objetivos básicos contemplados en la NCSE-02.

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de los tres modelos estructurales (M.1, M.2 y M.3), se utiliza una metodología analítica determinista. A partir del espectro de capacidad de cada uno de los modelos y, utilizando una función de distribu-

ción lognormal, se generan las curvas de fragilidad y se obtienen las matrices de probabilidad de daño.

A partir de la demanda de desplazamiento espectral para cada uno de los modelos y utilizando las curvas de fragilidad, se generan escenarios de daño sísmico correspondientes a los tres tipos de demanda considerados, para las estructuras de mampostería no reforzada de la zona de "l'Eixample", que pueden ser representadas mediante los tres modelos estructurales definidos en este trabajo.

Finalmente, se analiza la sensibilidad en la evaluación de la demanda de desplazamiento y vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada del Eixample, ante las incertidumbres asociadas a: 1) los parámetros estructurales, 2) los parámetros que definen la forma de los espectros de respuesta suavizados y 3) los umbrales de los estados discretos de daño.

## 12.2 Desempeño sísmico

Para evaluar el nivel de desempeño sísmico de los tres edificios de mampostería no reforzada (M.1, M.2 y M.3), se ha elegido el método N2 propuesto por Fajfar, el cual se ha explicado con detalle en el capítulo 3. El método requiere del cálculo del espectro de capacidad y la definición del espectro de demanda en formato AD. El espectro de capacidad de cada uno de los modelos, como se explicó en el capítulo 11, se obtiene mediante un análisis estático no lineal (análisis "pushover") utilizando el programa TreMuri. En cuanto a la demanda sísmica, se consideran tres tipos: el espectro de diseño de la NCSE-02 y los espectros propuestos por el ICC para la ciudad de Barcelona, a partir de un análisis determinista y probabilista de la amenaza sísmica, los cuales en adelante se denotarán por; espectro determinista - ICC y espectro probabilista - ICC, respectivamente. Para cada uno de ellos, se determina la demanda de desplazamiento espectral y se verifican los niveles de desempeño sísmico esperados, de acuerdo al objetivo de diseño de la NCSE-02. Sin embargo, es importante destacar, que para el diseño de estos edificios, no se tuvo en cuenta ninguno de estos espectros, mas aún, se puede decir que fueron diseñados sin ninguna consideración sismorresistente.

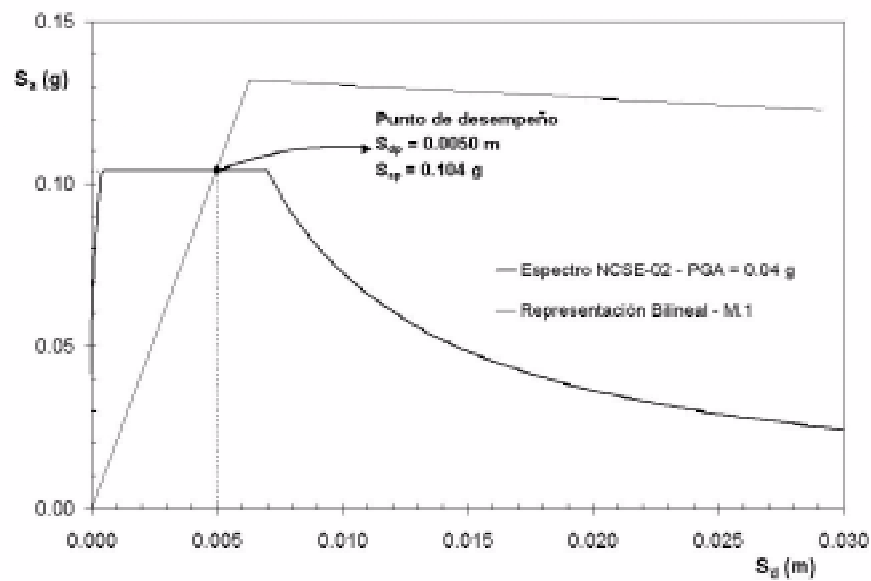
### 12.2.1 Puntos de desempeño

Los puntos de desempeño sísmico se determinan mediante el método N2. A continuación se presentan los resultados para cada uno de los casos considerados.

#### Caso NCSE-02

Las Figuras 12.1, 12.2 y 12.3 muestran la representación gráfica del punto de desempeño respectivamente de los modelos M.1, M.2 y M.3, para la demanda sísmica correspondiente al espectro de diseño propuesto por la NCSE-02, para la zona del

Ejemplo en Barcelona. Para los tres modelos, se observa que el espectro de la NCSE-02, interseca los espectros de capacidad bilineales, en el rango elástico. Por lo tanto, el factor reductor por ductilidad  $\mu$  es igual a 1.0, es decir, que el espectro de demanda corresponde directamente al espectro de respuesta propuesto por la NCSE-02. Esto significa, que la respuesta de los tres modelos estructurales permanece dentro del rango elástico.



**Figura 12.1.** Punto de desempeño sísmico del Modelo M.1 (4 niveles) - Caso NCSE-02.

La Tabla 12.1 muestra los valores obtenidos de la demanda de desplazamiento y aceleración para los tres modelos.

Modelo	No. Niveles	$S_{dp}$ (cm)	$S_{ap}$ (g)
M.1	4	0.50	0.104
M.2	5	0.57	0.104
M.3	6	0.67	0.104

**Tabla 12.1.** Puntos de desempeño para los tres modelos de mampostería. Caso NCSE-02.

### Caso ICC determinista

Las Figuras 12.4, 12.5 y 12.6 muestran la representación gráfica del punto de desempeño de los modelos M.1, M.2 y M.3 respectivamente, para la demanda sísmica correspondiente al espectro determinista propuesto por el ICC para la zona de

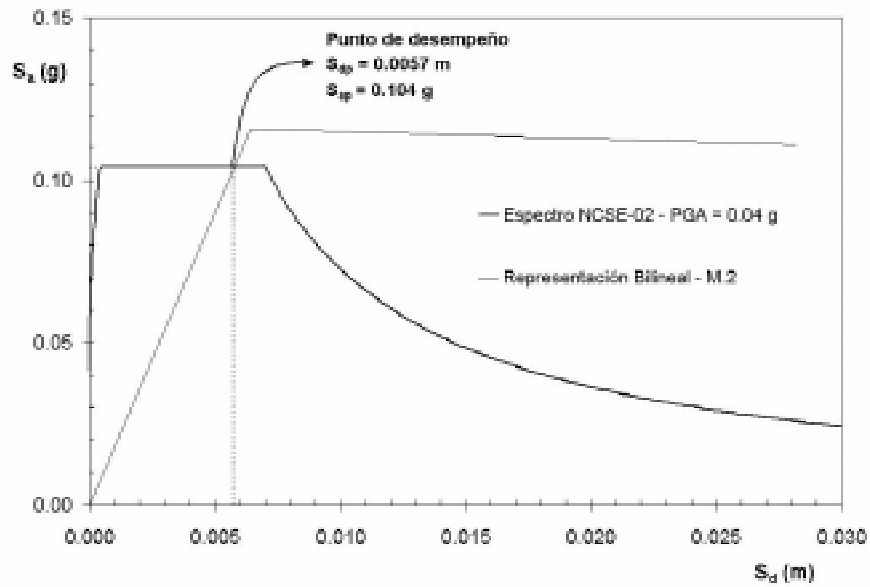


Figura 12.2. Punto de desempeño sísmico del Modelo M.2 (5 niveles) - Caso NCSE-02.

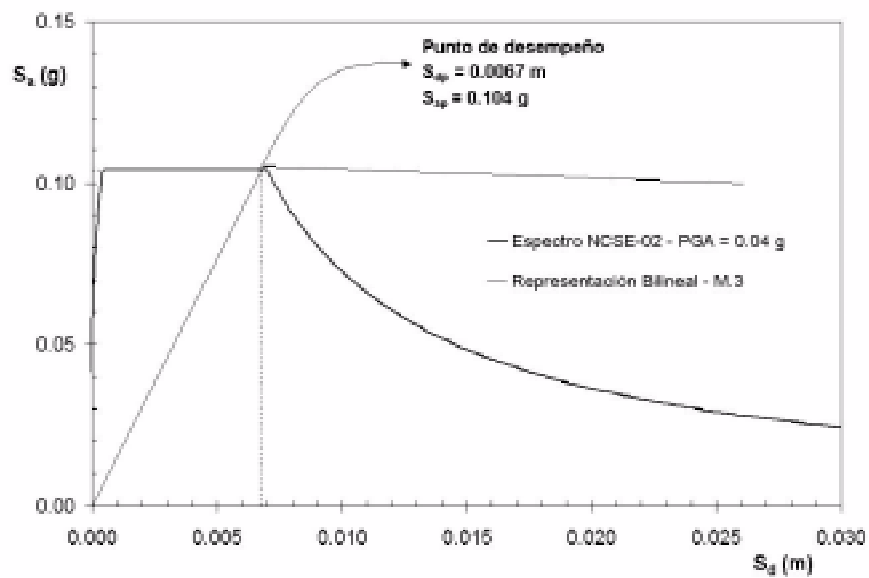
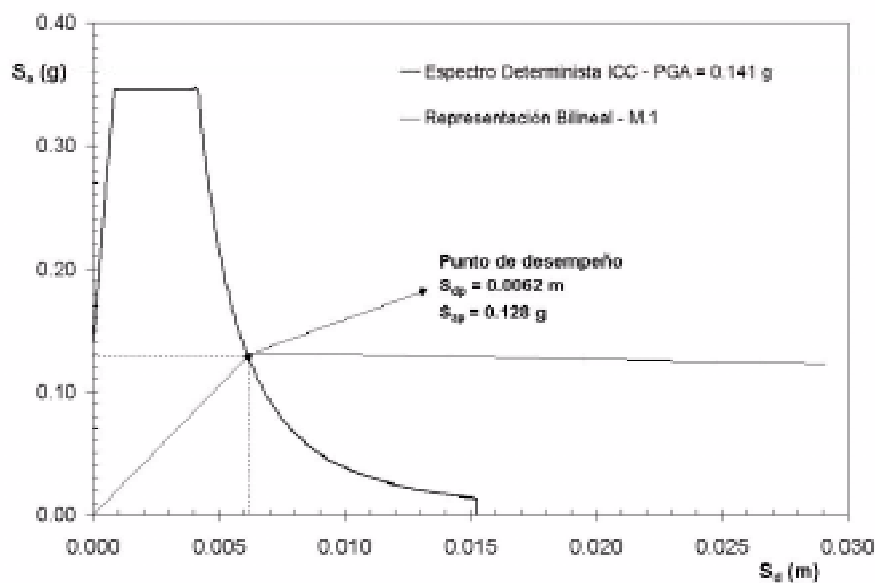


Figura 12.3. Punto de desempeño sísmico del Modelo M.3 (6 niveles) - Caso NCSE-02.

l'Eixample en Barcelona. En este caso, la situación es similar a la obtenida para la demanda de la NCSE-02, es decir, que la respuesta de los modelos estructurales, se mantiene dentro del rango elástico y, por lo tanto, no es necesario hacer ninguna reducción del espectro de demanda.



**Figura 12.4.** Punto de desempeño sísmico del Modelo M.1 (4 niveles) - Caso ICC determinista.

La Tabla 12.2 muestra los valores obtenidos de la demanda de desplazamiento y aceleración para los tres modelos.

Modelo	No. Niveles	$S_{dp}$ (cm)	$S_{ap}$ (g)
M.1	4	0.62	0.128
M.2	5	0.64	0.116
M.3	6	0.67	0.102

**Tabla 12.2.** Puntos de desempeño para los tres modelos de mampostería. Caso ICC determinista.

### Caso ICC probabilista

Las Figuras 12.7, 12.8 y 12.9 muestran la representación gráfica del punto de desempeño de los modelos M.1, M.2 y M.3 respectivamente, para la demanda sísmica correspondiente al espectro probabilista propuesto por el ICC para la zona de

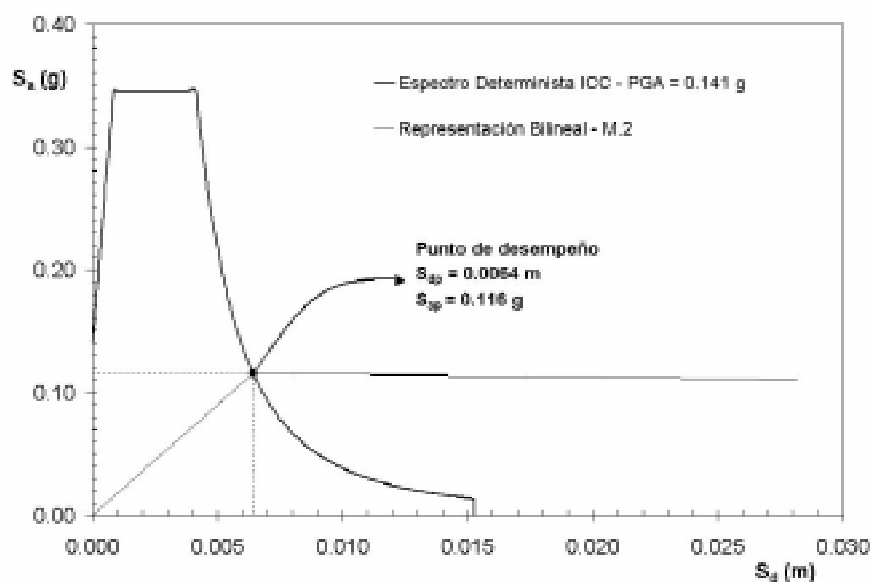


Figura 12.5. Punto de desempeño sísmico del Modelo M.2 (5 niveles) - Caso ICC determinista.

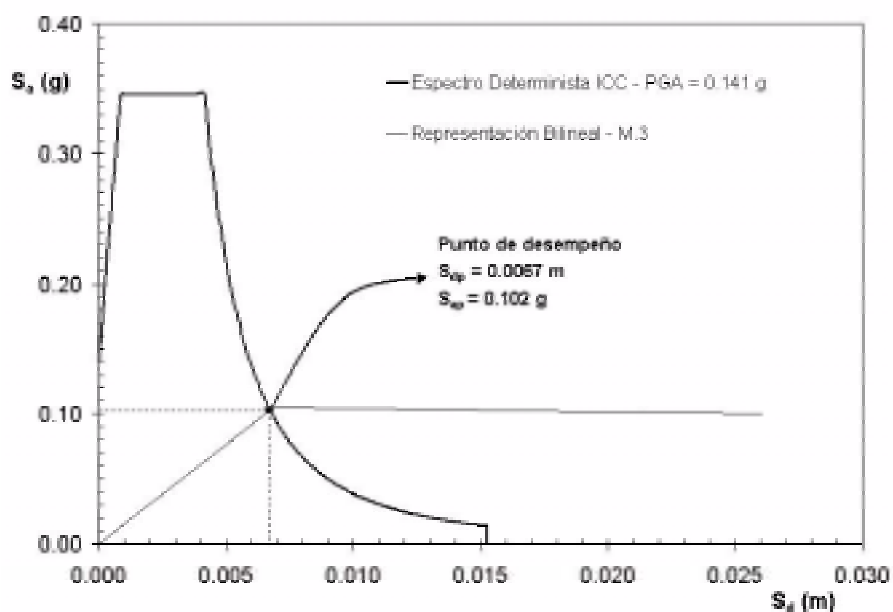
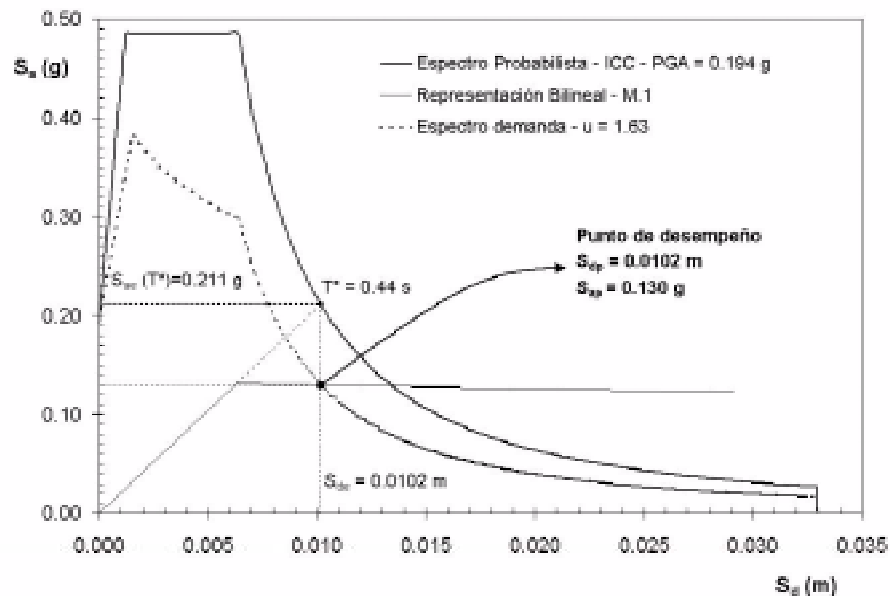


Figura 12.6. Punto de desempeño sísmico del Modelo M.3 (6 niveles) - Caso ICC determinista.

l'Eixample en Barcelona. En este caso, el punto de desempeño de los tres modelos queda fuera del rango elástico, por lo tanto, es necesario reducir el espectro probabilista del ICC por un factor de ductilidad  $\mu$ , el cual se indica como "u" en cada una de las Figuras.



**Figura 12.7.** Punto de desempeño sísmico del Modelo M.1 (4 niveles) - Caso ICC probabilista.

La Tabla 12.3 muestra los valores obtenidos de la demanda de desplazamiento y aceleración para los tres modelos.

Modelo	No. Niveles	$S_{dp}$ (cm)	$S_{ap}$ (g)
M.1	4	1.02	0.130
M.2	5	1.07	0.115
M.3	6	1.13	0.104

**Tabla 12.3.** Puntos de desempeño para los tres modelos de mampostería. Caso ICC probabilista.

### 12.2.2 Límites de los estados de daño

Para determinar los límites de los estados de daño o niveles de desempeño de los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample, no se dispone ni de ensayos de laboratorio, ni de valores calibrados a partir de los daños observados durante

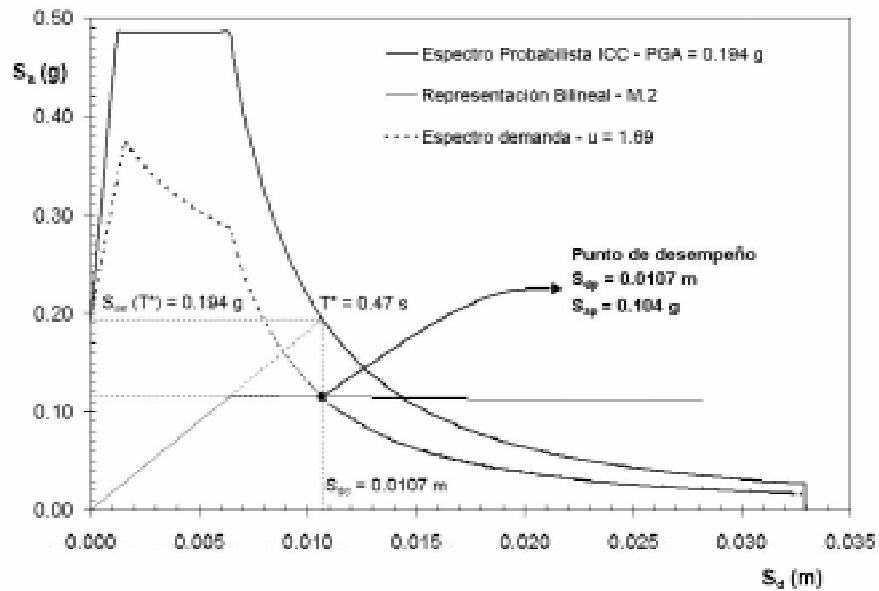


Figura 12.8. Punto de desempeño sísmico del Modelo M.2 (5 niveles) - Caso ICC probabilista.

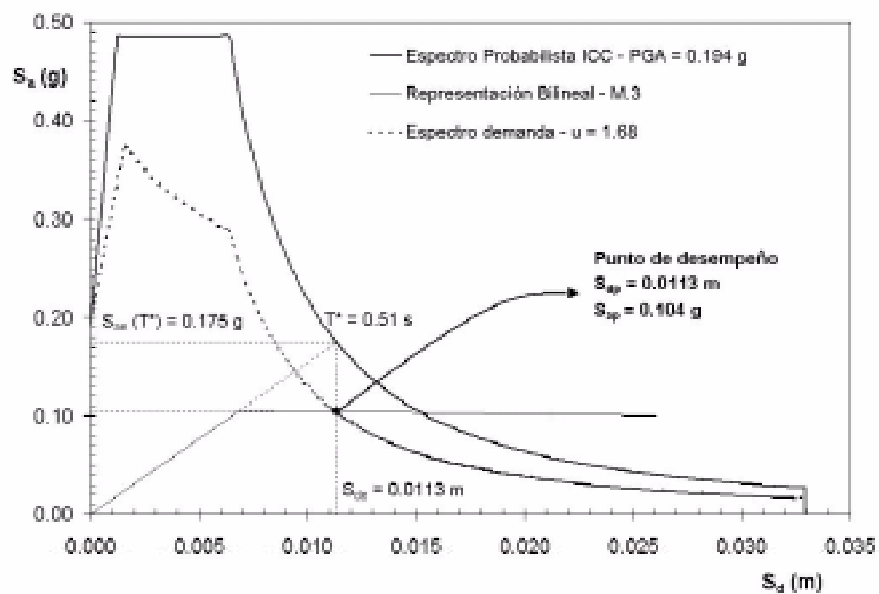


Figura 12.9. Punto de desempeño sísmico del Modelo M.3 (6 niveles) - Caso ICC probabilista.



movimientos sísmicos. Adicionalmente, tal y como se mencionó anteriormente, no se conocen muy bien los valores de las propiedades mecánicas de los materiales de esta tipología. Considerando todos estos aspectos, los umbrales de desplazamiento espectral para los estados discretos de daño, se definen en función de los parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad, esto es, el desplazamiento de cedencia  $D_y$  y el desplazamiento de la capacidad última  $D_u$ . La Tabla 12.4 muestra las expresiones propuestas por Lagomarsino et al., (2003) para definir los intervalos de variación del desplazamiento espectral para los cinco estados de daño considerados: sin daño, leve, moderado, severo y colapso.

Estado de daño	Intervalo de $S_d$
Sin daño	$S_d \leq 0.7D_y^*$
Leve	$0.7D_y^* < S_d \leq D_y^*$
Moderado	$D_y^* < S_d \leq D_y^* + 0.25 \cdot (D_u^* - D_y^*)$
Severo	$D_y^* + 0.25 \cdot (D_u^* - D_y^*) < S_d \leq D_u^*$
Colapso	$S_d > D_u^*$

**Tabla 12.4.** Intervalos de variación del desplazamiento espectral para los estados discretos de daño (Lagomarsino et al., 2002).

A partir de las expresiones contenidas en la Tabla 12.4 y, utilizando los valores obtenidos de  $D_y^*$  y  $D_u^*$  para los tres modelos (ver Tabla 11.4), se obtienen los correspondientes umbrales de desplazamiento espectral para los cinco estados de daño. Las Tablas 12.5, 12.6 y 12.7, muestran estos intervalos para los modelos M.1, M.2 y M.3, respectivamente.

Estado de daño	Intervalo de $S_d$ (cm)
Sin daño	$S_d \leq 0.44$
Leve	$0.44 < S_d \leq 0.63$
Moderado	$0.63 < S_d \leq 1.20$
Severo	$1.20 < S_d \leq 2.91$
Colapso	$S_d > 2.91$

**Tabla 12.5.** Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.1.

Estado de daño	Intervalo de $S_d$ (cm)
Sin daño	$S_d \leq 0.45$
Leve	$0.45 < S_d \leq 0.64$
Moderado	$0.64 < S_d \leq 1.18$
Severo	$1.18 < S_d \leq 2.82$
Colapso	$S_d > 2.82$

**Tabla 12.6.** Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.2.

Estado de daño	Intervalo de $S_d$ (cm)
Sin daño	$S_d \leq 0.48$
Leve	$0.48 < S_d \leq 0.69$
Moderado	$0.69 < S_d \leq 1.17$
Severo	$1.17 < S_d \leq 2.61$
Colapso	$S_d > 2.61$

**Tabla 12.7.** Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.3.

### Umbrales de daño propuestos por Calvi (1999)

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio de construcciones de mampostería de arcilla realizados por Magenes y Calvi (1997), este último (Calvi, 1999) propone ciertos umbrales de deriva máxima entre piso  $\delta_{\max}$  para cinco estados de daño: sin daño, leve, moderado, severo y colapso (ver Tabla 12.8).

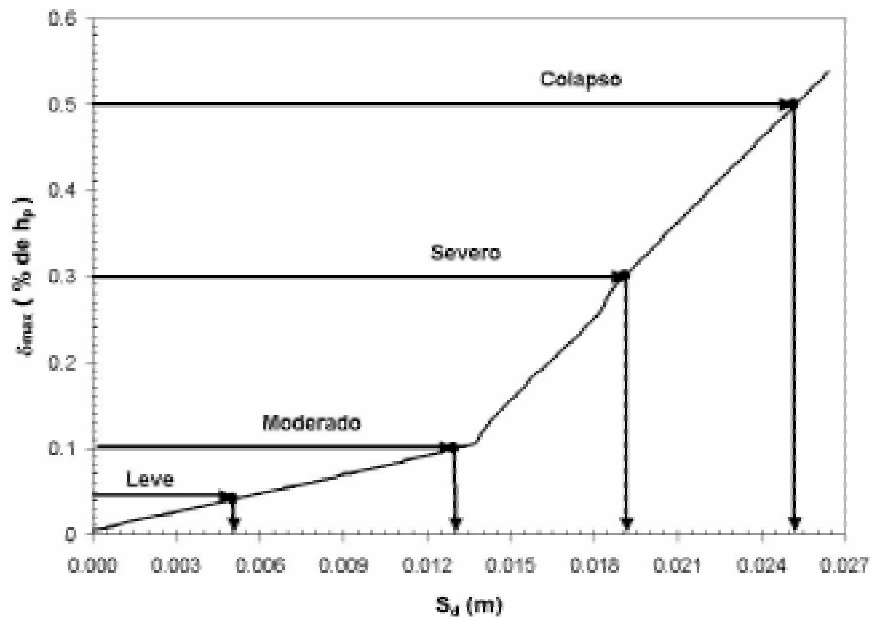
Estado de daño	Intervalo de deriva $\delta_{\max}$ (% de $h_p$ )
Sin daño	$\delta_{\max} < 0.045$
Leve	$0.045 < \delta_{\max} \leq 0.10$
Moderado	$0.10 < \delta_{\max} \leq 0.30$
Severo	$0.30 < \delta_{\max} \leq 0.50$
Colapso	$\delta_{\max} > 0.50$

**Tabla 12.8.** Límites de los estados de daño para estructuras de mampostería no reforzada (Calvi, 1999).

No obstante, para representar estos umbrales de daño sobre el espectro de capacidad, es necesario determinar los desplazamientos espectrales asociados a los valores límites de deriva máxima entre piso. Para ello, se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Se construye una gráfica que relaciona los valores de desplazamiento espectral con las correspondientes derivas máximas obtenidas en cada paso del análisis "pushover" (ver Figura 12.10).
2. Se entra en la curva de la Figura 12.10 con los valores máximos de la deriva máxima entre piso de la Tabla 12.4 y, se encuentran los correspondientes valores de desplazamiento espectral.

Con los valores de desplazamiento espectral encontrados en el paso anterior, se definen los límites de los estados de daño directamente sobre el espectro de capacidad, tal y como puede verse en la Figura 12.11, donde se han superpuesto los límites propuestos por Calvi (1999) y Lagomarsino et al. (2002).



**Figura 12.10.** Relación entre los valores de desplazamiento espectral y las derivas máximas entre piso.

Este procedimiento ha sido aplicado al modelo M.3. Los valores de desplazamiento espectral obtenidos se muestran en la Tabla 12.9.

Estado de daño	Intervalo $S_d$ (cm)
Sin daño	$S_d \leq 0.58$
Leve	$0.58 < S_d \leq 1.29$
Moderado	$1.29 < S_d \leq 1.90$
Severo	$1.90 < S_d \leq 2.50$
Colapso	$S_d \geq 2.50$

**Tabla 12.9.** Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.3, obtenidos a partir de la propuesta de Calvi (1999).

Los valores obtenidos a partir de la propuesta de Calvi, difieren considerablemente de los umbrales propuestos por Lagomarsino et al., (2002) para los estados de daño leve (21 %), moderado (87 %) y severo (63 %). Estas diferencias, influyen considerablemente en la determinación del nivel de desempeño de las estructuras analizadas, como se muestra más adelante y ponen de manifiesto la importancia de realizar análisis específicos de mayor detalle cuando se aplican este tipo de técnicas. Así pues, a la vista de la Figura 12.11, parecen más razonables en este caso, la propuesta de Lagomarsino et al. (2002), que se adoptará en el presente trabajo.

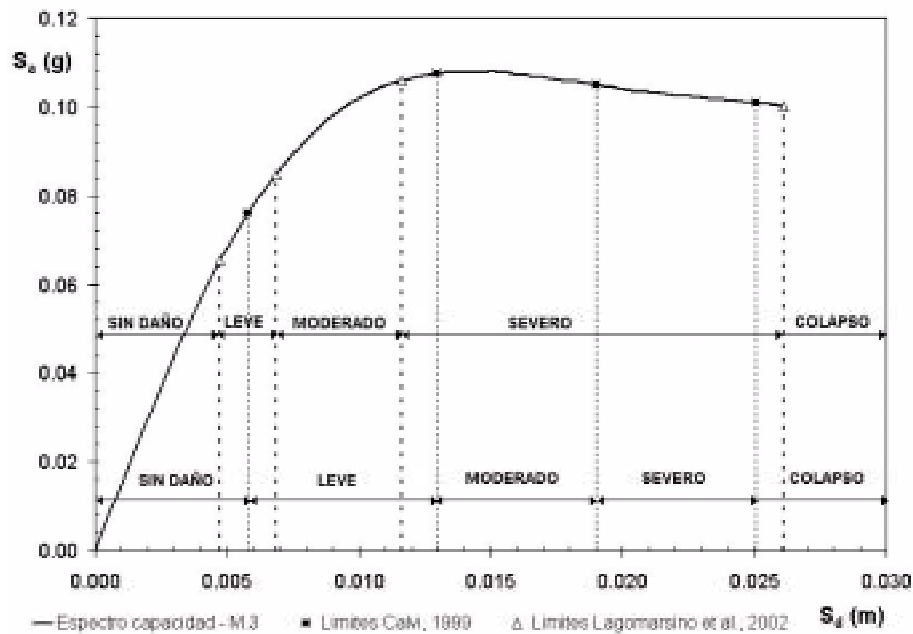


Figura 12.11. Umbrales de desplazamiento espectral para el modelo M.3.

### 12.2.3 Verificación de los objetivos de desempeño

Los tres espectros considerados en este trabajo, representan el movimiento sísmico de diseño para los edificios construidos en la zona del Eixample en Barcelona. Por lo tanto, se tomará como objetivo de desempeño el que se propone en la NCSE-02, esto es: *evitar pérdidas de vidas humanas y reducir el daño y el coste económico que puedan ocasionar los terremotos futuros*. Este objetivo puede ser representado por el nivel de desempeño de *Seguridad*, de acuerdo a la propuesta del comité VISION 2000 para estructuras básicas (ver la Tabla 3.1). Es importante tener en cuenta que ninguno de estos edificios fue diseñado para resistir cargas sísmicas, no obstante, la actual normativa de diseño obliga a considerar la acción sísmica en Barcelona y, por lo tanto, la capacidad resistente de los edificios existentes para este tipo de acción conviene que sea evaluada.

Para verificar el cumplimiento de este objetivo, es necesario establecer en qué intervalos caen los puntos de desempeño de los tres modelos estructurales. Las Tablas 12.10, 12.11 y 12.12, muestran los estados de daño y los niveles de desempeño de los modelos M.1, M.2 y M.3 respectivamente, obtenidos para los tres espectros de demanda considerados y utilizando los umbrales de daño propuestos por Lagomarsino et al., (2002).

Espectro de Demanda	$S_d$ (cm)	Estado de daño	Nivel de desempeño
NCSE-02	0.50	Leve	Operacional
ICC Determinista	0.62	Leve	Operacional
ICC Probabilista	1.02	Moderado	Seguridad

**Tabla 12.10.** Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.1.

Espectro de Demanda	$S_d$ (cm)	Estado de daño	Nivel de desempeño
NCSE-02	0.57	Leve	Operacional
ICC Determinista	0.64	Moderado	Seguridad
ICC Probabilista	1.07	Moderado	Seguridad

**Tabla 12.11.** Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.2.

Espectro de Demanda	$S_d$ (cm)	Estado de daño	Nivel de desempeño
NCSE-02	0.67	Leve	Operacional
ICC Determinista	0.67	Leve	Operacional
ICC Probabilista	1.13	Moderado	Seguridad

**Tabla 12.12.** Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.3.

De acuerdo con estas tres Tablas, los tres modelos cumplen satisfactoriamente el objetivo de desempeño enunciado, ya que en ningún caso se pone en peligro la seguridad de los ocupantes y, adicionalmente, los daños estructurales son moderados, con lo cual, la reparación de los daños estructurales es viable desde el punto de vista económico. Estos resultados inducen a pensar que los edificios del Eixample no son muy vulnerables, no obstante, como se verá más adelante, cuando se consideran las incertidumbres en los parámetros estructurales y en los parámetros que definen la forma del espectro de demanda, el comportamiento de los edificios frente a la acción sísmica, muestra un rango de variación amplio, dentro del cual, se observan incluso daños severos en los edificios que corresponden a un nivel de desempeño de precolapso.

A partir de los umbrales de daño calculados de acuerdo a la propuesta de Calvi, se puede analizar la influencia de estos valores sobre el nivel de desempeño de las estructuras. La Tabla 12.13 muestra los estados de daño y el nivel de desempeño del modelo M.3, obtenidos a partir de los umbrales de daño de Calvi (ver también Tabla 12.9).

Espectro de Demanda	$S_d$ (cm)	Estado de daño	Nivel de desempeño
NCSE-02	0.67	Leve	Operacional
ICC Determinista	0.67	Leve	Operacional
ICC Probabilista	1.13	Leve	Operacional

**Tabla 12.13.** Estados de daño y niveles de desempeño para el modelo M.3. Umbrales de daño de Calvi.

Si se comparan las Tablas 12.12 y 12.13, se observa que para el espectro de demanda de la NCSE-02 y el espectro determinista del ICC, el estado de daño y el nivel de desempeño de la estructura no varían. Esto es debido a que el espectro de capacidad interseca a ambos espectros en el rango elástico. Para el caso del espectro probabilista del ICC, el daño pasa de moderado a leve, variando obviamente el nivel de desempeño que para este caso corresponde al "operacional".

## 12.3 Vulnerabilidad sísmica

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada del Eixample de 4, 5 y 6 niveles, representados por los modelos M.1, M.2 y M.3, respectivamente, se utiliza un método analítico determinista. Se ha descartado el uso de un procedimiento estocástico, expuesto en la primera parte como el más idóneo para evaluar la vulnerabilidad sísmica, debido al alto costo en tiempo computacional que implica el combinar una simulación por el método de Monte Carlo, con un análisis dinámico no lineal de estos modelos. La dificultad está en el uso de los macro elementos y en la eficiencia del programa TreMuri para realizar este tipo de análisis.

El método analítico que se utiliza en este caso, ha sido desarrollado por el grupo de trabajo del proyecto Europeo RISK-UE (*"An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns"*), encargado de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios básicos (*"Workpackage 4 - Vulnerability assessment of current buildings"*). El método consiste en generar curvas de fragilidad a partir de la suposición que la probabilidad de alcanzar o exceder un determinado estado de daño, sigue una distribución lognormal. Por lo tanto, para un desplazamiento espectral y un estado de daño, esta probabilidad se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$P [ED \geq ED_i | S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ED_i}} \ln \left( \frac{S_d}{\bar{S}_{d,ED_i}} \right) \right] \quad (12.1)$$

$\bar{S}_{d,ED_i}$  es el valor medio del desplazamiento espectral en el cual la estructura alcanza el umbral del estado de daño  $ED_i$ ,  $\beta_{ED_i}$  es la desviación estándar del lo-

garitmo natural de este desplazamiento espectral y  $\Phi$  es la función de distribución normal estándar acumulada. El subíndice " $i$ " representa los estados discretos de daño, esto es: leve ( $i = 1$ ), moderado ( $i = 2$ ), severo ( $i = 3$ ) y colapso ( $i = 4$ ).

Para calcular las probabilidades a partir de la función de distribución  $\Phi[\cdot]$  de la ecuación (12.1), es necesario definir  $\overline{S}_{d,ED_i}$  y  $\beta_{ED_i}$  para cada estado de daño. Para ello, se describe a continuación el procedimiento empleado en el proyecto RISK-UE para determinar estos dos parámetros.

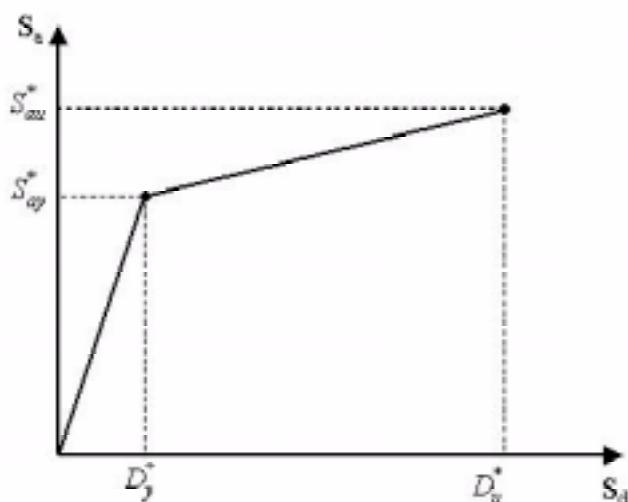
### 12.3.1 Parámetros de la función de distribución lognormal

El procedimiento propuesto en RISK-UE, une dos metodologías adoptadas para estimar la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes, las cuales han sido referenciadas dentro del proyecto como metodología del nivel I y nivel II. La primera de ellas, corresponde a una técnica indirecta de evaluación del daño a gran escala, que utiliza un índice de vulnerabilidad convencional  $V_I$ , para representar la pertenencia de una estructura a una clase de vulnerabilidad determinada. Los valores numéricos de  $V_I$  sólo se utilizan como indicadores para cuantificar de una forma convencional el comportamiento de una estructura. Este índice tiene en cuenta factores tales como: la edad de la construcción, el número de niveles, las irregularidades en elevación, etc. Los valores de  $V_I$  se pueden definir a partir de la opinión de expertos. La función de distribución de probabilidad correspondiente a las curvas de fragilidad, se obtienen a partir de un caso particular de la función de distribución beta, que representa bien la distribución binomial, que puede ser caracterizada por el grado de daño medio  $\mu_D$ . Este parámetro a su vez se puede calcular como función de la intensidad del movimiento  $I$  (EMS-98) y del índice de vulnerabilidad  $V_I$ .

En cuanto a la metodología del nivel II, ésta corresponde a una técnica de análisis detallada, que utiliza el método N2, para evaluar el punto de desempeño de las estructuras. A partir de los umbrales de desplazamiento espectral para cada estado de daño, se determina el nivel de desempeño de las estructuras, que es una medida directa de su vulnerabilidad.

El procedimiento empleado para obtener los parámetros  $\overline{S}_{d,ED_i}$ ,  $\beta_{ED_i}$  y, generar las curvas de fragilidad para los edificios de "l'Eixample" se describe mediante los siguientes pasos (Moreno et al., 2003):

1. Cálculo de los parámetros que definen la representación bilineal del espectro de capacidad para cada uno de los modelos, esto es: las coordenadas del punto de cedencia ( $D_y^*$ ,  $S_{ay}^*$ ) y las coordenadas del punto de capacidad última ( $D_u^*$ ,  $S_{au}^*$ ). La Figura 12.12 muestra el significado de estos dos puntos.
2. Definición de los valores medios de desplazamiento espectral  $\overline{S}_{di}$  para cada uno de los estados de daño  $ED_i$ , a partir de los parámetros del espectro de capacidad bilineal. Esta propuesta corresponde a la definición de los umbrales de daño propuestos por Lagomarsino et al (2002), los cuales se han presentado



**Figura 12.12.** Representación bilineal del espectro de capacidad.

en la Tabla 12.4. Suponiendo la siguiente notación para los estado de daño: sin daño (0), leve (1), moderado (2), severo (3) y colapso (4), los valores de desplazamiento espectral medio se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\overline{S_{d1}} = 0.7D_y^* \quad (12.2)$$

$$\overline{S_{d2}} = D_y^* \quad (12.3)$$

$$\overline{S_{d3}} = D_y^* + 0.25(D_u^* - D_y^*) \quad (12.4)$$

$$\overline{S_{d4}} = D_u^* \quad (12.5)$$

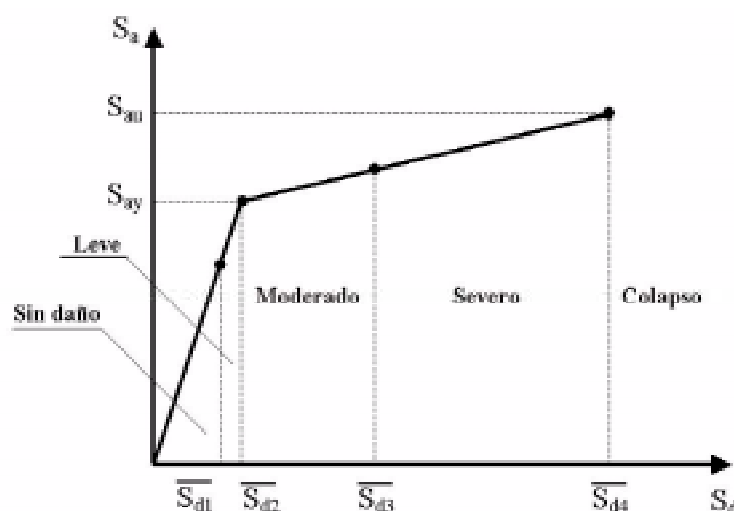
La Figura 12.13 muestra la representación gráfica de estos desplazamientos sobre el espectro de capacidad.

3. Estimación de la desviación estándar  $\beta_{ED_i}$  correspondiente a cada desplazamiento espectral medio  $\overline{S_{di}}$ . Para ello, se supone que la probabilidad de cada estado de daño en su desplazamiento espectral medio, es igual al 50 % y, la probabilidad de los otros estados de daño, siguen la misma distribución Beta (o binomial) utilizada en la metodología del nivel I. Esta distribución es función del grado de daño medio  $\mu_D$ , el cual se define como:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (12.6)$$

$I$  es la intensidad de la EMS-98 y  $V_I$  es el índice de vulnerabilidad que varía entre 0 y 1. El valor de  $\mu_D$  varía entre 0 y 4.





**Figura 12.13.** Representación de los valores medios de desplazamiento espectral sobre el espectro de capacidad.

La Función de Distribución de Probabilidad Beta continua (*FDP*) se utiliza para obtener la distribución de probabilidad discreta, correspondiente a los 4 estados de daño. Esta distribución Beta se define como:

$$FDP = P_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x < b \quad (12.7)$$

$\Gamma$  es la función Gamma,  $a = 0$  y  $b = 4$ ;  $t = 8$  es el valor que hace que esta distribución se ajuste bien a una distribución binomial, la cual, se señala en la escala de intensidad EMS-98, como la que mejor ajusta la distribución de los daños observados.  $r$  es una función de  $t$  y  $\mu_D$  definida por la siguiente ecuación:

$$r = t \cdot (0.007\mu_D^3 - 0.0525\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad (12.8)$$

donde como se mencionó antes,  $t = 8$ .

La probabilidad de que el daño sea mayor o igual a un grado de daño, se obtiene integrando la función *FDP* entre 0 y el grado de daño correspondiente. La Figura 12.14 ilustra lo enunciado para un grado de daño igual a 2.

Para obtener la distribución de probabilidad discreta, se calculan los valores de  $\mu_D$  tales que la probabilidad de que el daño sea menor o igual que el estado de daño  $x$ , sea menor o igual al 50 %. En otras palabras,  $P_{\beta}(x) = 0.5$  para  $x = 1, 2, 3$  y 4.

La Tabla 12.14 presenta los valores de  $\mu_D$  obtenidos para el modelo M.3, junto con las probabilidades de que cada estado de daño sea excedido, calculadas como  $1 - P_{\beta}(x)$ , para  $x = 1, 2, 3$  y 4.

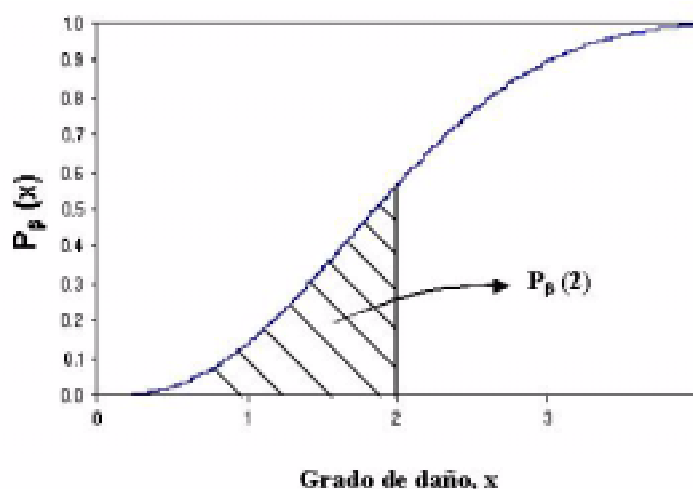


Figura 12.14. Función de distribución de probabilidad beta.

Estado de daño	Condición	$\mu_D$	$P_\beta(1)$	$P_\beta(2)$	$P_\beta(3)$	$P_\beta(4)$
Leve	$P_\beta(1) = 0.50$	0.911	0.500	0.119	0.012	0.000
Moderado	$P_\beta(2) = 0.50$	1.919	0.896	0.500	0.135	0.008
Severo	$P_\beta(3) = 0.50$	3.081	0.992	0.866	0.500	0.104
Colapso	$P_\beta(4) = 0.50$	4.089	1.000	0.988	0.881	0.500

Tabla 12.14. Distribución discreta de las probabilidades de que cada estado de daño sea excedido cuando  $P_\beta = 0.5$  para  $x = 1, 2, 3$  y  $4$ .

- Finalmente, la desviación estándar se obtiene a partir del ajuste por mínimos cuadrados de la función de distribución lognormal  $\Phi[\cdot]$  de la ecuación (12.1) a los puntos de la Tabla 12.14. La Figura 12.15 muestra un ejemplo de este ajuste para el estado de daño moderado del modelo M.3.

### 12.3.2 Curvas de Fragilidad y matrices de probabilidad de daño

A partir del procedimiento descrito en la sección anterior, se obtienen las curvas de fragilidad para los tres modelos de edificios de mampostería no reforzada de la zona de "l'Eixample" en Barcelona. Las Tablas 12.15, 12.16 y 12.17, muestran los parámetros de la función de distribución lognormal para los modelos M.1, M.2 y M.3, respectivamente.

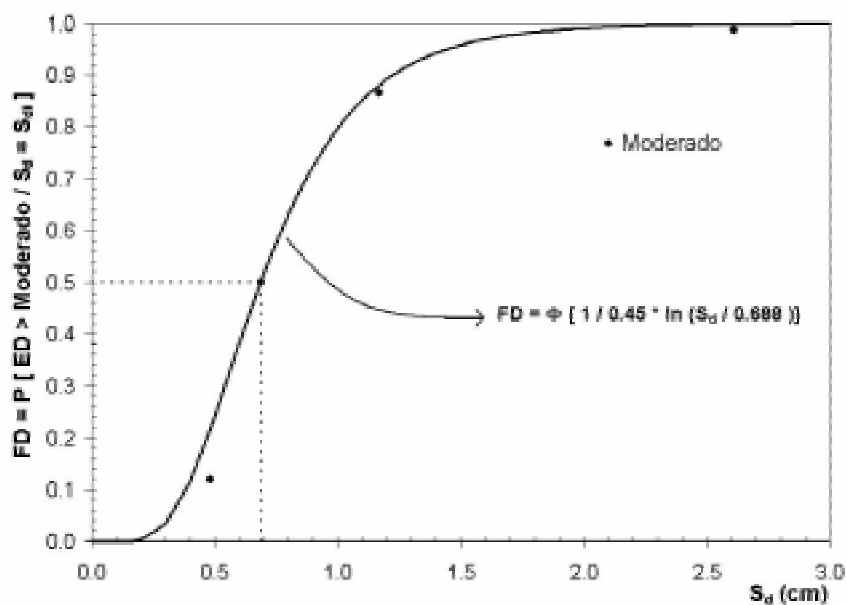


Figura 12.15. Ajuste de una fdp lognormal para el estado de daño moderado. Modelo M.3.

Estado de daño	$\bar{S}_d$ (cm)	$\beta_{ED_i}$
Leve	0.385	0.40
Moderado	0.630	0.50
Severo	1.201	0.75
Colapso	2.915	0.70

Tabla 12.15. Parámetros de la función de distribución lognormal - Modelo M.1.

Estado de daño	$\bar{S}_d$ (cm)	$\beta_{ED_i}$
Leve	0.451	0.30
Moderado	0.644	0.50
Severo	1.183	0.75
Colapso	2.800	0.70

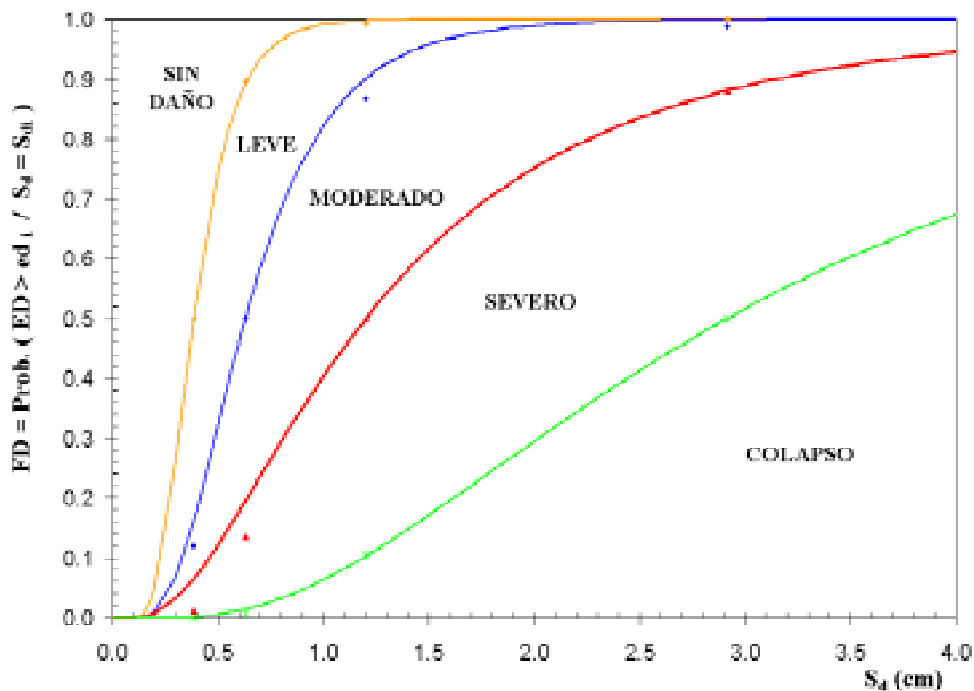
Tabla 12.16. Parámetros de la función de distribución lognormal - Modelo M.2.

Estado de daño	$\bar{S}_d$ (cm)	$\beta_{ED_i}$
Leve	0.481	0.30
Moderado	0.688	0.45
Severo	1.168	0.65
Colapso	2.610	0.65

**Tabla 12.17.** Parámetros de la función de distribución lognormal - Modelo M.3.

A partir de los parámetros de estas Tablas y, utilizando la ecuación (12.1), se obtienen las curvas de fragilidad para los tres modelos (ver Figuras 12.16, 12.17 y 12.18).

Las Tablas 12.18, 12.19 y 12.20 muestran las matrices de probabilidad de daño de los modelos M.1, M.2 y M.3, respectivamente. Los valores de  $\bar{S}_d$  corresponden al desplazamiento medio de cada uno de los estados de daño.



**Figura 12.16.** Curvas de fragilidad del edificio de 4 niveles (modelo M.1).

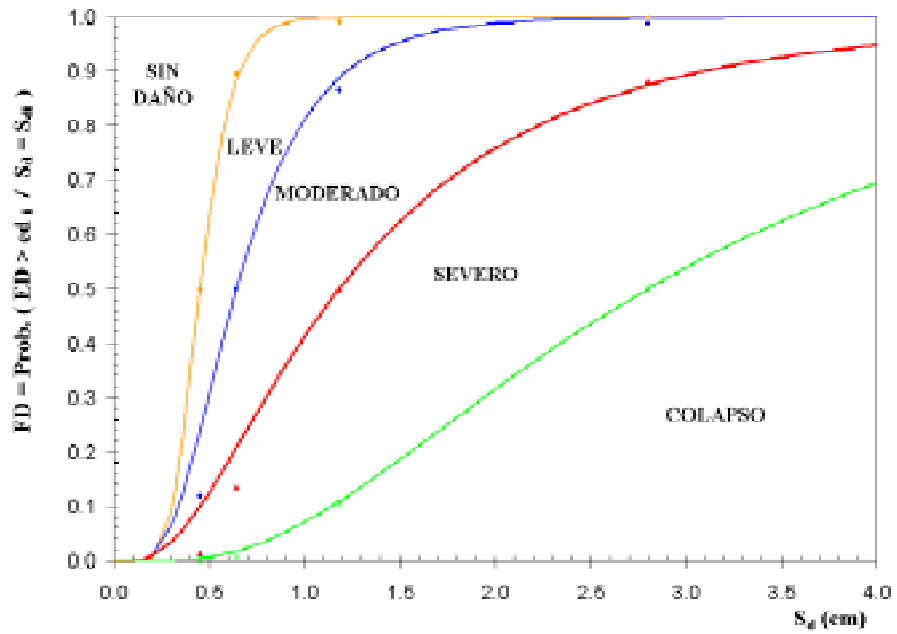


Figura 12.17. Curvas de fragilidad del edificio de 5 niveles (modelo M.2).

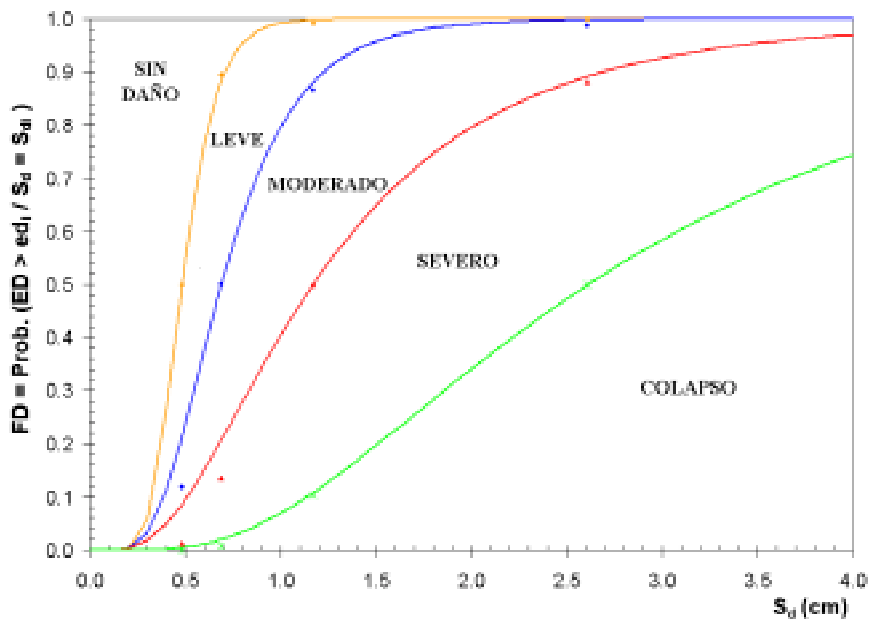


Figura 12.18. Curvas de fragilidad del edificio de 6 niveles (modelo M.3).

$\bar{S}_d$ (cm)	Valores de probabilidad de daño				
	Estado de daño				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
0.385	0.50	0.34	0.10	0.06	0.00
0.630	0.11	0.39	0.31	0.18	0.01
1.201	0.00	0.10	0.40	0.40	0.10
2.915	0.00	0.00	0.12	0.38	0.50

**Tabla 12.18.** Matriz de probabilidad de daño - Modelo M.1.

$\bar{S}_d$ (cm)	Valores de probabilidad de daño				
	Estado de daño				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
0.451	0.50	0.26	0.14	0.10	0.00
0.644	0.12	0.38	0.29	0.19	0.02
1.183	0.00	0.11	0.39	0.39	0.11
2.800	0.00	0.00	0.12	0.37	0.50

**Tabla 12.19.** Matriz de probabilidad de daño - Modelo M.2.

$\bar{S}_d$ (cm)	Valores de probabilidad de daño				
	Estado de daño				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
0.481	0.45	0.31	0.14	0.09	0.01
0.688	0.12	0.38	0.29	0.19	0.02
1.168	0.00	0.12	0.38	0.39	0.11
2.610	0.00	0.00	0.11	0.39	0.50

**Tabla 12.20.** Matriz de probabilidad de daño - Modelo M.3.

## 12.4 Análisis de sensibilidad de la fragilidad y el desempeño sísmicos

Las metodologías analíticas que se utilizan para evaluar el desempeño y la vulnerabilidad sísmica, requieren de la definición de tres modelos básicos: 1) el modelo que representa el comportamiento de la estructura que se desea analizar (capacidad), 2)

el modelo de la acción sísmica (demanda) y 3) el modelo para cuantificar y describir el daño en la estructura debido al movimiento sísmico (fragilidad). Para la definición de estos tres modelos, es necesario realizar una serie de hipótesis y simplificaciones que tratan de superar las incertidumbres involucradas con cada uno de ellos. No obstante, se ha podido identificar que la respuesta de una estructura frente a acciones de tipo sísmico, es sumamente sensible a estas incertidumbres. Por lo tanto, es evidente que es necesario establecer los intervalos de variación de la respuesta de la estructura a partir de la consideración de estas incertidumbres dentro de los métodos analíticos empleados para la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica. Para ello, es necesario identificar los parámetros sísmicos y estructurales más relevantes y generar una muestra considerable de estos parámetros que cubran todo el rango de valores posibles, de manera que para cada uno de ellos, pueda evaluarse la respuesta de la estructura. Este procedimiento se puede realizar, mediante la simulación por el método de Monte Carlo, el cual ha sido utilizado para evaluar la capacidad de los edificios de mampostería no reforzada de la ciudad de Barcelona.

A continuación, se presenta un análisis de sensibilidad de la influencia los siguientes factores, sobre la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica, esto son: 1) las incertidumbres en los parámetros que caracterizan la respuesta de la estructura, 2) los parámetros que definen la forma del espectro de respuesta suavizado que representa la demanda sísmica y, 3) los valores de los umbrales de desplazamiento espectral asociados a cada uno de los estados de daño. Para ello, se utilizan tanto las curvas de fragilidad y los espectros de capacidad obtenidos para los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample, como los espectros de demanda utilizados para representar la acción sísmica.

### 12.4.1 Sensibilidad a las incertidumbres en los parámetros estructurales

Para considerar las incertidumbres en los parámetros estructurales, la capacidad de los edificios se ha representado por medio de tres espectros de capacidad, esto es: espectro medio ( $\bar{x}$ ), espectro medio + 1 desviación estándar ( $\bar{x} + 1\sigma$ ) y espectro medio - 1 desviación estándar ( $\bar{x} - 1\sigma$ ). Evaluando el punto de desempeño para estos tres espectros, se determina un intervalo de variación de la demanda de desplazamiento ( $S_{dp}$ ).

En la Tabla 12.21 se muestran los valores de los puntos de desempeño correspondientes a los tres espectros de capacidad del modelo M.3, para el espectro de demanda del caso ICC - probabilista.

Espectro de capacidad	$S_{dp}$ (cm)	$S_{ap}$ (g)
Medio + 1 Desviación	1.07	0.100
Medio	1.13	0.104
Medio - 1 Desviación	1.21	0.087

**Tabla 12.21.** Demanda de desplazamiento y aceleración espectral para el caso ICC probabilista - Espectros de capacidad del modelo M.3.

Para evaluar el nivel de desempeño, se calculan los umbrales de los estados de daño, para los tres espectros de capacidad (ver Tabla 12.22).

Espectro Estado de daño	Intervalos de $S_d$ (cm)	
	$\bar{x} + 1\sigma$	$\bar{x} - 1\sigma$
No daño	$0 \leq S_d \leq 0.45$	$0 \leq S_d \leq 0.49$
Leve	$0.45 < S_d \leq 0.65$	$0.49 < S_d \leq 0.69$
Moderado	$0.65 < S_d \leq 1.14$	$0.69 < S_d \leq 1.17$
Severo	$1.14 < S_d \leq 2.61$	$1.17 < S_d \leq 2.61$
Colapso	$S_d > 2.61$	$S_d > 2.61$

**Tabla 12.22.** Umbrales de los estados de daño para los espectros ( $\bar{x} + 1\sigma$ ) y ( $\bar{x} - 1\sigma$ ) del modelo M.3.

Los valores de los umbrales de daño de la Tabla 12.22 se obtienen a partir de la propuesta de Lagomarsino (ver Tabla 12.4). Los estados de daño correspondientes al valor de la demanda de desplazamiento para los tres espectros de capacidad del modelo M.3 y, los niveles de desempeño de acuerdo a la clasificación del comité VISION 2000, se muestran en la Tabla 12.23.

Espectro	Estado de daño	Nivel de desempeño
$\bar{x} + 1\sigma$	Moderado	Seguridad
$\bar{x}$	Moderado	Seguridad
$\bar{x} - 1\sigma$	Severo	Pre-colapso

**Tabla 12.23.** Estados de daño y niveles de desempeño para los espectros de capacidad del modelo M.3.

Los resultados que se muestran en la Tabla 12.23, ponen en evidencia la necesidad de considerar las incertidumbres en los parámetros estructurales, cuando se pretende

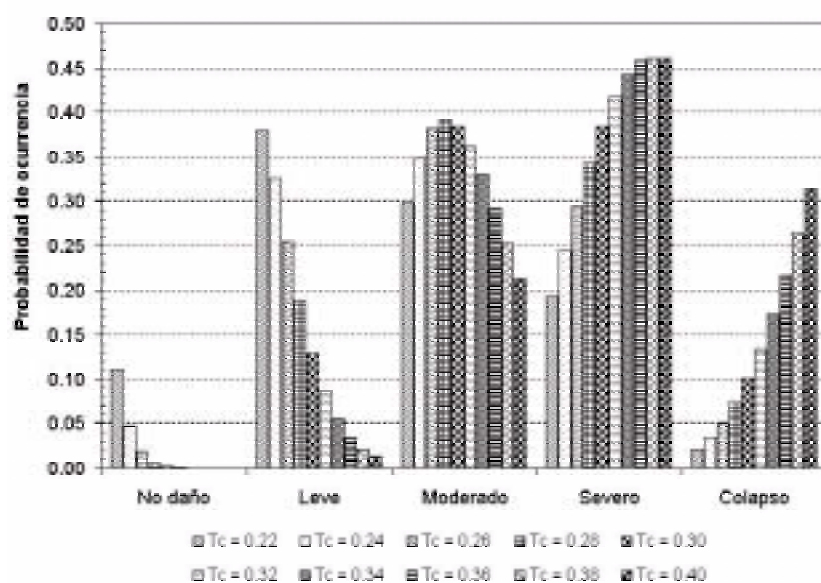


evaluar el desempeño y la vulnerabilidad sísmica de una estructura. En el caso del modelo de 6 niveles, el desempeño varía entre los niveles de seguridad y pre-colapso. Por lo tanto, considerando que los límites inferior y superior del espectro medio de capacidad del modelo M.3, representan un conjunto de edificios, es muy probable que muchos de ellos, tengan un nivel de desempeño deficiente ante cargas sísmicas. Es evidente, que el método utilizado para determinar el desempeño de los edificios, es sensible a las incertidumbres en los parámetros estructurales. Por lo tanto, utilizar el espectro de capacidad medio, puede llevar a subestimar la vulnerabilidad sísmica del edificio.

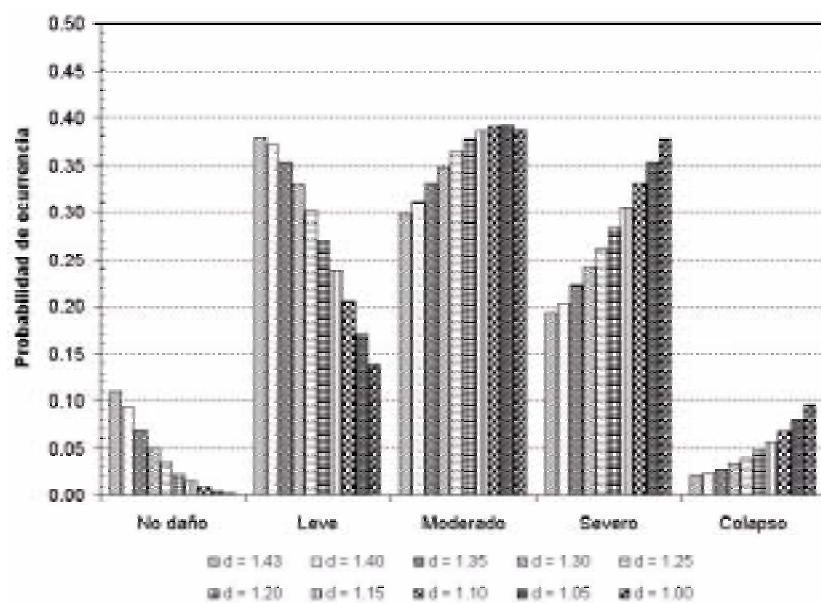
### 12.4.2 Sensibilidad a los parámetros de los espectros suavizados de respuesta

Los espectros de respuesta suavizados, presentan dos zonas claramente identificables: 1) zona de aceleración constante y 2) zona de velocidad constante. El período ( $T_C$ ) que las separa y, el parámetro que controla la caída del espectro en la zona de velocidad constante ( $d$ ), influyen considerablemente en la determinación de la demanda de desplazamiento. Así, pequeñas variaciones en cada uno de estos parámetros, puede modificar el nivel de desempeño de las estructuras. Para ilustrar lo anterior, se varían estos dos parámetros ( $T_C$  y  $d$ ) en el espectro del caso ICC - determinista y, se evalúa el desempeño sísmico del edificio de 6 niveles (M.3) para cada uno de los casos. El período  $T_C$  se varía entre 0.22 y 0.40 s con incrementos de 0.02 s y, el exponente  $d$  entre 1.0 y 1.40 con incrementos de 0.05, incluyendo también el exponente original calculado por el ICC, esto es,  $d = 1.43$ . Las Figuras 12.19 y 12.20 muestran las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los estados de daño para el modelo M.3, variando  $T_C$  y  $d$  respectivamente.

De estas figuras, se puede concluir que para variaciones del orden del 20 % en el ancho banda de la zona de aceleración constante, la cual está controlada por el valor de  $T_C$ , se producen diferencias entre el 30 % y el 50 % en las probabilidades de los estados de daño. Por otra parte, para variaciones del orden del 10 % en el valor del exponente  $d$ , se obtienen diferencias entre el 15 % y el 60 % en las probabilidades de los estados de daño. Si se evalúa la situación desde el punto de vista global, se puede decir que pequeñas variaciones en estos dos parámetros, modifican hasta en un grado el daño esperado en la estructura. Así por ejemplo si para un  $T_C = 0.22$  s los daños se concentran entre leves y moderados, para un  $T_C = 0.26$  s, los daños están entre moderados y severos. Por lo tanto, es evidente que es necesario definir con el mayor grado de exactitud posible, los parámetros que condicionan la forma del espectro de respuesta suavizado, que representa la demanda sísmica. Lo ideal en estos casos, es considerar las incertidumbres involucradas tanto en la acción sísmica como en la respuesta estructural y, obtener mediante un proceso de simulación por Monte Carlo, el nivel de desempeño sísmico medio con sus correspondientes desviaciones.



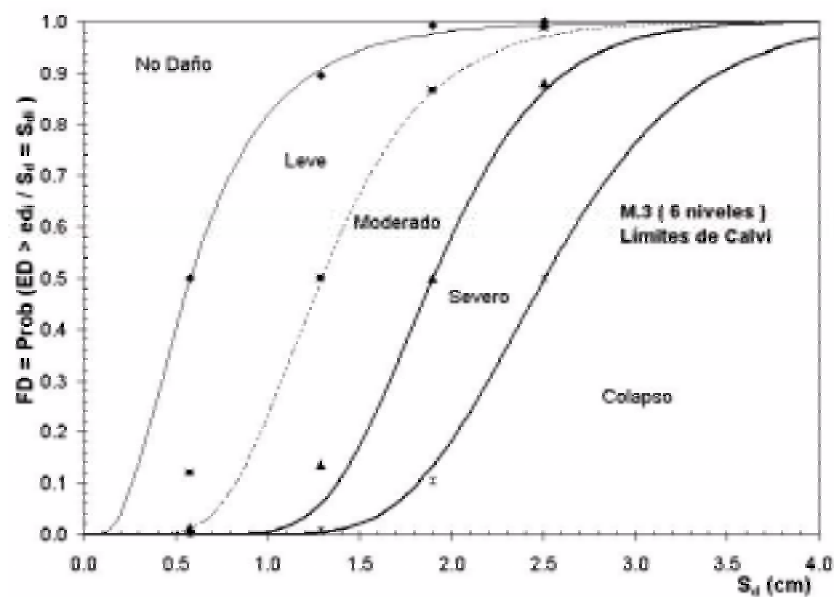
**Figura 12.19.** Probabilidades de ocurrencia de los estados de daño, obtenidas variando el período  $T_C$  en el espectro del caso ICC -determinista. Modelo M.3 (6 niveles).



**Figura 12.20.** Probabilidades de ocurrencia de los estados de daño, obtenidas variando el parámetro  $d$  de la zona de velocidad constante, en el espectro del caso ICC -determinista. Modelo M.3 (6 niveles).

### 12.4.3 Sensibilidad a los umbrales de daño

Los umbrales de los estados discretos de daño, influyen considerablemente en la generación de las curvas de fragilidad y, por lo tanto, varían las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño para la demanda de desplazamiento de la estructura. A manera de ilustración, la Figura 12.21 muestra las curvas de fragilidad generadas para el modelo M.3, a partir de los límites propuestos por Calvi, enunciados en la sección 7.7.4 y usando las mismas hipótesis sobre la distribución de la probabilidad de la Tabla 12.14.



**Figura 12.21.** Curvas de fragilidad para el modelo M.3 - Umbrales de daño propuestos por Calvi (1999).

La Tabla 12.24 muestra las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño, para la demanda de desplazamiento y aceleración espectral correspondiente a los tres espectros de demanda.

Espectro de demanda	Valores de probabilidad de daño				
	Estado de daño				
	No daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
NCSE-02	0.41	0.56	0.03	0.00	0.00
ICC - Determinista	0.41	0.56	0.03	0.00	0.00
ICC - Probabilista	0.13	0.52	0.33	0.02	0.00

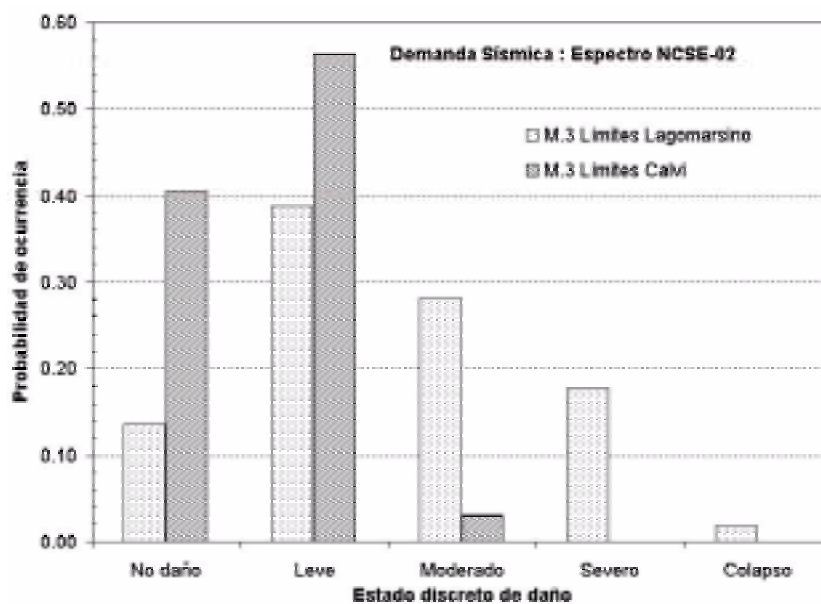
**Tabla 12.24.** Probabilidad de daño para el espectro de la NCSE-02 y los casos ICC determinista y probabilista. Modelo M.3.

Las Figuras 12.22, 12.23 y 12.24 muestran respectivamente las probabilidades de los estados de daño para los tres tipos de espectros de demandas considerados, correspondientes a las dos propuestas para definir los umbrales de daño (Lagomarsino et al. y Calvi). Para los dos primeros tipos de demanda, los daños obtenidos con los límites de Calvi, se concentran entre no daño y leve y, la probabilidad de daño severo es nula. Con los límites de Lagomarsino, predominan los daños leves y moderados y, hay una probabilidad del 18 % de que se presentan daños severos.

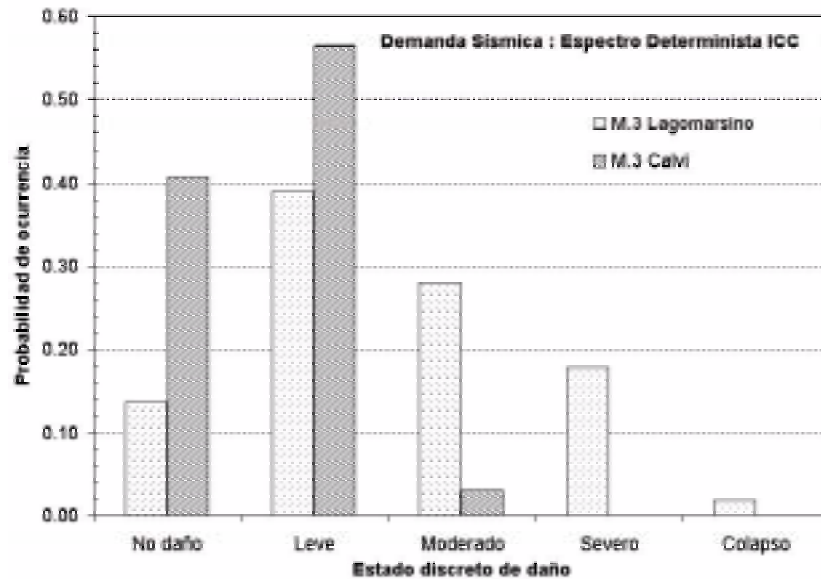
En cuanto a la demanda probabilista del ICC, utilizando los límites de Calvi, se obtienen daños entre leves y moderados, mientras que con los límites de Lagomarsino, los daños varían entre moderados y severos. Por lo tanto, se observa en términos generales, que existe aproximadamente, una variación de un grado de daño entre los dos umbrales utilizados para definir los estados discretos de daño.

Estos resultados, ponen en evidencia la necesidad de establecer los valores de los umbrales de daño, a partir de la experimentación o utilizando levantamientos de daño después de ocurrido un sismo, para evitar aumentar las incertidumbres en los elementos involucrados en estudios de vulnerabilidad y desempeño sísmico.

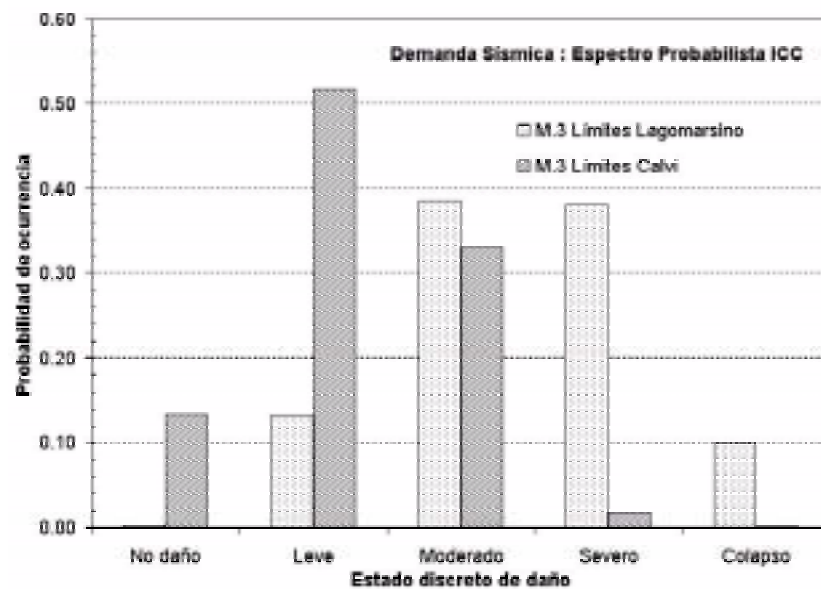
En las Figuras 12.22, 12.23 y 12.24, se observa que la propuesta de Lagomarsino et al. es más conservadora que la de Calvi.



**Figura 12.22.** Comparación de las probabilidades de los estados de daño obtenidas para los límites propuestos por Calvi y Lagomarsino - caso NCSE-02.



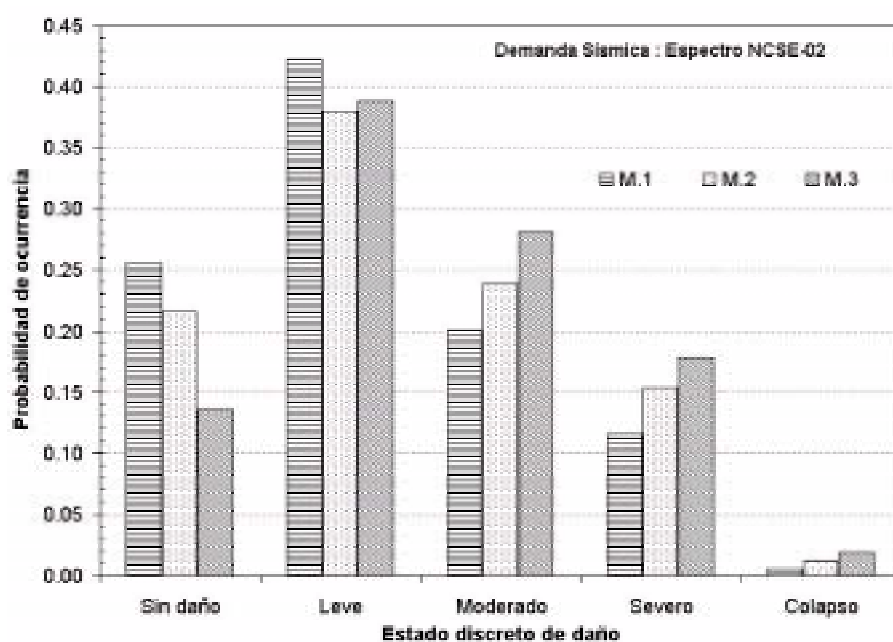
**Figura 12.23.** Comparación de las probabilidades de los estados de daño obtenidas para los límites propuestos por Calvi y Lagomarsino - Caso ICC determinista.



**Figura 12.24.** Comparación de las probabilidades de los estados de daño obtenidas para los límites propuestos por Calvi y Lagomarsino - Caso ICC probabilista.

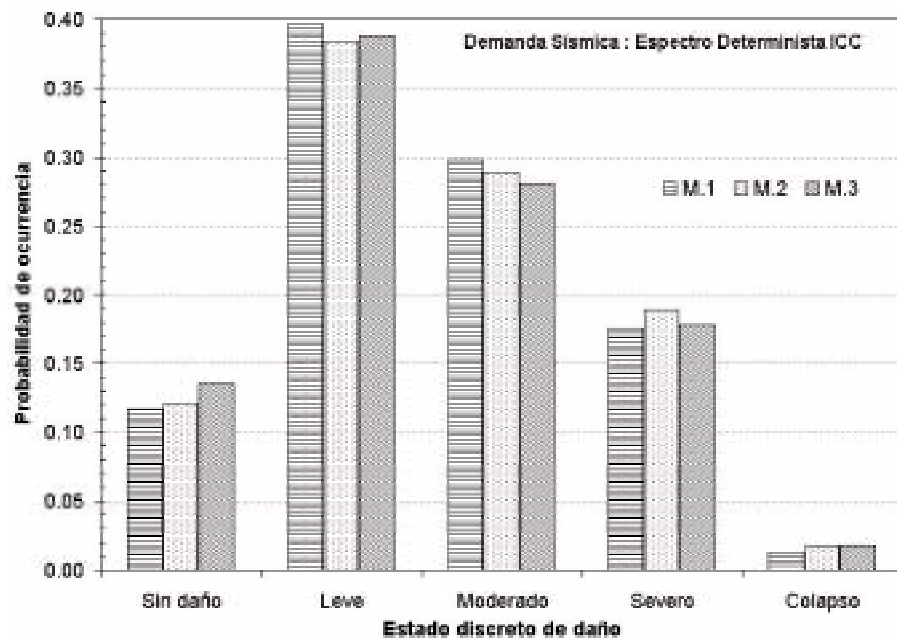
## 12.5 Escenarios de daño sísmico

Para generar los escenarios de daño sísmico estructural, se determinan las probabilidades de daño, para las demandas de desplazamiento espectral obtenidas para los tres modelos estructurales, entrando con estos valores en las curvas de fragilidad de cada modelo. Las Figuras 12.25, 12.26 y 12.27 muestran los histogramas que representan la probabilidad de ocurrencia de los 5 estados de daño considerados, para los tres casos de demanda sísmica, esto es: NCSE-02, caso ICC determinista y caso ICC probabilista, respectivamente.

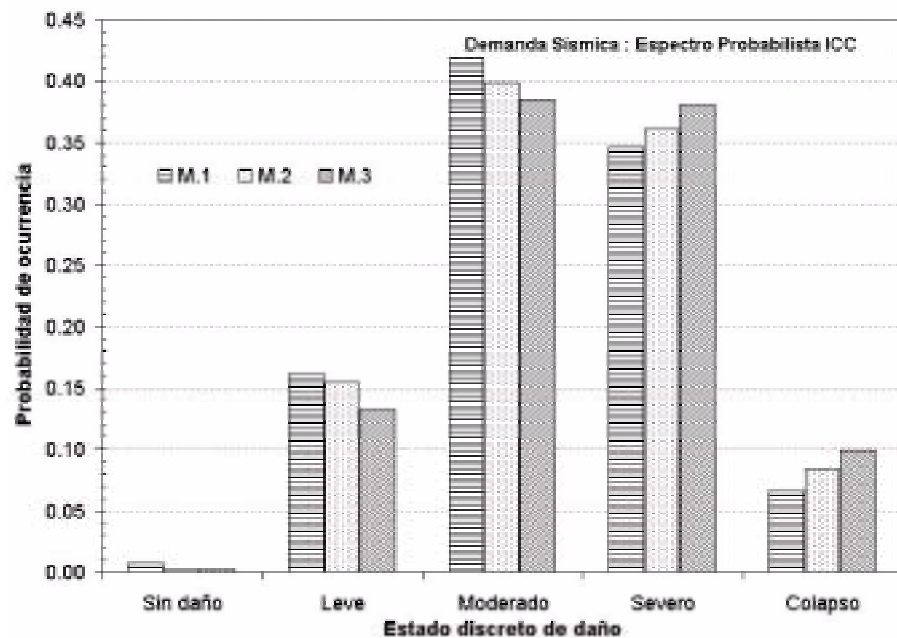


**Figura 12.25.** Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño para la demanda sísmica caso NCSE-02.

De estos histogramas se observa que los mayores daños en la estructura se presentan para la demanda sísmica correspondiente al caso ICC probabilista, donde la probabilidad de que se produzcan daños severos, varía entre el 35 y el 40 % para los tres modelos. Por otra parte, los daños que se presentan para el caso NCSE-02 y, el ICC determinista, son bastante similares, sobresaliendo los daños leves con probabilidades de ocurrencia entre el 38 % y el 42 % . Para efectos prácticos, puede decirse que la probabilidad de que se presente el colapso, es despreciable para los casos considerados. Tan sólo para el caso ICC probabilista, el modelo M.3 tienen una probabilidad del 10 % de colapsar.



**Figura 12.26.** Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño para el caso ICC determinista.



**Figura 12.27.** Valores de la probabilidad de ocurrencia de los estados de daño para el caso ICC probabilista.

Así pues, el desempeño sísmico de los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample, empeora con el incremento del número de niveles, es decir, que los daños en el modelo de 6 niveles son superiores a los otros dos modelos de 4 y 5 niveles. El aumento en el número de niveles, fue el producto de un proceso de expansión de esta zona de la ciudad, en donde se fueron añadiendo pisos (áticos), mediante un proceso constructivo con fuertes limitaciones desde el punto de vista estructural, tales como: 1) conexiones muy pobres con los sistemas resistentes de cargas verticales y horizontales, 2) reducción del área en planta, 3) desplazamiento del centro de masa del edificio, 4) generación de tensiones adicionales y 5) asentamientos diferenciales del edificio por la presencia de sobrecargas. Como resultado de estas deficiencias detectadas en el proceso de crecimiento de los edificios en su elevación vertical, éstos son mucho más vulnerables y presentan deficiencias incluso ante cargas gravitatorias, tales como: problemas de flexión de las vigas de madera que forman los forjados, grietas en los tabiques divisorios y desprendimientos de elementos no estructurales, entre otros.

Para generar los escenarios de daño, correspondientes al desempeño de los edificios de mampostería no reforzada del Eixample, para los tres espectros de demanda considerados, se calcula el valor del daño medio  $d_m$ , que se define como:

$$d_m = \sum_{i=0}^4 i * P(i) \quad (12.9)$$

donde  $i$  representa los estados discretos de daño, esto es: sin daño ( $i = 0$ ), leve ( $i = 1$ ), moderado ( $i = 2$ ), severo ( $i = 3$ ) y colapso ( $i = 4$ ).  $P(i)$  corresponde a la probabilidad de ocurrencia del estado de daño  $i$  para la demanda de desplazamiento.

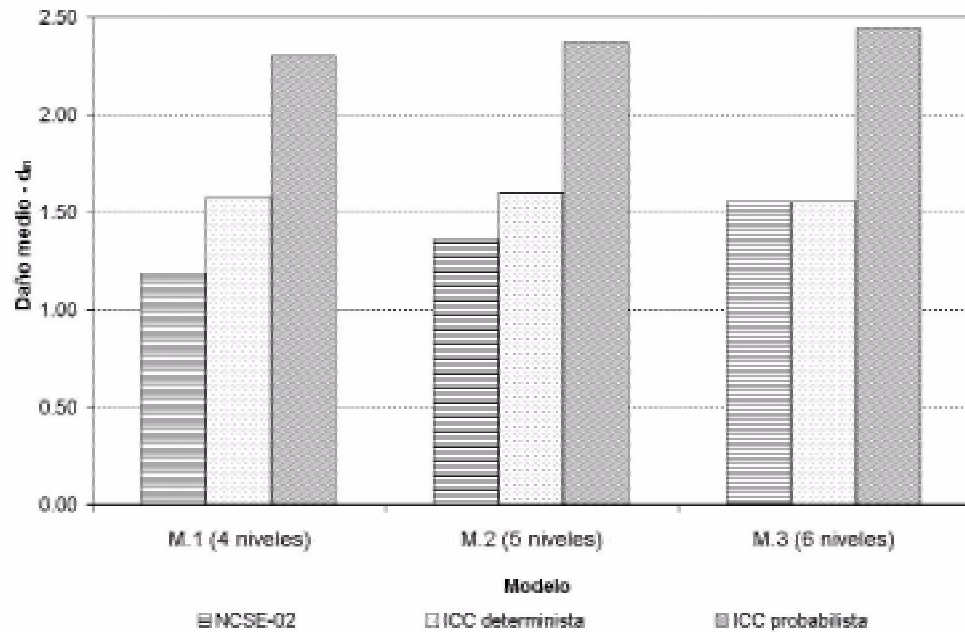
El valor de daño medio  $d_m$ , es un indicador que facilita la generación de escenarios de riesgo sísmico para un entorno urbano, como es el caso del Eixample. Adicionalmente, a partir de este parámetro, es posible evaluar de manera rápida y sencilla, el comportamiento sísmico de las estructuras. La Tabla 12.25 muestra los intervalos de variación del parámetro  $d_m$  para los cinco estados de daño considerados. Los intervalos a los cuales no se les asigna un grado de daño en particular, corresponden a estados intermedios. Así por ejemplo, un valor de  $d_m = 2.3$  representa que los daños más probables en la estructura son entre moderados y severos, con mayor peso de los moderados (estado de daño 2).

Intervalo de variación	Estado de daño
$0.0 \leq d_m \leq 0.5$	Sin daño
$0.5 < d_m \leq 1.5$	Leve
$1.5 < d_m \leq 2.5$	Moderado
$2.5 < d_m \leq 3.5$	Severo
$3.5 < d_m \leq 4.0$	Colapso

**Tabla 12.25.** Intervalos de variación del valor de daño medio  $d_m$  para cada estado de daño.



La Figura 12.28 muestra los valores de  $d_m$  para los modelos M.1, M.2 y M.3, correspondientes a los espectros de demanda de la NCSE-02, ICC determinista e ICC probabilista.



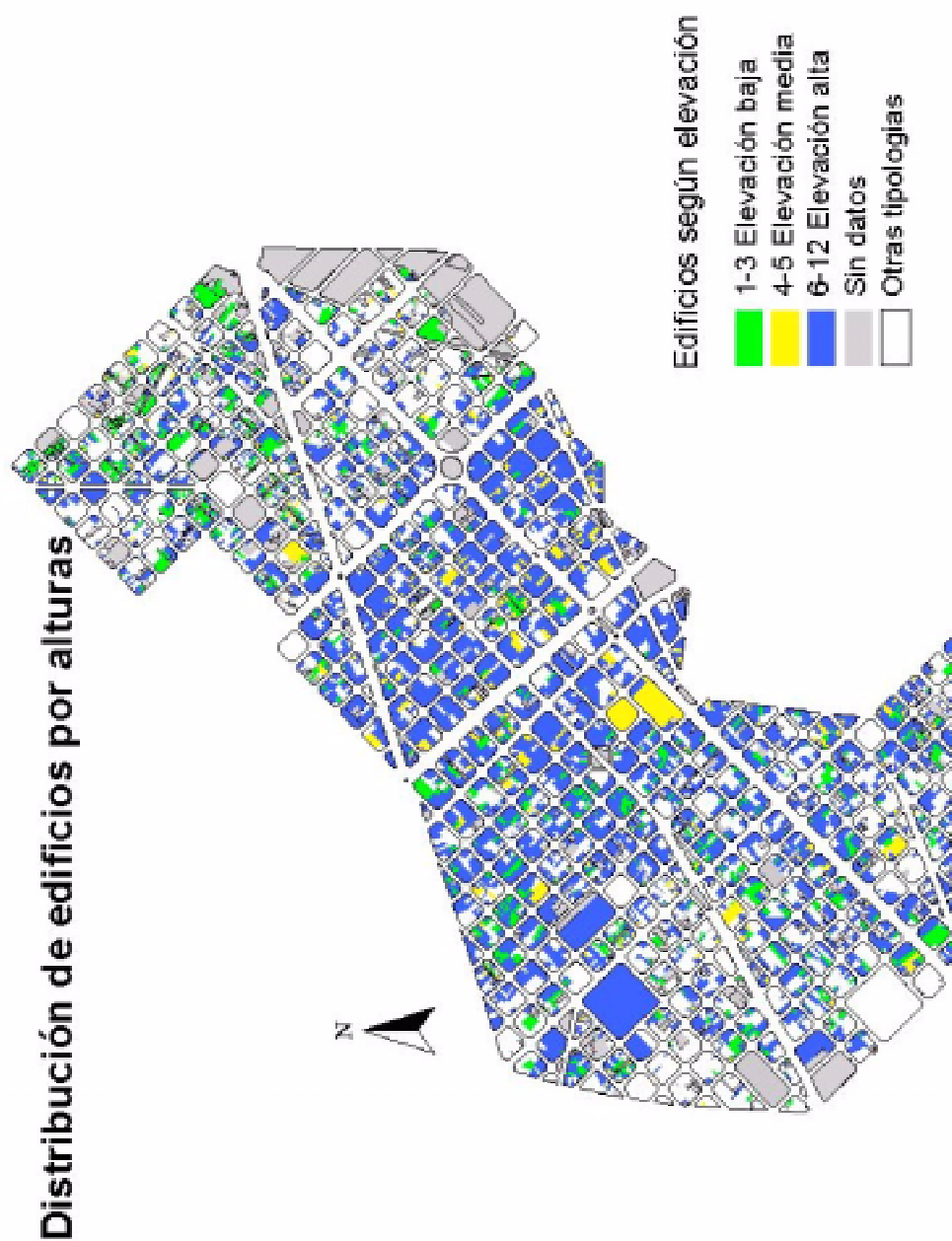
**Figura 12.28.** Valores del daño medio para los tres tipos de demanda considerados.

A partir de la información contenida en Figura 12.28 y en la Tabla 12.25, se pueden generar los escenarios de daño estructural. No obstante, para evaluar de manera global el comportamiento de los edificios típicos de mampostería no reforzada del Eixample, éstos se clasifican de acuerdo al número de niveles y se representan por medio de los modelos M.1, M.2 y M.3 (ver Tabla 12.26).

Elevación	No. Niveles	Modelo Tipo
Baja	1 - 3	-
Media	4 - 5	M.1 y M.2
Alta	$\geq 6$	M.3

**Tabla 12.26.** Clasificación de los edificios de mampostería no reforzada de acuerdo al número de niveles.

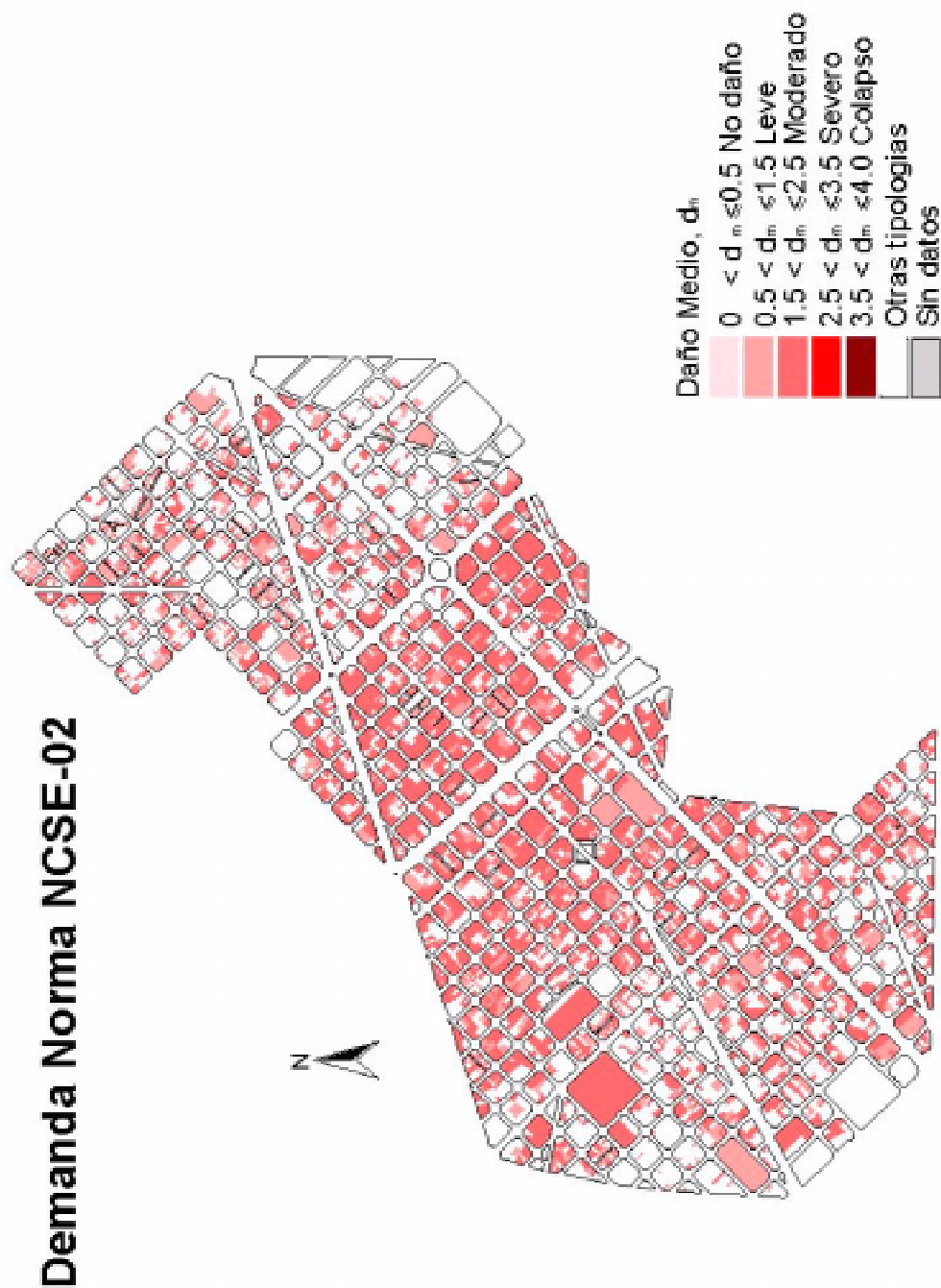
La Figura 12.29 muestra un mapa con los edificios existentes en la zona del Eixample. Se resaltan los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta.



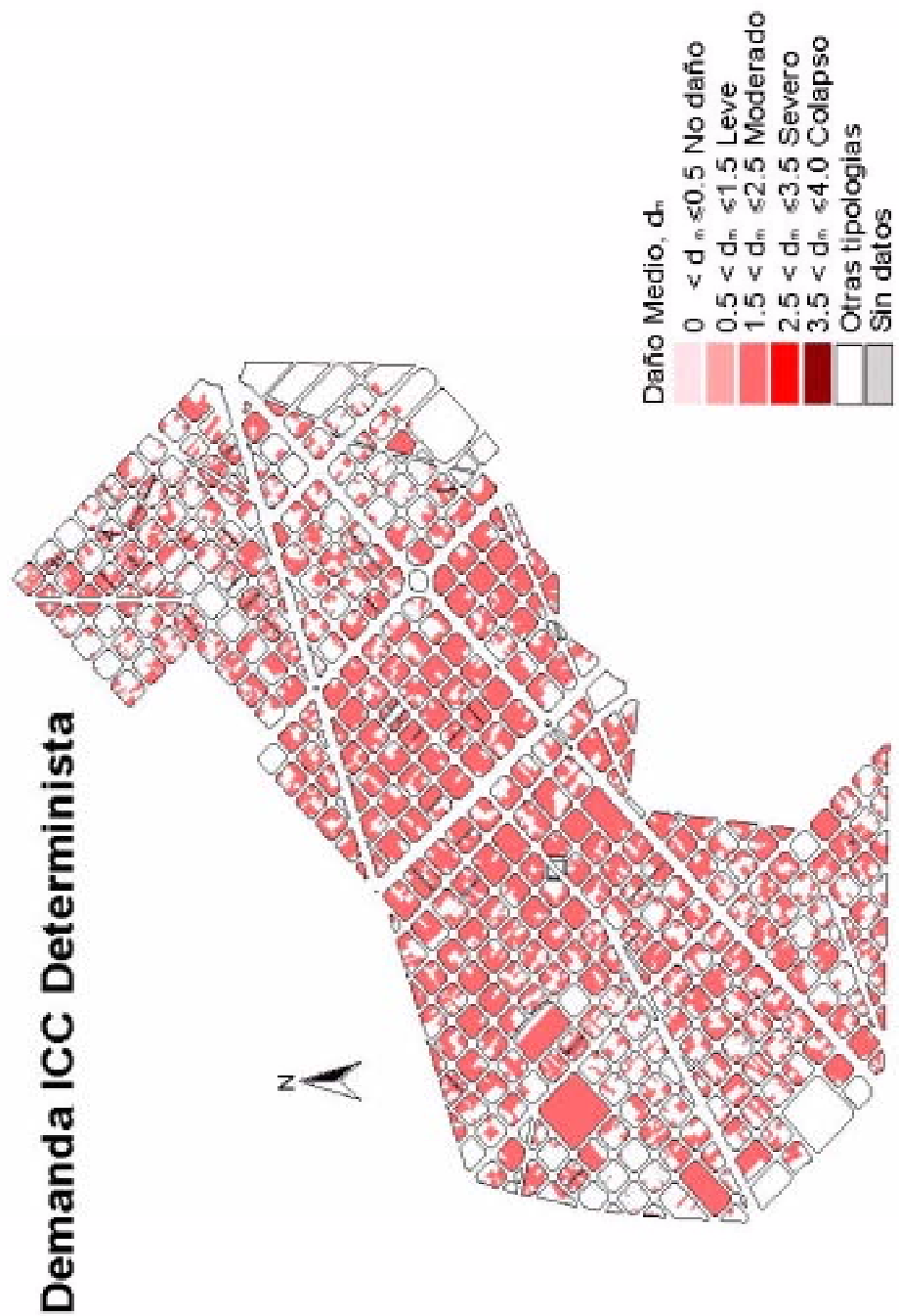
**Figura 12.29.** Distribución de los edificios en la zona de "l'Eixample" en Barcelona de acuerdo al número de niveles. (Lantada, 2003).

El comportamiento de los edificios de mampostería no reforzada de elevación baja, que representan 16 % del total de los edificios del Eixample, no ha sido analizado en este caso, debido a que tanto el sistema resistente de cargas laterales como verticales, difiere considerablemente de los edificios de 4 niveles o más. Adicionalmente, muchas de las estructuras que pertenecen a este grupo, corresponden a naves industriales, talleres, bodegas, etc. Por lo tanto, los escenarios que se muestran a continuación, sólo son válidos para los edificios de mampostería no reforzada del Eixample que tienen entre 4 y 12 niveles. Para el caso de los edificios que tienen más de 6 niveles, se les ha asignado los resultados del modelo M.3 (6 niveles), como una primera aproximación hacia la evaluación del daño. No obstante, es de esperar que a medida que aumenta el número de niveles, agregando áticos y sobre áticos con las características enunciadas anteriormente, los edificios pueden experimentar daños superiores a los del modelo M.3.

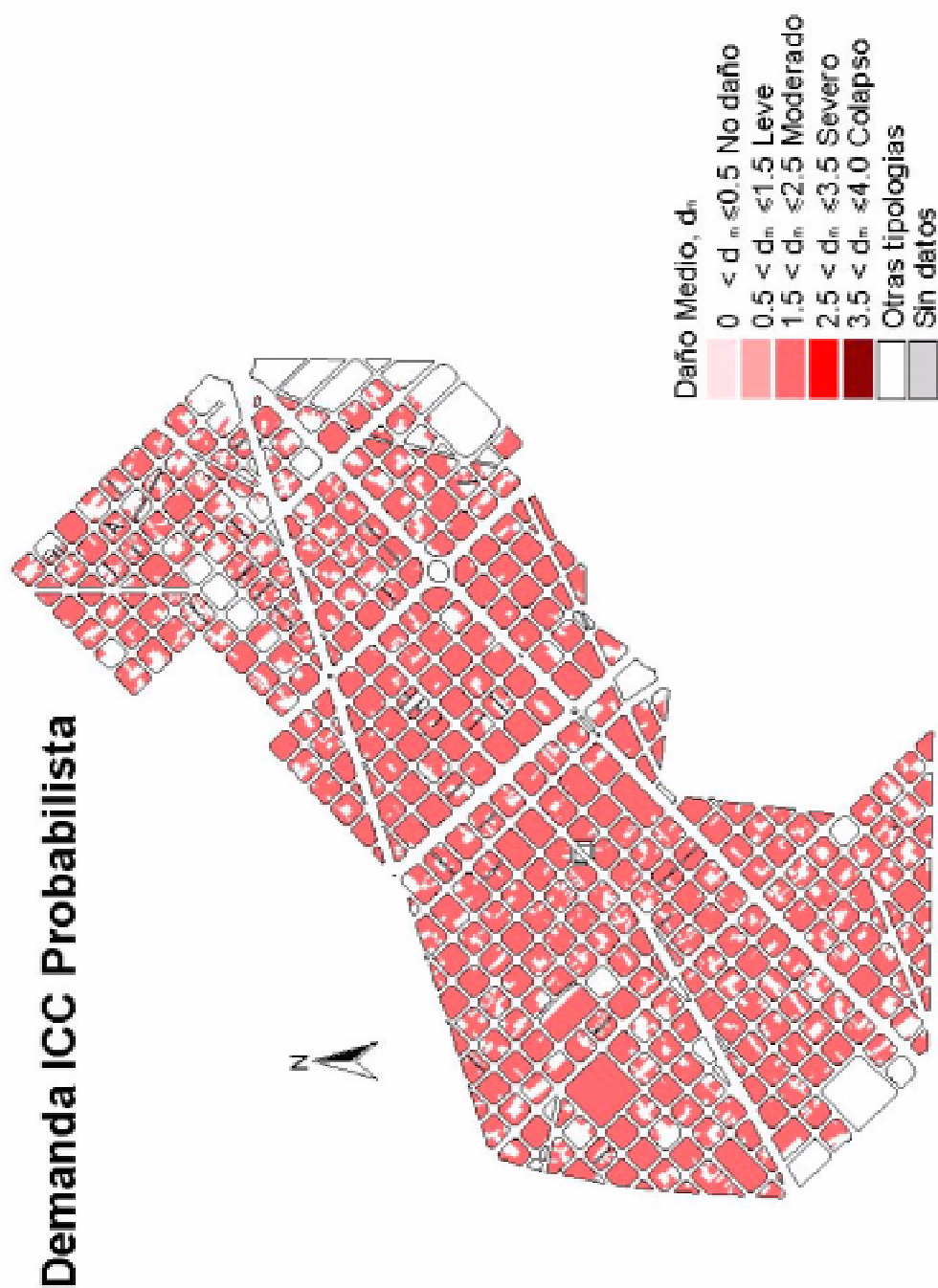
Las Figuras 12.30, 12.31 y 12.32, muestran respectivamente, los escenarios de daño, para los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta, en función del valor de daño medio  $d_m$ , para los tres casos de demanda sísmica considerados: NCSE-02, ICC determinista e ICC probabilista. Los dos primeros escenarios son bastante similares y, predominan los daños entre leves y moderados. El escenario correspondiente al caso ICC probabilista es el más desfavorable. La mayoría de los edificios presenta daños moderados, muy próximos al estado de daño severo. En los tres casos, sobresale la respuesta de los edificios que tienen un número de niveles mayor o igual a 6, debido a que éstos corresponden al 90 % de los edificios analizados.



**Figura 12.30.** Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003).



**Figura 12.31.** Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario ICC - determinista (Lantada, 2003).



**Figura 12.32.** Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario ICC - probabilista (Lantada, 2003).

Los anteriores escenarios dan una idea global del comportamiento de los edificios, no obstante, con la información obtenida de las curvas de fragilidad, es posible generar otros escenarios de daño sísmico. A manera de ilustración, se generan algunos ejemplos de escenarios para el caso NCSE-02. Las Figuras 12.33 a 12.36 muestran respectivamente la distribución de las probabilidades de ocurrencia de los siguientes estados: no daño, leve, moderado y severo. En este caso, las probabilidades de que se presente el colapso son prácticamente nulas y por lo tanto, no se genera ningún escenario.

Debido a la gran cantidad de edificios, es inviable generar escenarios que muestren, en un sólo mapa, la distribución de la probabilidad de daño de los 5 estados discretos considerados, en toda la zona del Eixample. Sin embargo, para el caso de una manzana o incluso para un sector, es posible hacer este tipo de representación. La Figura 12.37 muestra mediante círculos, la distribución de probabilidad de daño en una manzana localizada dentro del Eixample y muy cerca del centro de la ciudad de Barcelona. Los círculos contienen los porcentajes de las probabilidades de daño de los edificios de elevación media (4 y 5 niveles) y alta ( $\geq 6$  niveles), para los cinco estados de daño considerados; sin daño, leve, moderado, severo y colapso. Adicionalmente, para cada uno de los edificios, se indica el número máximo de niveles y se representa la distribución del parámetro de daño medio, de acuerdo a los intervalos de variación considerados.

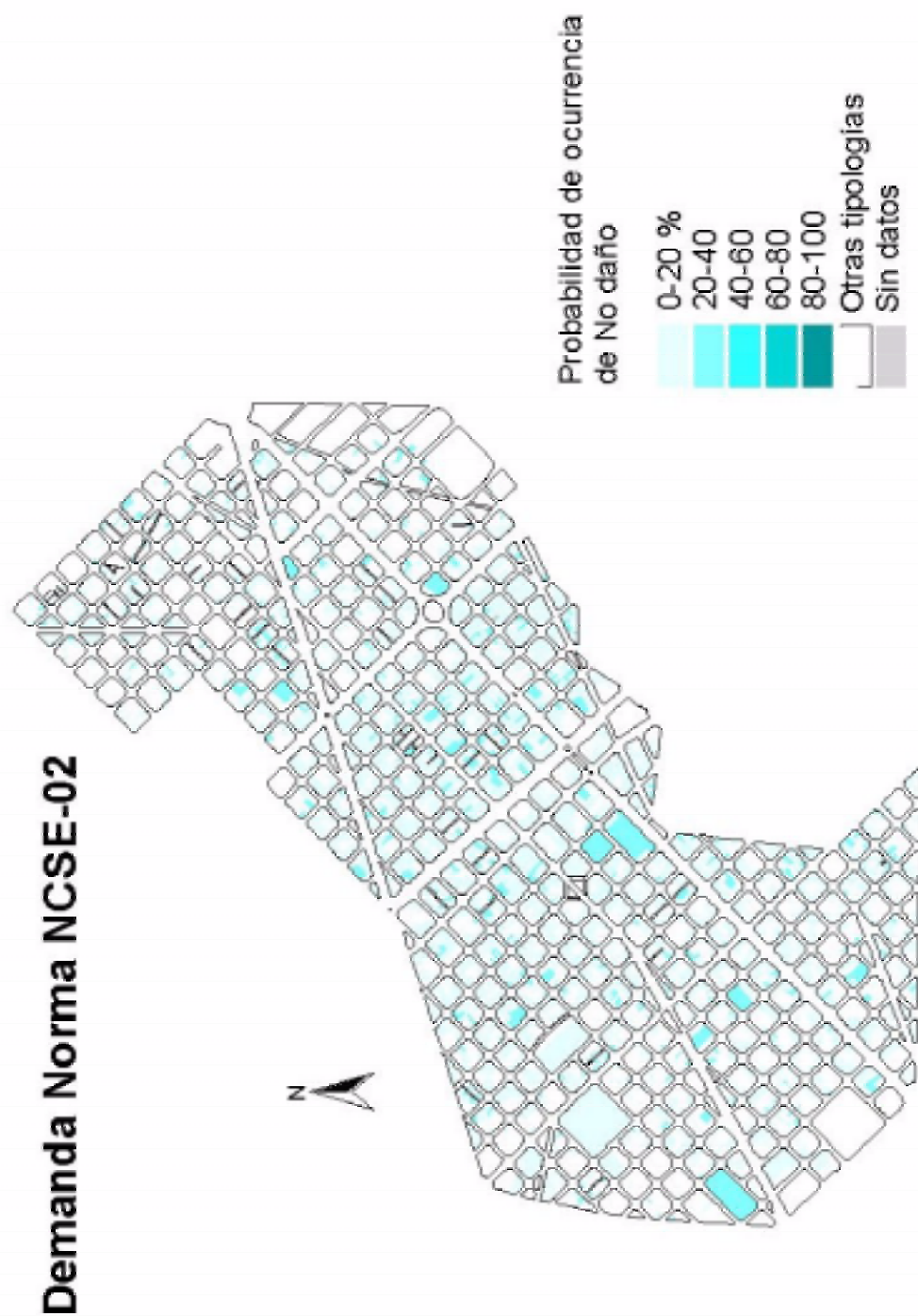


Figura 12.33. Probabilidades del estado sin daño -Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003).



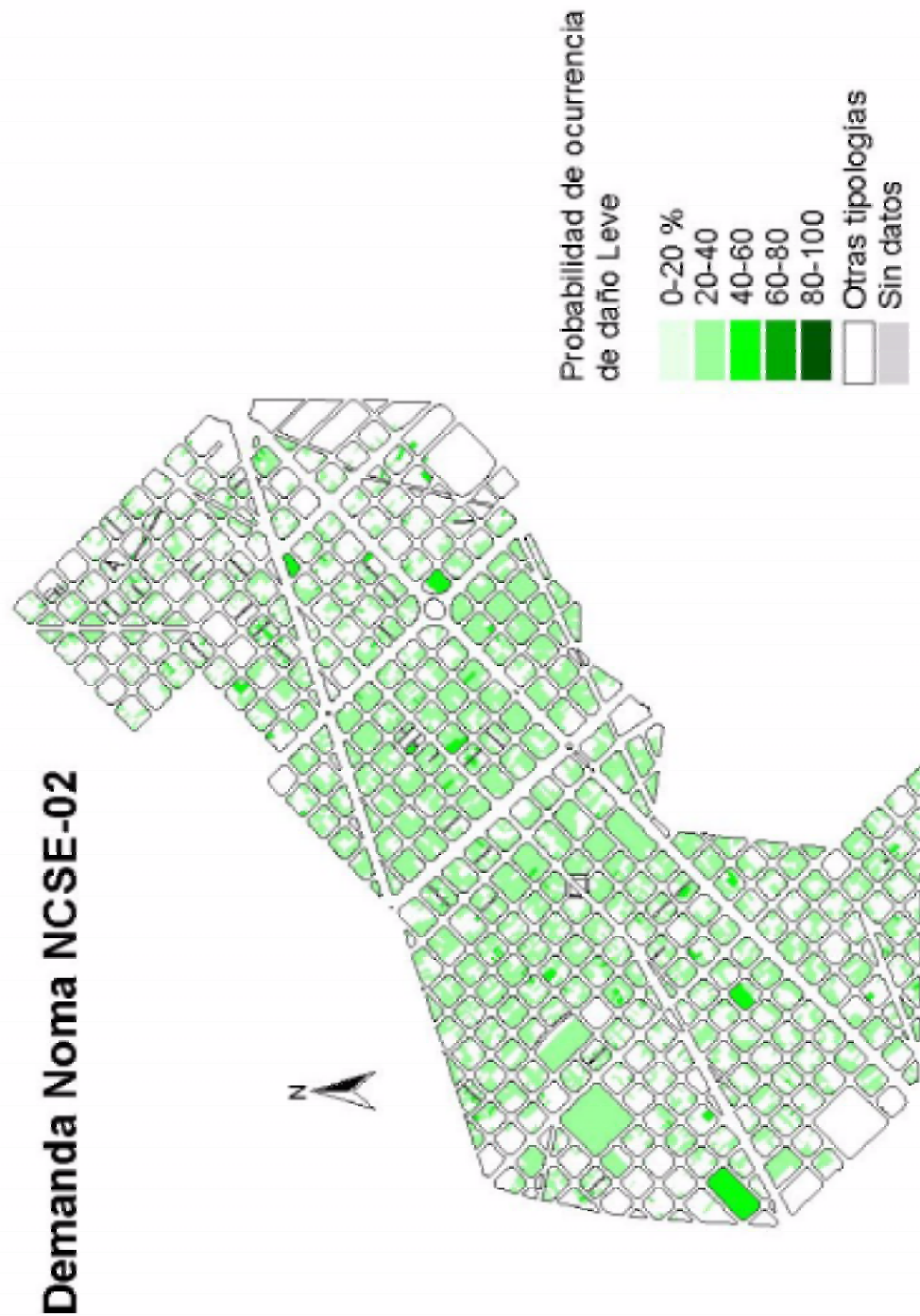


Figura 12.34. Probabilidades del estado de daño leve - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003).

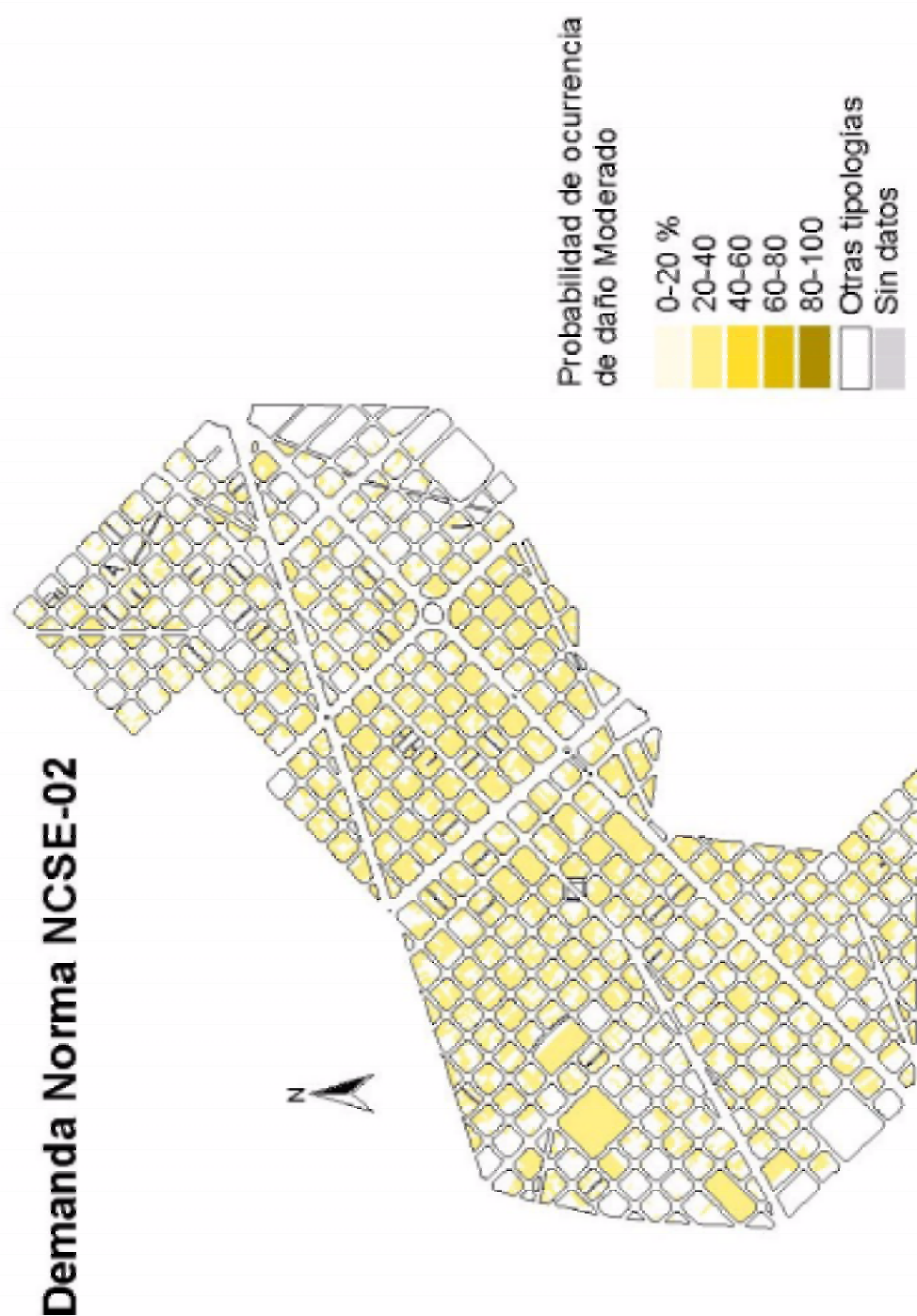


Figura 12.35. Probabilidades del estado de daño moderado - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003).

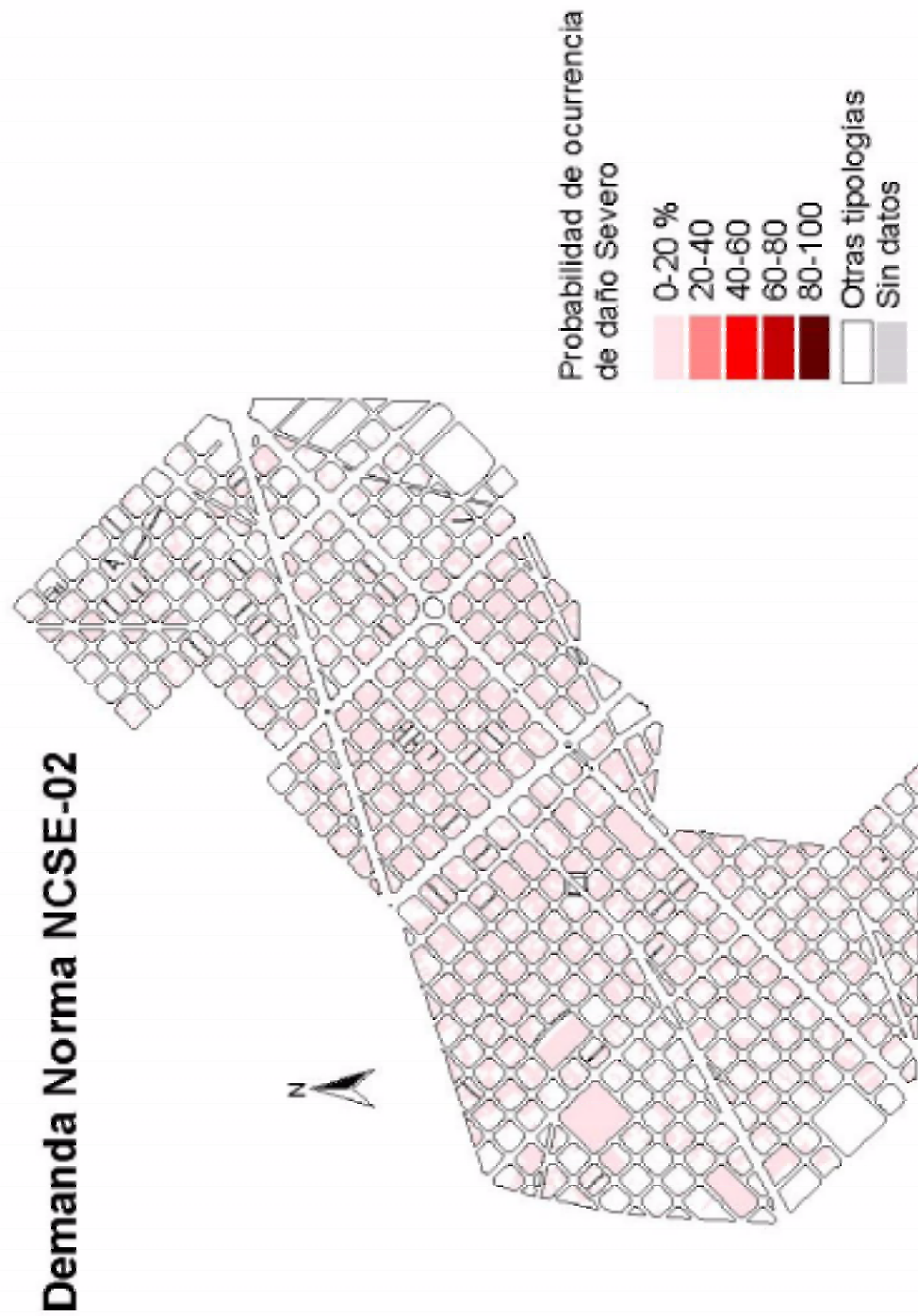
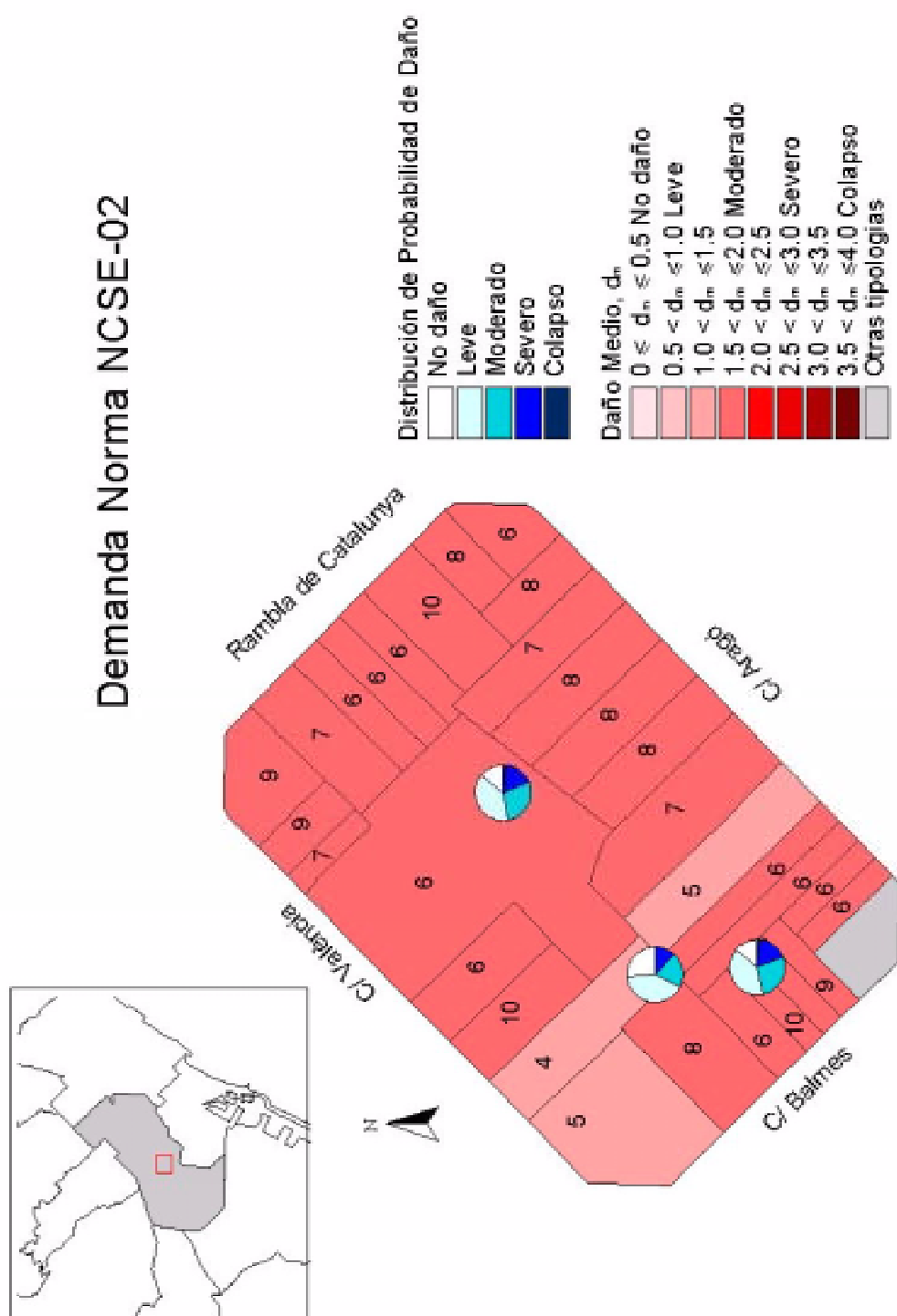


Figura 12.36. Probabilidades del estado de daño severo - Escenario NCSE-02 (Lantada, 2003).



**Figura 12.37.** Síntesis de resultados y representación gráfica. Ejemplo de una manzana de l'Eixample - Escenario NCSE-02. Los círculos corresponden a la distribución del daño en los edificios de elevación media (4-5 niveles) y alta (>6 niveles). Los números indican la cantidad de niveles (Lantada, 2003).

## 12.6 Resumen y discusión

En este capítulo, se ha analizado el desempeño, la fragilidad y el daño sísmico de los edificios de mampostería no reforzada de "l'Eixample" en Barcelona, representados por tres modelos estructurales que se han explicado con detalle en el capítulo 11. Para evaluar el desempeño sísmico de estos tres modelos, se utiliza el método N2. La demanda se considera para tres escenarios sísmicos, referenciados como: caso NCSE-02, y casos ICC determinista e ICC probabilista. Los espectros de capacidad se obtienen mediante un análisis estático no lineal, realizado con el programa TreMuri. El patrón de cargas utilizado, corresponde al tercer modo de vibración, el cual representa un movimiento de translación en la dirección longitudinal de los edificios modelados. Para determinar el nivel de desempeño sísmico de estos edificios, se definen los umbrales de los estados discretos de daño, en función de los parámetros que caracterizan la representación bilineal del espectro de capacidad, de acuerdo a la propuesta de Lagomarsino et al., (2002). Una vez se determinan estos umbrales, se verifica el cumplimiento de los objetivos de desempeño propuestos en la NCSE-02.

La vulnerabilidad sísmica de los edificios, se evalúa mediante las curvas de fragilidad, que se generan a partir de una función de distribución lognormal, caracterizada por un valor medio de desplazamiento espectral  $\overline{S_d}$  y, una desviación estándar  $\beta_{ED_i}$  del logaritmo natural de  $\overline{S_d}$ , para cada estado de daño  $ED_i$ . Los valores de  $\overline{S_d}$  corresponden a los umbrales de los estados de daño y, el parámetro  $\beta_{ED_i}$  se obtiene a partir de los resultados obtenidos mediante una técnica indirecta de evaluación del daño a gran escala utilizada en el proyecto Europeo RISK-UE.

Con los valores de la demanda de desplazamiento espectral, obtenidos para los tres modelos, se entra en las correspondientes curvas de fragilidad y, se determinan las probabilidades de ocurrencia para cada uno de los estados de daño. Este procedimiento se realiza para los tres casos más arriba mencionados. Finalmente, a partir de esta información, se generan los correspondientes escenarios de daño sísmico estructural, para los edificios de mampostería no reforzada de "l'Eixample" en Barcelona.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad de tres elementos básicos que intervienen en la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica de las estructuras: 1) las incertidumbres en los parámetros estructurales, 2) la variación en los parámetros de los espectros suavizados de respuesta y, 3) los valores de los umbrales de daño.

El principal aporte de este capítulo, está en la identificación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample. El uso del método de Monte Carlo permite no sólo considerar las incertidumbres en los parámetros del modelo, sino también representar el comportamiento medio y el rango de variación de un conjunto de estructuras que se ajustan a un modelo de edificio tipo. Así, los resultados muestran una variación del nivel de daño dentro de un mismo modelo.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el grado de daño de las estructuras analizadas, aumenta con el número de niveles, es decir, que las estructuras más altas son más vulnerables. Por lo tanto, para zonas de sismicidad moderada y alta, no es recomendable construir edificios altos de mampostería no reforzada.

Para los tres espectros de demanda considerados, los edificios de mampostería no reforzada de "l'Eixample" que tienen entre 4 y 12 niveles presentan un nivel de desempeño de "Seguridad". No obstante, utilizando la información que proporcionan las curvas de fragilidad, se observa que para el caso ICC probabilista, la probabilidad de que se presentan daños severos, varía entre el 35 y el 40 %, lo que equivale a un nivel de desempeño de Pre-colapso. Por lo tanto, un gran porcentaje de los edificios de la ciudad de Barcelona, no cumpliría con el objetivo básico de preservar la seguridad de los ocupantes y de reducir los daños producidos por los sismos y, por consiguiente, se aconseja proceder a un reforzamiento o rehabilitación de estos edificios.

Las metodologías utilizadas en este capítulo, para evaluar el desempeño y la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada del Eixample, son sensibles a las incertidumbres en: 1) los parámetros estructurales, 2) los parámetros del espectro de respuesta suavizado y 3) los umbrales de los estados de daño. Pequeñas variaciones en los parámetros correspondientes a estos tres elementos, pueden modificar hasta en un grado el daño esperado. Por lo tanto, es indispensable definir lo mejor posible cada uno de estos elementos, utilizando información sísmica y estructural de la zona. Así pues, y en particular en zonas con sismicidad baja o moderada, donde no se dispone de suficiente información, es indispensable avanzar en el desarrollo de metodologías probabilistas que permitan evaluar el punto de desempeño considerando las incertidumbres en los parámetros mencionados.

Los escenarios de daño obtenidos para los tres casos considerados, señalan a la demanda sísmica correspondiente al caso ICC probabilista como la más desfavorable para los edificios de l'Eixample. La mayoría de los daños que se presentan son moderados, muy próximos al estado de daño severo. Los escenarios de los casos NCSE-02 e ICC determinista, son muy similares. La respuesta de los edificios para estos dos niveles de demanda, es favorable, debido que predominan los daños leves. De los mapas que muestran la distribución de probabilidades para cada estado de daño, correspondientes al caso NCSE-02, se observa que predominan los daños leves (30-40%) y moderados (20-30%). La probabilidad de daño severo es inferior al 20 % y la de colapso es nula.