



**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<sup>a</sup> Nieves Lantada Zarzosa***

Directores:

***Dr. Luis G. Pujades Beneit***

***Dr. José A. Gili Ripoll***

---

*Barcelona, 2007*

# CAPÍTULO 6

## VULNERABILIDAD, CAPACIDAD Y FRAGILIDAD

### 6.1 Introducción

La base de datos de Barcelona, estructurada en el Sistema de Información Geográfica (GIS) ha permitido evaluar la vulnerabilidad, capacidad y fragilidad de los edificios, con el objetivo de obtener escenarios de riesgo de la ciudad de Barcelona para diferentes eventos sísmicos. El estudio de la vulnerabilidad permitirá identificar las zonas de la ciudad con edificios más vulnerables, proporcionando información de gran utilidad a la hora de diseñar planes de emergencia o de prevenir el daño sísmico en la ciudad.

Así pues, en este capítulo se analizan los datos disponibles de acuerdo a las dos metodologías propuestas en proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), para evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad de los edificios residenciales de la ciudad. La primera metodología se basa en el método del índice de vulnerabilidad; la segunda en espectros de capacidad y curvas de fragilidad. Ambos métodos han sido

adaptados a las tipologías estructurales características de los edificios residenciales de Barcelona.

La Metodología del Índice de Vulnerabilidad (MIV), llamada también en Risk-UE de Nivel I, clasifica el parque constructivo de la ciudad en clases de vulnerabilidad, para después realizar un análisis de vulnerabilidad de cada edificio individual. La acción sísmica se considera en términos de Intensidad macrosísmica EMS-98.

El Método del Espectro de Capacidad (MEC), llamado también en Risk-UE de Nivel II, requiere la obtención del espectro de capacidad y curvas de fragilidad específicas para los edificios analizados y la acción sísmica se considera en términos de espectros de respuesta inelástica o espectros de demanda. Para aplicar el método del espectro de capacidad, se han clasificado los edificios residenciales de la ciudad según 6 tipos o clases constructivas. Se trata de los edificios de mampostería y de hormigón armado considerando, en ambos casos, edificios altos, bajos y de altura intermedia que, para edificios de mampostería, representan respectivamente los edificios con más de 6 pisos, con uno o dos pisos y con 3, 4 o 5 pisos, siempre incluyendo la planta baja. La base de datos integrada en el GIS ha sido de gran utilidad en el establecimiento de la matriz tipológica de los edificios residenciales de la ciudad. La clasificación simplificada, según los 6 tipos, adoptada para aplicar el método del espectro de capacidad, permite representar adecuadamente más del 92% de los edificios residenciales de la ciudad. La obtención del espectro de capacidad de un edificio requiere su modelado y análisis numérico. Para modelar los edificios representativos de cada una de las 6 tipologías consideradas se utilizaron planos arquitectónicos y planos estructurales, así como la opinión de expertos en los sistemas constructivos empleados en la ciudad. Una técnica simplificada propuesta en Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) permite desarrollar las curvas de fragilidad a partir de los espectros de capacidad.

En este capítulo se establecen las bases para el desarrollo de escenarios de daño, caracterizando la vulnerabilidad, capacidad y fragilidad del parque edificado de Barcelona. En primer lugar se define una matriz tipológica específica para los edificios de la ciudad de Barcelona. Después se establecen los procedimientos que permiten la estimación del índice de vulnerabilidad de los edificios individuales en

base a la información disponible en el GIS y se crean mapas de vulnerabilidad para las tipologías más frecuentes: mampostería y hormigón armado. Finalmente se definen los espectros de capacidad y curvas de fragilidad para las seis clases de edificios establecidas. Un último apartado de síntesis y conclusión cierra el presente capítulo.

## 6.2 La matriz de tipologías de edificios (BTM)

La matriz de clasificación de edificios (*Building Typology Matrix*, BTM) sintetiza las diferentes características del inventario de edificios construidos en los países europeos participantes en el proyecto RISK-UE: Bulgaria, Grecia, Francia, Italia, FYRoM<sup>1</sup>, Rumania y España, a partir de ahora denominados como países Risk-UE (Lungu *et al.*, 2001).

El objetivo de esta matriz es agrupar en una serie de clases los edificios con una tipología estructural y comportamiento similar. Una vez definida la BTM pueden desarrollarse modelos de predicción de daño y pérdidas para cada tipología. Dicha clasificación se realizó en base a una serie de parámetros del edificio que intervienen en el grado de daño y pérdidas:

- Parámetros estructurales, que afectan a la capacidad estructural y a la respuesta del edificio.
- Nivel de diseño sísmico (*code level*).
- Sistema estructural base (material y estructura).
- Altura del edificio.
- Elementos no estructurales, que afectan al daño no estructural.

---

<sup>1</sup> FYRoM: *Former Yugoslav Republic of Macedonia*

La BTM de Risk-UE (Tabla 6.1) contiene 23 clases de edificios (10 de mampostería, 7 de hormigón armado, 5 de estructura metálica y 1 con estructura de madera), agrupados por su tipología estructural y material de construcción. El Anejo D presenta una descripción detallada de cada tipo de edificio.

Las tipologías predominantes en la ciudad de Barcelona son las de mampostería no reforzada seguidas de las de hormigón armado, cuya construcción se ha incrementado rápidamente en las últimas décadas, llegando en muchos casos a sustituir a los edificios de mampostería. Hay que destacar también que los edificios de mampostería del tipo M1.3 y M1.2, además de tener frecuentemente un uso diferente al residencial (suelen ser monumentos históricos o forman parte del patrimonio histórico), no pueden ser considerados como una tipología de edificios de mampostería normal, sino que por su arquitectura, diseño, y características constructivas deben tratarse de una forma particular.

No es frecuente encontrar estructuras de madera (W) y adobe (M2) en áreas urbanas en Europa; se trata más bien de estructuras temporales, bien con una función auxiliar o bien se encuentran abandonadas. Por otro lado, la tipología de mampostería confinada (M4) también es escasa en Europa, ya que esta clase proviene de la metodología HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) desarrollada en EEUU, donde existe un número significativo de este tipo de edificios.

En cuanto a los edificios con estructuras metálicas, la mayor parte de los edificios de este tipo en Barcelona (FERE), corresponden a estructuras metálicas clásicas, con elementos estructurales metálicos horizontales y verticales. Sin embargo, estos edificios no suelen ser de uso residencial, sino que casi siempre están orientados a un uso industrial o bien funcionan como mercados o pabellones deportivos, frecuentemente con dimensiones y alturas excepcionales.

En la ciudad de Barcelona los edificios con estructuras metálicas, S1 a S5, los de mampostería confinada, M4, y los de madera, W, tienen una presencia escasa y su uso como edificio residencial es prácticamente nulo. No obstante, en este estudio, se han considerado los edificios con estas tipologías en el Método del Índice de

Vulnerabilidad, pero no en el Método del Espectro de Capacidad, para el cual Risk-UE no proporciona ningún modelo de capacidad, ni de de fragilidad.

**Tabla 6.1.** Matriz de tipologías de edificios (BTM) de Risk-UE, con su correspondiente código de la base de datos de Barcelona y diseño sísmico en la ciudad.

Cod. Bcn <sup>3</sup>	Tipología Risk-UE	Descripción	Clasificación por alturas			Diseño sísmico <sup>2</sup>			
			Nombre	Nº plantas	Rango altura (m)	N	L	M	H
MNRU OF-	M3.1L	Estructuras de mampostería con forjados de madera	Baja	1 – 2	≤ 6	X			
	M3.1M		Media	3 – 5	6 – 15	X			
	M3.1H		Alta	6+	> 15	X			
MNRR MNCR MNSL	M3.2L	Estructuras de mampostería con forjados con bóvedas de mampostería	Baja	1 – 2	≤ 6	X			
	M3.2M		Media	3 – 5	6 – 15	X			
	M3.2H		Alta	6+	> 15	X			
MNRE OM-	M3.3L	Estructuras de mampostería con forjados mixtos de acero y mampostería	Baja	1 – 2	≤ 6	X			
	M3.3M		Media	3 – 5	6 – 15	X			
	M3.3H		Alta	6+	> 15	X			
MNRO MNFOM NFR	M3.4L	Estructuras de mampostería con forjados de losas de hormigón	Baja	1 – 2	≤ 6	X			
	M3.4M		Media	3 – 5	6 – 15	X			
	M3.4H		Alta	6+	> 15	X			
FO-	RC3.2L	Estructuras de hormigón armado irregulares con muros de relleno	Baja	1 – 3	≤ 9		X		
	RC3.2M		Media	4 – 7	9 – 21		X		
	RC3.2H		Alta	8+	> 21		X		
FERE FERR	S1L	Estructuras de acero	Baja	1 – 3	≤ 10		X		
	S1M		Media	4 – 7	10–25		X		
	S1H		Alta	8+	> 25		X		
FERE FERR	S3L	Estructuras metálicas con relleno de mampostería	Baja	1 – 3	≤ 10		X		
	S3M		Media	4 – 7	10–25		X		
	S3H		Alta	8+	> 25		X		
FH- FERO FEFO	S5L	Sistemas compuestos de metal y hormigón armado	Baja	1 – 3	≤ 10		X		
	S5M		Media	4 – 7	10–25		X		
	S5H		Alta	8+	> 25		X		
FMRE FMRU FMRR	WL	Estructuras de madera	Baja	1 – 2	≤ 5.5	X			
	WM		Media	3+	>5.5	X			

<sup>2</sup> N – Sin diseño sismo-resistente; L – Código bajo (diseño en base a coeficientes sísmicos básicos sin normativas apropiadas para las estructuras; M – código moderado (cualquier tipo de diseño que no es alto ni bajo); H – Código alto (diseño equiparable al Eurocódigo 8 (CEN, 2004)

<sup>3</sup> Código de estructuras y forjados de edificios de Barcelona (véase también Anejo D )

La BTM final de Risk-UE contiene 65 clases de edificios diferentes de acuerdo a algunas de sus propiedades consideradas como factores clave en el comportamiento del edificio. Para representar la variación del periodo típico del edificio, y de otros parámetros de diseño con la altura del edificio dentro de cada clase de la BTM, se han creado 3 subclases en función de la altura de los edificios (Tabla 6.1):

- Altura baja, L (*Low-rise*): de 1 a 2 plantas para las estructuras de mampostería y las de madera y de 1 a 3 plantas para edificios de hormigón armado y con estructuras de metal.
- Altura media, M (*Mid-rise*): de 3 a 5 plantas para las estructuras de mampostería y las de madera y de 4 a 7 plantas para edificios de hormigón armado y estructuras de metal.
- Altura alta, H (*High-rise*): con 6 o más plantas para las estructuras de mampostería y las de madera y con 8 o más plantas para edificios de hormigón armado y estructuras de metal.

En las cuatro últimas columnas de la Tabla 6.1 se indica el nivel de diseño sismo-resistente clasificado como: Sin código o norma sísmica (N: *No code*), bajo (L: *Low code*), moderado (M: *Moderate code*), y alto (H: *High code*). En el caso de Barcelona, todas las tipologías de mampostería aparecen con el código N, es decir, sin diseño sismorresistente, ya que se trata de estructuras de mampostería no reforzada, diseñadas a carga vertical únicamente y sin ninguna consideración sísmica, al ser casi todos los diseños anteriores a la publicación de la primera normativa de diseño sismorresistente en España en 1963. Un ejemplo claro se encuentra en el distrito del *Eixample*, donde el 70% de sus edificios son de mampostería no reforzada, construidos entre los años 1860 y 1940. Sin embargo, en las estructuras de hormigón armado con forjados reticulares o pórticos con vigas planas, que se construyeron mayoritariamente entre los años 60 y 70, se ha supuesto que se tuvieron en cuenta fuerzas sísmicas horizontales de acuerdo a la normativa existente en ese momento. Sin embargo, este tipo de edificios, han sido identificados como altamente vulnerables frente a la acción sísmica, en zonas con amenaza sísmica

moderada y/o alta. A dichas tipologías de hormigón y a las de estructura metálica se les ha asignado un nivel de diseño sismorresistente bajo, L.

En cuanto a la relación establecida entre los códigos de tipologías disponibles en la base de datos GIS y las tipologías Risk-UE (primera y segunda columna de la Tabla 6.1, respectivamente), encontramos una mayor diferenciación en las tipologías de mampostería (MN), que es la siguiente:

- En la tipología M3.1 se encuentran todas las estructuras de mampostería con viguetas de madera (RU) y todas las estructuras con pilares de obra y vigas maestras de madera (OF).
- A la tipología M3.2 corresponden principalmente aquellas estructuras de mampostería con forjados de bóvedas de fábrica o de sillería (RR).
- La tipología M3.3 se ha relacionado con las de mampostería con forjado de viguetas de hierro con bovedilla (RE) y todas las estructuras mixtas con pilares de obra y vigas maestras metálicas (OM-)
- Las tipologías M3.4 son aquellas de mampostería con forjados de viguetas de hormigón con bovedilla (RO), de hormigón (FO) y reticulares (FR).

Todas las estructuras de hormigón armado de Barcelona (FO), presentan un sistema irregular con muros de relleno, incluidas todas ellas en la tipología RC32, siendo las predominantes aquellas que tienen forjados de viguetas de hormigón con bovedilla (FORO), y las que aparecen a partir de 1965 con forjados reticulares (FOFR).

Debido a la falta de información más detallada sobre las estructuras metálicas de los edificios de la base de datos del GIS, no ha sido posible diferenciarlos entre las tipologías S1 y S3 de Risk-UE, optando por asignar todas las estructuras con código FE (excepto las que tienen forjados de hormigón) a una tipología denominada S1S3. Dentro de la tipología S5, sistemas compuestos de metal y hormigón armado, **sí** se han asignado las estructuras de la base de datos de la ciudad, definidas como mixtas de hierro y hormigón (FH) y las estructuras metálicas con forjados de hormigón (FERO y FEFO).



Las tipologías con estructuras mixtas de madera y hierro (FM) y forjados de vigas de hierro (RE), viguetas y bovedilla (RR) y vigas de madera (RU) corresponden a edificios anteriores a 1950, en su mayoría de los distritos de *Ciutat Vella* y *Gràcia*, que se han clasificado dentro de la categoría de estructuras de madera de Risk-UE (W).

## **6.3 Vulnerabilidad**

La Tabla 6.1 contiene las correspondencias entre la información tipológica de los edificios de Barcelona y la BTM diseñada en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). En el Método del Índice de Vulnerabilidad, se clasifican los edificios en tipologías básicas caracterizadas mediante índices de vulnerabilidad básicos. Las características particulares de cada edificio, entre las que se hallan el número de pisos y el nivel de protección sísmica, se tienen en cuenta mediante modificadores de este índice básico. En el caso del Método del Espectro de Capacidad, se agruparán los edificios de mampostería y los de hormigón armado, desarrollándose 6 curvas de fragilidad resultantes de considerar tres niveles de altura para cada una de estas dos tipologías. En el caso del índice de vulnerabilidad se ha decidido caracterizar el máximo número de edificios aprovechando la riqueza de nuestra base de datos. En este apartado se describe el procedimiento de asignación de los índices de vulnerabilidad.

### **6.3.1 Índices básicos**

A partir de la base de datos disponible, la opinión de expertos y el conocimiento de las características específicas de las tipologías de los edificios de Barcelona, se ha construido la Matriz de Tipologías de Edificios (Tabla 6.2), que incluye las tipologías más frecuentes de la ciudad, clasificadas en clases de vulnerabilidad, para asignar posteriormente a cada una de ellas un índice de vulnerabilidad medio basado en la EMS-98.

**Tabla 6.2.** Clases de vulnerabilidad propuestas para las tipologías de la BTM de Risk-UE.

	TIPOLOGÍA DE EDIFICIOS		CLASE DE VULNERABILIDAD					
			A	B	C	D	E	F
MAMPOSTERÍA NO REFORZADA	M3.1	Forjados de madera	○	■	○			
	M3.2	Forjados con bóvedas de mampostería	●	■	●			
	M3.3	Forjados mixtos de acero y mampostería	○	■	●			
	M3.4	Forjados de losas de hormigón		●	■	○		
HORMIGÓN ARMADO	RC3.2	Estructuras irregulares con muros de relleno		●	■	○		
ESTRUCTURAS METÁLICAS	S1	Estructuras de acero	○	●	■	○		
	S3	Estructuras metálicas con relleno de mampostería		○	●	■	○	
	S5	Sistemas compuestos de metal y hormigón armado				○	■	●
ESTRUCTURAS DE MADERA	W	Estructuras de madera		○	●	■	●	

La Tabla 6.3 muestra los índices de vulnerabilidad de acuerdo a las directrices del proyecto Risk-UE. Estos índices oscilan entre un valor de 0 y 1, siendo los de valores más cercanos a 1 los correspondientes a los edificios más vulnerables, mientras que los valores cercanos a cero corresponden a los menos vulnerables; es decir, a aquellos edificios diseñados con un alto grado de protección sísmica.  $V_I^*$  indica el valor más probable,  $V_I^-$  y  $V_I^+$  definen el intervalo plausible del índice de vulnerabilidad y  $V_I^{max}$  y  $V_I^{min}$ , son los límites inferior y superior de los índices de vulnerabilidad que se consideran posibles.

Cuando un edificio encaja directamente en alguno de los tipos definidos en la Tabla 6.3, se le asigna el índice de vulnerabilidad correspondiente al valor más probable. A continuación se describe el análisis de vulnerabilidad que permite adaptar este índice medio a las características particulares de cada edificio.

**Tabla 6.3.** Índices de vulnerabilidad propuestos para las tipologías de la BTM de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tipología	Descripción	Índices de Vulnerabilidad Básicos				
		$V_{I,BTM}^{\min}$	$V_{I,BTM}^{-}$	$V_{I,BTM}^{*}$	$V_{I,BTM}^{+}$	$V_{I,BTM}^{\max}$
M3.1	Forjados de madera	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
M3.2	Forjados con bóvedas de mampostería	0.460	0.650	0.776	0.953	1.020
M3.3	Forjados mixtos de acero y mampostería	0.460	0.527	0.704	0.830	1.020
M3.4	Forjados de losas de hormigón	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
RC3.2	Estructuras irregulares con muros de relleno	0.060	0.127	0.522	0.880	1.020
S1	Estructuras de acero	-0.020	0.467	0.363	0.640	0.860
S3	Estructura metálica con relleno de mampostería	0.140	0.330	0.484	0.640	0.860
S5	Sistemas compuestos de metal y hormigón armado	-0.020	0.257	0.402	0.720	1.020
W	Estructuras de madera	0.140	0.207	0.447	0.640	0.860

### 6.3.2 Modificadores

El índice de vulnerabilidad de cada edificio particular  $V_I^*$  puede ahora modificarse para tener en cuenta sus características específicas. Un primer refinamiento del índice de vulnerabilidad medio tendrá en cuenta las normativas constructivas en España, así como otras características constructivas y su exigencia de cumplimiento,  $\Delta M_R$ . Posteriores modificadores,  $\Delta M_C$ , se basarán en las características geométricas y de posición propias de cada edificio. El índice de vulnerabilidad característico más pausable de cada edificio en particular,  $\bar{V}_I$ , se calculará según la ecuación [6.1].

$$\bar{V}_I = V_I^* + \Delta M_R + \Delta M_C \quad [6.1]$$

### ***Modificador regional $\Delta M_R$***

Para tener en cuenta la calidad particular de determinadas tipologías de edificios según la región donde se encuentran, se introduce el factor regional de vulnerabilidad,  $\Delta M_R$ . Dicho factor será asignado en función del juicio experto y/o de la vulnerabilidad observada, y modificará el índice de vulnerabilidad básico  $V_I^*$ .

Para determinar el valor de este modificador en Barcelona, se han tenido en cuenta las diferentes normativas constructivas españolas y su aplicación real. Esta corrección sólo se ha aplicado a las dos tipologías predominantes (mampostería y hormigón). La Tabla 6.4 muestra y describe los períodos considerados.

El primer periodo, nombrado como Periodo I, se caracteriza por una ausencia de normativas y una nula consideración de cualquier precaución sísmica. Las tipologías estructurales son de muros de carga y estructuras de madera sin arriostrar. Las construcciones de este período se construyeron sin demasiado control, únicamente con la consideración de las cargas gravitatorias en su diseño (SES2002, 2002). El final de este periodo se ha fijado en el inicio del 1940, de acuerdo a opiniones de expertos en la historia y costumbres constructivas de la ciudad.

Durante el Periodo II, que cubre los años entre 1940 y 1962 ambos incluidos, aún no existía ningún tipo de normativa sismorresistente española. Sin embargo, la ausencia de normativa no implicaba una ausencia de criterios sismorresistentes en las prácticas constructivas, ya que éstas perseguían que los edificios no superaran su capacidad última de resistencia en caso de terremoto. Con todo, esto no aseguraba la ausencia de daños en la estructura durante el terremoto.

**Tabla 6.4.** Modificadores regionales del índice de vulnerabilidad por tipologías, según periodos constructivos basados en el diseño sísmico.

Periodos	Período construcción	Normativas Españolas	Obligación en Barcelona	Práctica constructiva con refuerzos laterales	Nivel de diseño sísmico	Edificios (%)	Índice de Vulnerabilidad ( $V_I$ )				
							M31	M32	M33	M34	RC32
I	<1940	-----	-----	Ausente	No	47.9	+0.198	+0.162	+0.234	--	--
II	1941-1962	-----	-----	Deficiente	No	20.3	+0.135	+0.099	+0.171	--	--
III	1963-1968	Recomendación MV-101 (1962)	No especificado	Deficiente	No	10.9	+0.073	+0.037	+0.109	+0.134	+0.228
IV	1969-1974	Normativa sísmica PGS-1 (1968)	Sí	Aceptable	Bajo	9.7	+0.010	-0.026	+0.046	+0.009	+0.103
V	1975-1994	Normativa sísmica PDS (1974)	Sí	Aceptable	Bajo	11.0	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022
VI	1995-1996	Normativa sísmica NCSE-94 (1995)	No	Aceptable	Bajo	0.2	-0.052	-0.088	-0.016	-0.053	-0.022

El Periodo III se inicia en 1963, año en que se publica la norma MV-101-1962 (MV101, 1963) donde se considera la acción sísmica en los edificios. Esta normativa definía la metodología para el cálculo de las fuerzas sísmicas y otras acciones, que debían ser consideradas en el diseño de estructuras. El coeficiente adoptado era función del valor de intensidad dado por un mapa de las intensidades máximas observadas desde el siglo XIX y de la clasificación del suelo, clasificado como compacto, semi-compacto y blando.

El Periodo IV abarca desde el año 1969 al 1974, en que se mejoran las condiciones de resistencia frente a acciones sísmicas, especialmente a partir de 1970, debido a la utilización de nuevos materiales como el hormigón y el avance de la normativa técnica de obligado cumplimiento. Este período viene marcado por la aprobación de la aplicación de la primera norma sismorresistente (PGS-1, 1968), con la peculiaridad de ser la primera normativa española de uso obligatorio para algunos tipos de estructuras. Dicha normativa obligaba a incluir en la memoria del proyecto

una justificación para el uso o no de diseño sísmico. El territorio se clasificó en zonas de baja, media y alta sismicidad. El coeficiente sísmico dependía de la masa de la estructura, el tipo de estructura, el tipo de suelo, la cimentación empleada, un coeficiente sísmico básico y el riesgo sísmico.

Pese a que la PGS-1 (1968) fue aprobada como norma provisional, permaneció en uso hasta siete años más tarde, cuando se aprobó la norma P.D.S. (PDS-1, 1974). Esta normativa abordaba de forma más sistemática el cálculo de estructuras frente a acciones sísmicas, y obligaba al uso de las mismas, con lo que se inicia un nuevo periodo desde el año 1975 al 1994. Esta normativa define las acciones verticales y horizontales e introduce un límite máximo de 0.20g como valor de coeficiente sísmico, excepto para los casos donde esté justificado un valor mayor. Adicionalmente al mapa de zonificación sísmica ya existente, incluye una tabla con intensidades MSK para cada capital de provincia y 51 ciudades importantes más.

Al inicio de este período también se aprueba la norma NV-102-1975 “acero laminado para estructuras de edificación” que consolida la evolución de las técnicas de fabricación de productos laminados de acero.

El último periodo se caracteriza por un mayor control y calidad en la ejecución de los detalles constructivos. Dicho período se inicia con la Norma de Construcción Sismorresistente Española, NCSE-94 (1994), que amplía el ámbito de aplicación y establece tanto parámetros de cálculo como de diseño que garanticen el comportamiento adecuado de las edificaciones ante los fenómenos sísmicos. La NCSE-94 introduce dos cambios fundamentales en las previsiones sísmicas. Primero, sustituye el concepto de intensidad sentida por el de peligrosidad sísmica asociada a un concepto de probabilidad, y en segundo lugar introduce los espectros de respuesta como base para el cálculo de las acciones sísmicas y el diseño estructural. Además, establece obligación del cálculo para zonas con una aceleración sísmica mayor de 0.06 g, y considera las disposiciones de la norma como recomendaciones para el resto de zonas. En este sentido la ciudad de Barcelona con una aceleración básica de 0.04 g queda en una zona de no obligatoriedad de la norma.

En el 2002 se publica la nueva norma NCSE-02 (NCSE-02, 2002) que actualiza la norma del 94 y establece la obligatoriedad del diseño sismorresistente en zonas con una aceleración básica igual o mayor que 0.04 g por lo que las nuevas construcciones de la ciudad de Barcelona deben tomar precauciones sísmicas. Por lo tanto futuros estudios de riesgo sísmico deberán tener en cuenta una mayor protección sísmica de los edificios de la ciudad a partir de esta fecha, teniendo en cuenta que la NCSE-02 establece un periodo de carencia de 2 años en los que es opcional aplicar la nueva o la norma anterior. Análogamente será conveniente considerar las disposiciones del Eurocódigo 8 (CEN, 2004). La Tabla 6.4 sintetiza los periodos constructivos considerados y relaciona los modificadores del índice de vulnerabilidad correspondientes. Para el último período se han mantenido los modificadores del periodo anterior debido a la inercia de los hábitos constructivos, entendiendo además que los progresos en la calidad de la edificación mantienen niveles de protección sísmica comparables a los del periodo inmediato anterior.

### ***Modificadores por comportamiento $\Delta M_C$***

Es posible evaluar en cada clase de vulnerabilidad la variación del índice  $V_I^*$  según la Ecuación [6.2] como una función de varios parámetros por medio de los modificadores de comportamiento. La puntuación total que modifica el índice de vulnerabilidad básico para cada edificio en particular, se obtendrá simplemente sumando todas las puntuaciones de los modificadores por comportamiento, es decir:

$$V_{i-\text{edificio}} = V_{i-\text{clase}} + \sum_{j=1}^n M C_j \quad [6.2]$$

siendo  $M C_i$  cada uno de los  $n$  modificadores aplicados al índice de vulnerabilidad de la clase de vulnerabilidad a la que pertenece el edificio  $i$ .

Para cuantificar estos modificadores de vulnerabilidad de forma automática en el GIS se definen dos tipos de modificadores: a) los modificadores de edificio y b) los modificadores de posición. Los primeros consideran las características del edificio individual y son: el número de pisos, irregularidad en altura, irregularidad en planta,

longitud de la fachada y estado de conservación. Los modificadores de posición califican la situación relativa del edificio dentro de una manzana, bloque o conjunto de edificios del que forma parte y con los que está unido formando una manzana o agregado de edificios. Se considerarán como modificadores las diferencias entre el número de pisos del edificio y el de los edificios adyacentes y la posición dentro del bloque. A continuación se describen en detalle estos modificadores y se cuantifican sus valores.

### A) Modificadores de edificio

- *Número de plantas*

Los modificadores de comportamiento en función del número de plantas del edificio,  $M_h$ , se han aplicado con criterios diferentes para cada tipología (Tabla 6.5). Por ejemplo, de acuerdo a la Tabla 6.1, un edificio de 3 plantas de mampostería es considerado como edificio de altura media, y sin embargo sería considerado como un edificio bajo en el caso de tener su estructura de hormigón.

Para cuantificar el modificador para edificios de mampostería, se ha considerado la antigüedad del edificio según dos categorías: los edificios construidos antes del año 1940 y los edificios construidos a partir de 1950. Para los edificios de hormigón armado, más modernos, se ha tenido en cuenta el nivel de protección sísmica, aplicándose la corrección sólo a los edificios con un bajo nivel de diseño sismorresistente. La Tabla 6.5 resume los modificadores empleados.

**Tabla 6.5.** Modificador en función de la altura del edificio para cada tipología.

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



A los edificios con estructura metálica, pertenecientes a las tipologías S1, S3 o S5, y a los de estructura de madera, con tipología W, se les han aplicado los modificadores correspondientes a los edificios de hormigón y mampostería respectivamente (Tabla 6.5.).

- *Irregularidad en altura*

La irregularidad en altura ha sido claramente identificada como causa de incremento del daño en caso de terremotos. Este modificador tiene en cuenta este aumento de daño esperado por causa de esta irregularidad. Cada edificio suele contener diferentes subparcelas, es decir, diferente número de plantas dentro de él, y por tanto suele presentar diferencias en alturas (Figura 6.1), que en muchos casos, inducen una irregularidad en elevación importante.

La Ecuación [6.3] establece el criterio para cuantificar estos modificadores de comportamiento  $M_{ih}$ . La ecuación [6.4] establece el valor del modificador aplicado a todas las tipologías, que depende del valor del parámetro  $\sigma$  definido (Giovinazzi y Lagomarsino, 2003).

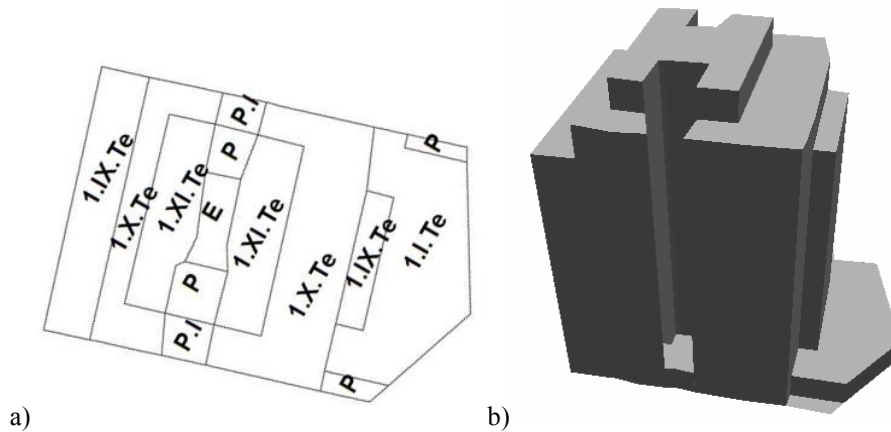
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (h_k^2 \cdot A_k) - h_m^2 \cdot \sum_{k=1}^n A_k}{\sum_{k=1}^n A_k}} \quad [6.3]$$

donde  $h_k$  y  $A_k$  son respectivamente el número de plantas y el área de la porción del edificio o subparcela  $k$ . El valor de  $h_m$  es el número medio de plantas del edificio. En su cálculo no se han considerado las subparcelas con cero número de plantas.

$$\begin{aligned} M_{ih} &= +0.02 \quad \text{si } 0.5 \leq \sigma < 1 \\ M_{ih} &= +0.04 \quad \text{si } \sigma \geq 1.0 \end{aligned} \quad [6.4]$$

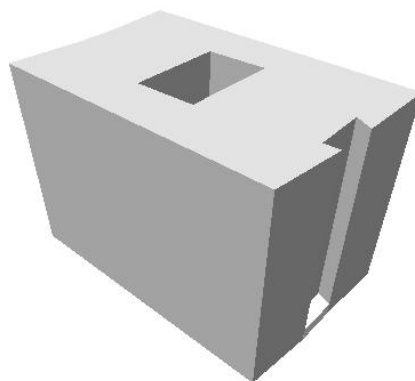
Este modificador, al igual que el anterior, ha sido calculados en el GIS ArcView mediante su lenguaje propio de programación llamado *Avenue* (Lantada y Nuñez, 2002), utilizando en ambos casos el valor de los textos de las subparcelas de la capa

catastral CDS (véase apartado 6.2) y su superficie que es calculada por el mismo GIS.



**Figura 6.1.** Diferencia de alturas en las subparcelas de un edificio a) vista en planta b) vista en 3D

Una vez calculado el parámetro  $\sigma$ , según la Ecuación [6.3], se detectó que, por un lado los edificios donde existen subparcelas con gran número de plantas, pero superficie reducida, generan un numerador negativo lo que hace imposible su cálculo, mientras que si se toma dicho numerador en valor absoluto, se penaliza en exceso estos edificios. Por otro lado, dichas ecuaciones también penalizan en exceso edificios altos que tienen un patio de luces o alguna pequeña subparcela de una o ninguna planta, como es el caso de la Figura 6.2, que recibiría la máxima penalización de +0.04 al tener un parámetro sigma de 13.1.



**Figura 6.2.** Edificio de 15 plantas con patio de luces interior de cero plantas y un patio lateral de una planta.

Por todo ello, en base a estas ecuaciones se genera una nueva función, expresada en la Ecuación [6.5], que evalúa la altura, o número de plantas ( $h_v$ ) que tendría un edificio con el mismo volumen total que el estudiado y su misma superficie en planta. La diferencia entre este número de plantas,  $h_v$  y el número máximo de plantas del edificio  $h_{max}$ , es el valor del parámetro  $\delta$ , que determinará el modificador a aplicar según la Ecuación [6.6]. Según estas ecuaciones al edificio de la Figura 6.2 le correspondería un parámetro  $\delta$  de 1.7, y un modificador de +0.02.

$$\delta = h_{max} - h_v = h_{max} - \frac{\sum_{k=1}^n (A_k \cdot h_k)}{\sum_{k=1}^n A_k} \quad [6.5]$$

$$\begin{aligned} M_{ih} &= +0.02 \text{ si } 1 < \delta \leq 3 \\ M_{ih} &= +0.04 \text{ si } \delta > 3 \end{aligned} \quad [6.6]$$

- *Irregularidad en planta*

La forma y disposición en planta de los edificios son determinantes en su comportamiento ante excitaciones sísmicas. Los edificios de planta regular presentan un comportamiento sísmico mejor que los que tienen una planta de geometría irregular. Se penalizan por tanto, aquellos edificios que son más alargados o que tienen protuberancias adicionales, lo cual puede provocar problemas de torsión así como concentraciones de esfuerzos en las esquinas y en los elementos más alejados de los centros de gravedad y de rigidez.

La forma poligonal de un objeto geográfico se puede definir por medio de la relación de la posición y distancia de los puntos de su perímetro respecto a un centro que puede ser por ejemplo el centro de masas o respecto a otros puntos típicos. Existen diferentes métodos para evaluar la geometría en planta del edificio, así como numerosos índices que intentan dar una medida precisa y cuantitativa del nivel de regularidad de una línea poligonal. Estos índices se suelen fundamentar en la

comparación de las formas de los objetos problema con las de figuras geométricas regulares.

En los años sesenta, se desarrollaron dos métodos de medida de formas con el objetivo de clasificarlas o de compararlas con formas geométricas concretas. Uno de ellos fue el método *vertex-lag* desarrollado por Bunge (1962). Este método permite clasificar formas basándose en medidas de distancias entre pares de vértices seleccionados de un polígono, pero requiere más de 8 vértices para obtener resultados satisfactorios, por lo que no es adecuado para nuestro caso ya que un gran número de edificios tienen plantas rectangulares o poligonales con menos de ocho vértices. Boyle y Clark (1964) proponen otro índice para cuyo cálculo se trazan una serie de radios a diferentes puntos del contorno, sus longitudes se comparan con las que tendría una circunferencia, de ese modo se obtiene el denominado *radial-line index*, denominado como  $S$  en la ecuación [6.7].

$$S = 100 \sum_{i=1}^n \left| \left( \frac{L_{ri}}{\sum_i L_{ri}} - \frac{1}{n} \right) \right| \quad [6.7]$$

Siendo  $L_{ri}$  la longitud del radio  $i$  y  $n$  el número de radios trazados desde el centro geométrico del polígono. Este índice puede adoptar valores entre 0, para una circunferencia y 200 para una línea recta, correspondiendo los valores mayores de 60 a formas sumamente alargadas. Este método resulta más sencillo de cómputo e interpretación, pero su precisión, al igual que el anterior, depende en gran medida del número de radios trazados o vértices utilizados.

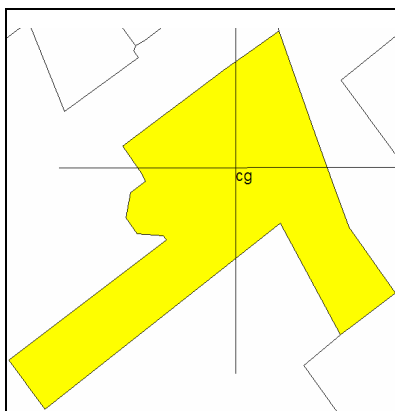
Ambos métodos se han descartado, por un lado debido a su difícil implementación en el GIS ya que requieren un gran número de vértices y son inviables en edificios con menos de ocho vértices. Por otro lado, aunque ambos permiten clasificar elementos poligonales en diferentes formas como por ejemplo cuadrados y rectángulos, estos métodos tampoco proporcionan una idea clara de la asimetría geométrica en planta.

Uno de los índices de forma más conocido es el denominado como Razón de Compacidad/Circularidad (*Compacness Ratio, RC*) definido por la ecuación [6.8] (Udwin, 1981).

$$RC = \sqrt{\frac{A}{A_C}} \quad [6.8]$$

Siendo  $A$  el área del polígono estudiado, y  $A_C$  el área del círculo que tiene el mismo perímetro que el polígono. El índice de compacidad vale 1 cuando el polígono es un círculo, y toma valores entre 1 y 0 para cualquier otra forma. Puede verse fácilmente que para un edificio de planta cuadrada  $RC$  vale  $0.5\sqrt{\pi} = 0.89$ . Cuanto más diferente de un círculo sea el polígono estudiado, más se acercará a 0 el índice  $RC$ .

Mena (2002) tiene en cuenta la irregularidad en planta mediante un índice que considera la asimetría del edificio a lo largo de dos líneas trazadas desde el centro de gravedad de la planta del edificio, en la dirección del eje  $x$  y del eje  $y$ . Hemos efectuado diversos ensayos para analizar la regularidad en planta de nuestros edificios constatando que este índice puede dar lugar a interpretaciones imprecisas o erróneas. Además el índice depende de la orientación geográfica del edificio. Así por ejemplo en edificios como el de la Figura 6.3, en el cual las irregularidades aparecen en direcciones no coincidentes con los ejes cartesianos, el índice de Mena (2002) tiene un valor de 0.08 que corresponde a su condición de máxima regularidad. Sin embargo la planta presenta una clara asimetría en planta. El índice de compacidad,  $RC$  vale 0.6, lo cual indica una compacidad o irregularidad de tipo intermedio.



**Figura 6.3.** Edificio con irregularidades en planta, y centro de gravedad (cg).

El índice de compacidad es el que ha demostrado ser más adecuado a las características de nuestro estudio y se ha utilizado para estimar los modificadores del índice de vulnerabilidad por irregularidad en planta. La Tabla 6.6 presenta los valores finalmente adoptados de este modificador para todas las tipologías, en función del índice de compacidad  $RC$ .

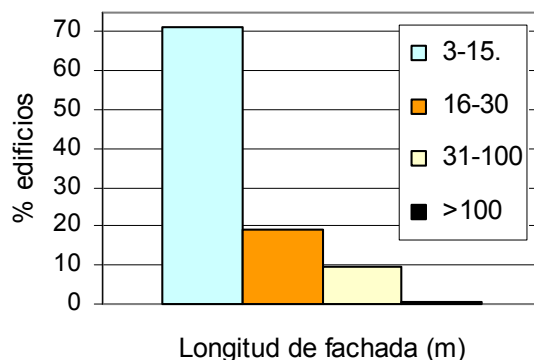
**Tabla 6.6.** Modificador en función de la regularidad en planta del edificio

PARÁMETRO $RC$	MODIFICADOR $M_{ip}$
$RC < 0.5$	+0.04
$0.5 \geq RC < 0.7$	+0.02

- *Longitud de la Fachada*

Durante los trabajos de rehabilitación o demolición de elementos de los edificios de mampostería del distrito del Eixample, se han podido observar una serie de características constructivas que les hacen particularmente vulnerables frente a un sismo. Una de estas características, que se presenta en el 100% de estos edificios, es la falta de conexión entre los muros de la fachada y los muros de carga interiores del edificio, perpendiculares a ella. A ello se une el grosor insuficiente de las diferentes partes del muro de fachada, que puede variar entre los 60 cm en la planta baja y los 30 cm en los pisos más altos (Paricio, 2001).

De acuerdo a los cálculos realizados por Castelló y Mañà (2004), se puede afirmar que una fachada libre de 20 metros de longitud puede colapsar al sufrir una aceleración tan baja como 0.04 g. Esta aceleración es la aceleración sísmica básica que las normas NCSE-94 y NCSE-02 establecen para la ciudad de Barcelona y que se estima corresponde a un periodo de retorno de 500 años. Cuando la fachada es de 15 metros, el colapso no se produce hasta 0.1g. A partir de la distribución de los edificios de mampostería del *Eixample* según su longitud de fachada (Figura 6.4), se ha definido un modificador positivo en función de la longitud de la fachada  $M_f$ , aplicable a los edificios con más de 15 metros de fachada, que sigue una distribución lineal según la ecuación [6.9].



**Figura 6.4.** Distribución de edificios del distrito de l' Eixample según su longitud de fachada.

$$M_f = \frac{0.04}{15} * Longitud_{fachada} - 0.04 \quad \text{Para } (Longitud_{fachada} > 15 \text{ m}) \quad [6.9]$$

Para una fachada de 30 metros la corrección en el índice de vulnerabilidad es de 0.04 y para una fachada de 20 m la corrección es de 0.013.

Para identificar la fachada o fachadas de cada edificio se han extraído mediante el GIS la línea o líneas de fachada correspondientes a cada parcela, calculando posteriormente su longitud mediante un programa en lenguaje *Avenue*. En los casos en que la fachada estaba formada por varios segmentos se ha realizado la suma de longitud de todos ellos, y para los edificios con más de una fachada (a diferentes calles), se ha tomado la de mayor longitud.

- *Estado de conservación*

Este modificador penaliza la presencia de desperfectos de la estructura, así como otras irregularidades o fallos en el proceso constructivo. Las directrices del proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) proponen cuantificar este modificador en función de la edad del edificio sobre la base de que los edificios se deterioran con el tiempo y por tanto sufren una progresiva pérdida de su capacidad de resistencia. Sin embargo, en Barcelona se han realizado numerosas campañas de restauración de edificios antiguos. Afortunadamente nuestra base de datos sobre los edificios residenciales de la ciudad dispone de información sobre el estado de conservación del edificio. Por lo tanto hemos cuantificado este modificador en base al código de la

base de datos GIS (ICB, 1986), que informa sobre el estado de conservación observado en campo. La información disponible ha permitido considerar tres categorías de edificios: los que requieren grandes reparaciones, los que presentan un grado de conservación adecuado o intermedio y los que presentan un estado de conservación bueno y no necesitan reformas. La Tabla 6.7 resume los modificadores adoptados.

*Tabla 6.7. Modificador en función del estado de conservación del edificio.*

ESTADO CONSERVACIÓN	CÓDIGO	MODIFICADOR $M_{ec}$
Requieren grandes reparaciones	1	+0.04
Intermedios	2	0
No necesitan reformas	3	-0.04

### ***B) Modificadores de posición***

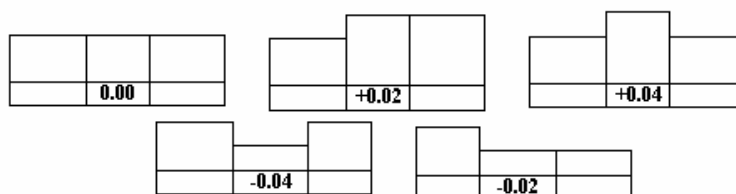
Las prácticas constructivas de la ciudad de Barcelona llevan a construir edificios en parcelas contiguas con notables diferencias en sus características estructurales y arquitectónicas. Los edificios contiguos suelen presentar diferencias en el año de construcción, pueden compartir una pared medianera o no, pueden tener diferencias en el número de pisos e incluso pueden presentar diferencias en las alturas de los pisos o plantas. Es bien sabido que estas discontinuidades en los materiales y en la geometría de los edificios contiguos así como la posición relativa de un edificio particular dentro de un agregado de edificios suelen ser causa de daño sísmico adicional. En este apartado se analizan estos aspectos y se cuantifican modificadores de índice de vulnerabilidad que permitan considerar estos efectos de forma adecuada y razonable.

- *Diferencia de altura*

Para cada edificio, este modificador se cuantifica en función de las diferencias entre su número de plantas y el número de plantas de los dos edificios adyacentes. La Figura 6.5 esquematiza los casos considerados y cuantifica los modificadores



empleados. Este modificador se implementa en el GIS comparando el número medio de plantas de cada edificio con el número de plantas medio de los dos edificios adyacentes en fachada.



**Figura 6.5.** Modificadores  $M_{hf}$  en función del número de plantas de los edificios adyacentes.

Los modificadores de la Figura 6.5 sólo se aplican cuando la diferencia entre el número de plantas del edificio estudiado y los edificios contiguos difieren en al menos 2 plantas.

El sistema GIS ha sido de gran ayuda en el cálculo de este modificador ya que ha permitido determinar, de forma automática, las parcelas contiguas a la considerada, consultar su número de plantas, compararlas con el número de plantas de la parcela estudiada y, finalmente, calcular y aplicar el modificador correspondiente.

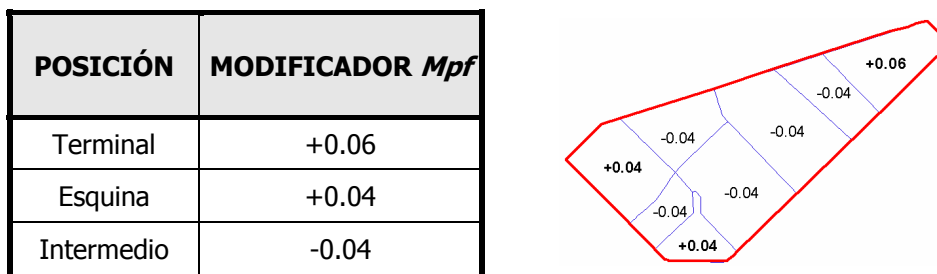
- *Posición del edificio en la manzana.*

Es bien conocido que en caso de terremoto los edificios situados en esquinas y finales de agrupaciones de edificios sufren más daño que aquellos que se hallan de alguna forma más protegidos por hallarse entre otros edificios en posiciones centrales de la agrupación. Por otra parte, en los edificios en chaflán del distrito del *Eixample* de Barcelona, las vigas se colocan en abanico, lo que les proporciona una menor resistencia. En este apartado se cuantifica un modificador para considerar estos efectos. Para ello se han considerado tres tipos de edificios en función de su posición dentro de una manzana o agregado de edificios: edificio esquina, edificio terminal y edificio intermedio.

Dada una manzana, diremos que un edificio es un edificio esquina cuando su fachada forma parte de un cruce de calles o chaflán. Un edificio se considera además terminal cuando se halla en contacto con el resto de la manzana tan sólo por uno de sus lados.

El resto de edificios se consideran edificios intermedios. En base a las características del daño observado en agrupaciones de edificios durante terremotos y en los condicionantes constructivos de los edificios esquina de la ciudad de Barcelona se ha considerado un modificador de vulnerabilidad positivo para los edificios esquina, penalizando los edificios terminales y se ha bonificado la vulnerabilidad de los edificios intermedios. La Figura 6.6 esquematiza los tres tipos de edificios considerados y cuantifica los modificadores asignados.

Para la obtención práctica de este modificador en los edificios esquina, inicialmente se obtiene la localización de las esquinas en la línea de fachada de cada manzana y posteriormente se realiza la búsqueda de las parcelas de la manzana que coinciden espacialmente con dichas esquinas.



**Figura 6.6.** Modificadores en función de la posición dentro de la manzana (izquierda) y esquema de los modificadores asignados a las parcelas de una manzana (derecha).

Para localizar los edificios terminales se ha calculado el número de edificios adyacentes a cada parcela, siendo terminales los que están en esquina y tienen únicamente un lado contiguo a la manzana, o lo que es lo mismo, un único edificio adyacente.

### 6.3.3 Índices de vulnerabilidad plausibles

El índice de vulnerabilidad característico  $\overline{V}_I$  más plausible de cada edificio en particular se calculará según la ecuación [6.1], sumando todas las puntuaciones de los modificadores al índice de vulnerabilidad básico característico  $V_I^*$ .

Los procedimientos para la estimación del índice de vulnerabilidad final, se resumen en la Tabla 6.8.

**Tabla 6.8.** Estimación del índice de vulnerabilidad plausible.

PARÁMETRO	APLICACIÓN	EDIFICIO AISLADO	GRUPO DE EDIFICIOS
ÍNDICE VULNERABILIDAD BÁSICO $V_I^*$	Tipología $V_{IBTM}^*$	Valores de la Tabla 6.3	$V_{IBTM}^* [Set] = \sum_t q_t \cdot V_{IBTM}^*$ $q_t$ es la proporción de edificios que están dentro de una cierta categoría. $V_{IBTM}^*$ es el índice del edificio
	Categoría $V_{IC}^*$	$V_{IC}^* = \sum_t p_t \cdot V_{IBTM}^*$ $p_t$ es la proporción de edificios que están dentro de la categoría $C_i$	$V_{IC}^* [Set] = \sum_c q_c \cdot V_{IC}^*$ $q_c$ es la proporción de edificios que están dentro de una cierta categoría
MODIFICADOR REGIONAL $\Delta M_R$	Tipología/ Categoría	$\Delta M_R$ Establecido en base a opinión de expertos y datos de vulnerabilidad observada	$\Delta M_R = \sum_t r_t \Delta M_{R,t}$ Donde $r_t$ es la proporción de edificios pertenecientes a una tipología específica $t$ , afectada por el $\Delta M_{R,t}$ correspondiente
MODIFICADORES DE COMPORTAMIENTO $\Delta M_C$	Tipología/ Categoría	$\Delta M_C = \sum M_C$	$\Delta M_C = \sum_k r_k \Delta M_{C,k}$ $r_k$ es la proporción de edificios caracterizados por el modificador $k$ , con una puntuación $\Delta M_{C,k}$

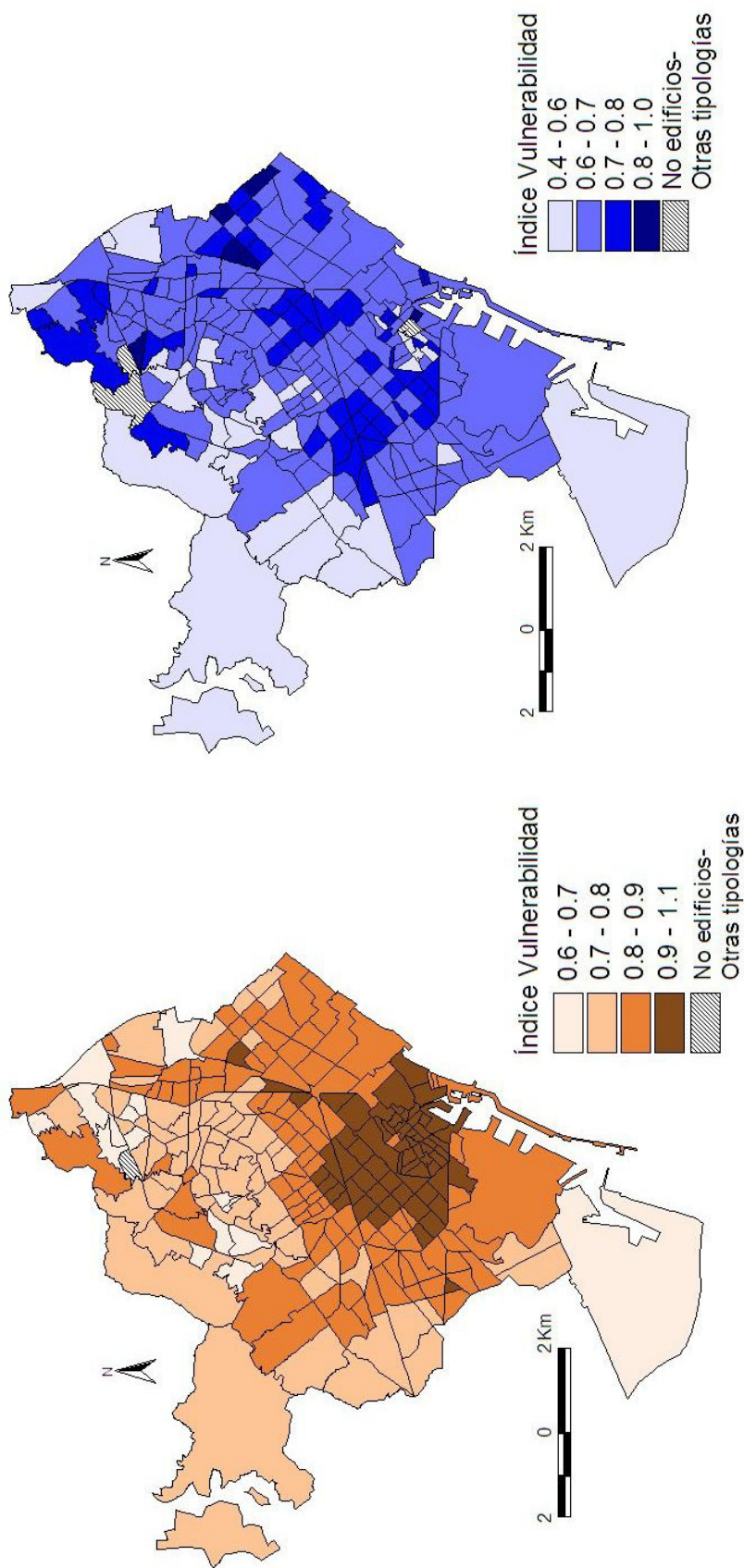
De hecho, esta tabla permite asignar el índice de vulnerabilidad a edificios individuales, pero también a colecciones o grupos de edificios cuya composición sólo se conoce de forma estadística. Este último caso es típico de ciudades en las que la información sobre las características tipológicas de los edificios individuales es escasa, parcial o incompleta y se estima la distribución global de edificios estableciendo categorías cuya composición estadística se suele estimar a partir de muestreos en zonas representativas de la ciudad. En este caso cada categoría puede agrupar diferentes tipos de edificios de la matriz de tipologías de edificios (BTM) en una proporción que viene determinada por la distribución estadística de la muestra. En este sentido en la Tabla 6.8 se distingue entre *Tipología*, que representa un edificio particular directamente identificable dentro de la matriz tipológica, y

*Categoría* que representa una agrupación de edificios de características comparables y cuya distribución estadística dentro de la categoría es conocida. La tercera columna de la Tabla 6.8 establece el procedimiento para estimar el índice de vulnerabilidad plausible de un edificio o una categoría de edificios. La última columna de la misma Tabla 6.8 muestra los procedimientos para estimar los índices de vulnerabilidad plausibles de conjuntos de edificios o de categorías y permite estimar índices de vulnerabilidad medios para diferentes divisiones territoriales de la ciudad, es decir para distritos, barrios y zonas de estudio o *zones de recherche petites (ZRP)*. Todos los cálculos involucrados para obtener estas estimaciones se basan en los índices de la Tabla 6.3 y los modificadores más arriba definidos y analizados. La calidad, nivel de detalle y completitud de nuestra base de datos ha permitido realizar la asignación de vulnerabilidad edificio a edificio.

La Figura 6.8 muestra los índices de vulnerabilidad medios de cada una de las ZRP de la ciudad de Barcelona, para edificios de mampostería no reforzada. La Figura 6.7 es análoga a la Figura 6.8 pero para los edificios de hormigón armado. Como puede verse en el caso de mampostería, los mayores valores del índice de vulnerabilidad se concentran en el casco antiguo de la ciudad donde los edificios de mampostería antiguos constituyen un alto porcentaje del parque de edificios de la ciudad.

El índice de vulnerabilidad medio de los edificios de mampostería de la ciudad es de 0.89, con unos índices que van desde 0.7 hasta valores máximo de 1. Los modernos edificios de hormigón armado, sin embargo, muestran unos índices de vulnerabilidad menores, en el rango entre 0.4 y 0.9 y su distribución es más uniforme en toda la ciudad. El índice de vulnerabilidad medio de los edificios de hormigón armado de la ciudad de Barcelona es de 0.66.

El valor más plausible  $\bar{V}_I$  del índice de vulnerabilidad obtenido para cada edificio correlacionado con la intensidad macrosísmica mediante funciones de vulnerabilidad semi-empíricas permitirá estimar el grado de daño medio y obtener escenarios de daño sísmico.



**Figura 6.8.** Índice de vulnerabilidad medio de edificios de mampostería por ZRP.

**Figura 6.7.** Índice de vulnerabilidad medio de edificios de hormigón armado por ZRP.

## 6.4 Capacidad y fragilidad

La definición de la acción sísmica en términos de intensidad es pobre y existe consenso en la comunidad sismológica e ingenieril que es preciso avanzar hacia métodos en los que la acción sísmica venga definida por acelerogramas o por espectros de respuesta. Por otra parte el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) encapsula en un solo índice un gran número de parámetros entre los que destacan los de diseño, construcción, situación, suelo y estado de conservación de un edificio, entre otros. El MIV cuantifica la acción sísmica por medio de la intensidad macrosísmica y el edificio por medio de un índice; el método del espectro de capacidad cuantifica la acción sísmica mediante el espectro de respuesta y caracteriza el edificio Mediante su Espectro de Capacidad (MEC), que en su aproximación bilineal se expresa por medio de dos puntos denominados punto de cedencia y punto de capacidad última. Está claro que para aplicar el MEC se requiere información más detallada tanto sobre la acción sísmica esperada como sobre el edificio. En efecto, la obtención de curvas y espectros de capacidad para un edificio o clase de edificios suele requerir su modelado estructural y, por lo tanto, es conveniente conocer sus detalles de diseño y construcción. La aplicación de este método a una numerosa población de edificios sugiere su agrupamiento en clases suficientemente amplias para representar el máximo número de edificios y suficientemente concretas para representar bien las diferencias en las características constructivas. Se impone pues un esfuerzo de clasificación y agrupación del parque edificado en clases de edificios. Como hemos visto en el capítulo anterior, podemos agrupar nuestros edificios en dos grandes clases representativas de, aproximadamente, el 92% de los edificios de la ciudad: edificios de mampostería y edificios de hormigón armado. Dentro de los edificios de mampostería se incluye la clase MN, que es la más frecuente y típica de la ciudad formada por muros de carga de mampostería, la clase OM caracterizada por pilares de obra y vigas maestras de madera y la clase OF cuyos edificios tienen pilares de obra con vigas maestras metálicas. Los edificios de hormigón armado incluyen la clase FO. Paralelamente al desarrollo del Sistema de Información Geográfica y a la implementación del Método del Índice de Vulnerabilidad, se han

desarrollado estudios que han permitido modelar y caracterizar estas dos clases de edificios. Bonett (2003) modela y desarrolla curvas y espectros de capacidad para edificios de mampostería de pequeña, mediana y gran altura (Bonett *et al.*, 2004) mientras que Moreno *et al.* (2004) realizan un estudio análogo para edificios de hormigón armado. El desarrollo de escenarios sísmicos determinista y probabilista en términos de espectros de demanda (Irizarry *et al.*, 2002; Irizarry, 2004) van a permitir aplicar también el Método del Espectro de Capacidad a Barcelona. En este apartado se resume la información referente a los espectros de capacidad de los edificios típicos de Barcelona y se describe un método simplificado que permite obtener curvas de fragilidad a partir de los espectros de capacidad y de unas hipótesis simplificadoras sobre la distribución estadística del daño esperado.

### 6.4.1 Espectros de capacidad

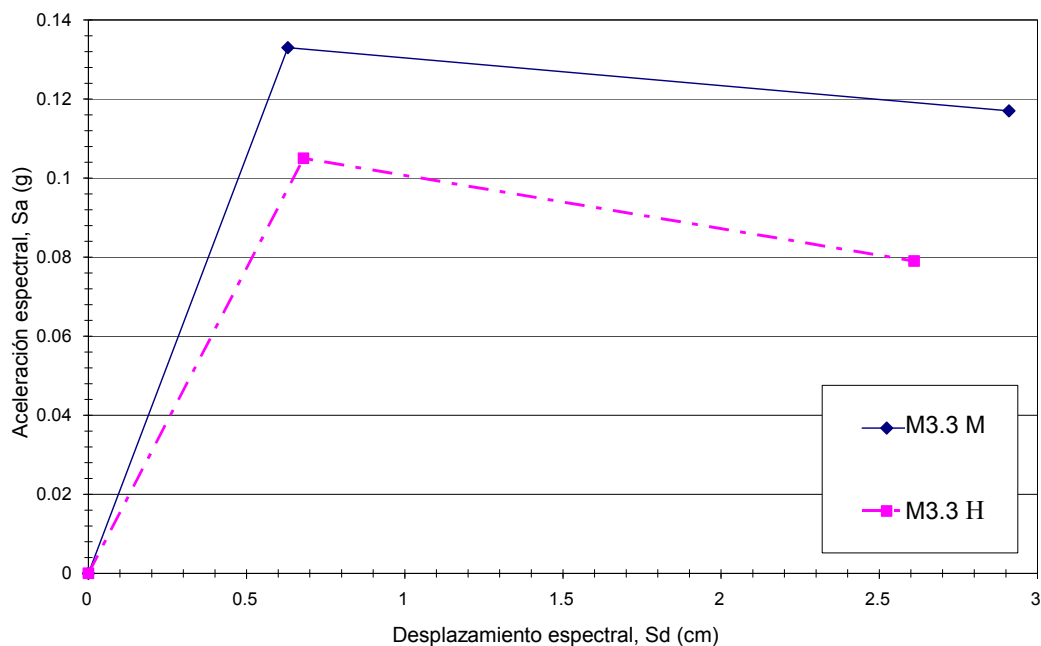
A partir de planos estructurales detallados, se modelaron tres edificios de mampostería no reforzada del distrito del *Eixample*. Los edificios analizados corresponden a modelos de mampostería no reforzada de baja, mediana y gran altura, con dos, cuatro y seis plantas respectivamente. Los edificios representativos de edificios altos y de altura intermedia tienen el mismo tamaño de planta ( $18.9 \times 24.5 \text{ m}^2$ ), pero diferente altura (17 m y 24 m respectivamente) mientras que el edificio bajo tiene una planta de  $7.3 \times 9.3 \text{ m}^2$  y una altura de 6.65 m. Este caso corresponde a casas unifamiliares de áreas residenciales de Barcelona (Bonett, 2003). Para obtener las curvas de capacidad de cada edificio se realizó un análisis estático no lineal (análisis *pushover*), utilizando el programa TreMuri (Galasco *et al.*, 2002). Este programa utiliza un modelo de macroelementos para representar los paneles de mampostería, y considera el daño estructural por medio de modelos teóricos detallados que han sido calibrados a partir de los mecanismos de disipación observados en casos reales.

**Tabla 6.9.** Características de los espectros de capacidad para los seis edificios analizados.

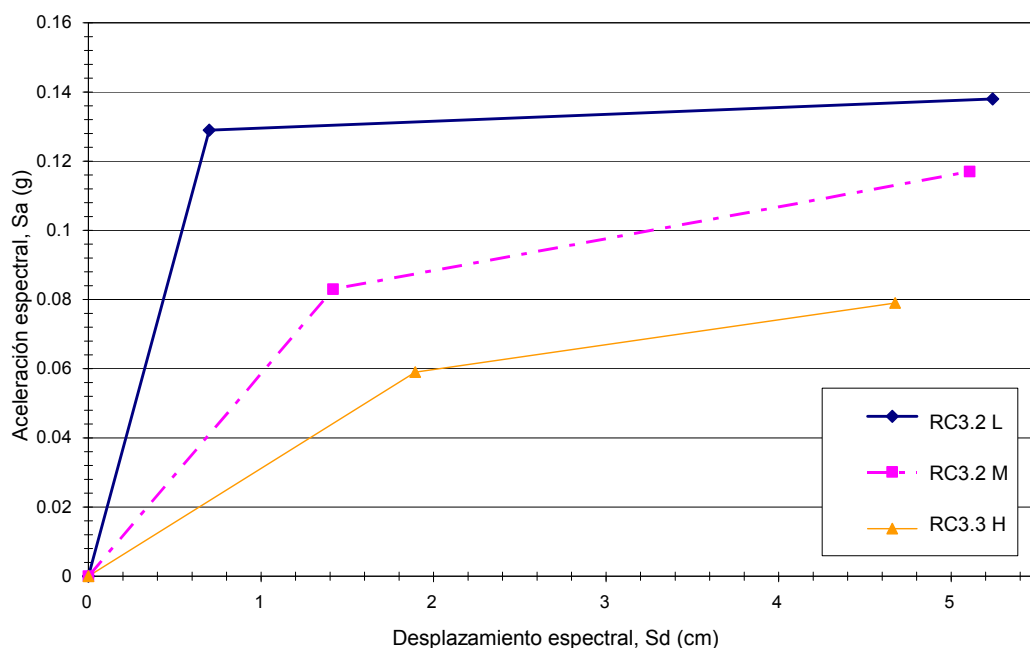
Tipología		Nº Pisos/ Altura (m)	Punto de cedencia		Punto de capacidad última	
			Dy (cm)	Ay (g)	Du (cm)	Au (g)
Mampostería no reforzada	Altura baja	1-2 pisos/ ≤ 6m	0.27	0.651	1.36	0.558
	Altura media	3-5 pisos/ 6-15m	0.63	0.133	2.91	0.117
	Altura alta	6 o más pisos/ ≥ 15m	0.68	0.105	2.61	0.079
Hormigón Armado	Altura baja	1-3 pisos/ ≤ 6m	0.70	0.129	5.240	0.138
	Altura media	4-7 pisos/ 6-15m	1.418	0.083	5.107	0.117
	Altura alta	8 o más pisos/ ≥ 15m	1.894	0.059	4.675	0.079

De modo similar, en base a planos estructurales detallados, se modelaron tres edificios representativos de hormigón armado, con una altura baja (dos plantas, 5.2 m de altura), media (5 plantas, 15.8 m de altura) y alta (8 plantas, 24.0 m de altura). Los edificios de altura media y alta tienen una planta rectangular con un tamaño de 25.65 × 21.90 m<sup>2</sup>, mientras que el de altura baja tiene una planta cuadrada de 13.6 × 13.6 m<sup>2</sup> (Moreno *et al.*, 2004). Las estructuras se modelaron por medio de varios pórticos planos interconectados. Las curvas de capacidad fueron obtenidas mediante análisis estáticos no lineales utilizando el programa RUAUMOKO-2D (Carr, 2000). El efecto de diafragma rígido fue considerado construyendo los nodos pertenecientes a la misma planta.





**Figura 6.9.** Espectro de capacidad bilineal para edificios de mampostería no reforzada de altura media (M3.3 M) y alta (M3.3 H).



**Figura 6.10.** Espectro de capacidad bilineal para edificios de hormigón armado de altura baja (RC3.2 L), media (RC3.2 M) y alta (RC3.2 H).

La Tabla 6.9 muestra los puntos de cedencia y capacidad última de la representación bilineal de los espectros de capacidad de los edificios analizados y que se consideran representativos de las tipologías que se indican en la misma Tabla 6.9. La Figura 6.9

muestra los espectros de capacidad para los edificios de mampostería de mediana y de gran altura. La Figura 6.10 muestra los espectros correspondientes a los edificios de hormigón armado. El espectro de capacidad para los edificios de mampostería bajos, representativo de casas unifamiliares, no se muestra en la Figura 6.9 debido a los elevados valores de aceleración espectral. Puede apreciarse cómo para ambas tipologías la capacidad disminuye con la altura del edificio.

## 6.4.2 Curvas de fragilidad

En general los métodos basados en el espectro de capacidad (FEMA/NIBS, 1999; Milutinovic y Trendafiloski, 2003) consideran 5 estados de daño: No daño (*None*), Leve (*Slight*), Moderado (*Moderate*), Severo (*Extensive*), y Completo (*Complete*). Para cada estado de daño dado, la curva de fragilidad proporciona la probabilidad de alcanzar o superar ese estado de daño como función de un parámetro que representa la acción sísmica sufrida por el edificio. En este caso dicho parámetro es el desplazamiento espectral  $S_d$ . Existe también un amplio consenso en la literatura en que estas curvas de fragilidad siguen una distribución lognormal que queda definida mediante el valor medio y la desviación típica de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P[d_s / S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{d_s}} \ln \left( \frac{S_d}{\overline{S_d}_{d_s}} \right) \right] \quad [6.10]$$

donde  $\overline{S_d}_{d_s}$  es el valor medio del desplazamiento espectral en el que la estructura alcanza el umbral del estado de daño  $d_s$ ,  $\beta_{d_s}$  es la desviación estándar del logaritmo neperiano del desplazamiento espectral,  $\Phi$  es la función de distribución normal acumulada y  $S_d$  es el desplazamiento espectral (en el Anejo A puede verse más información acerca de estas funciones estadísticas empleadas).

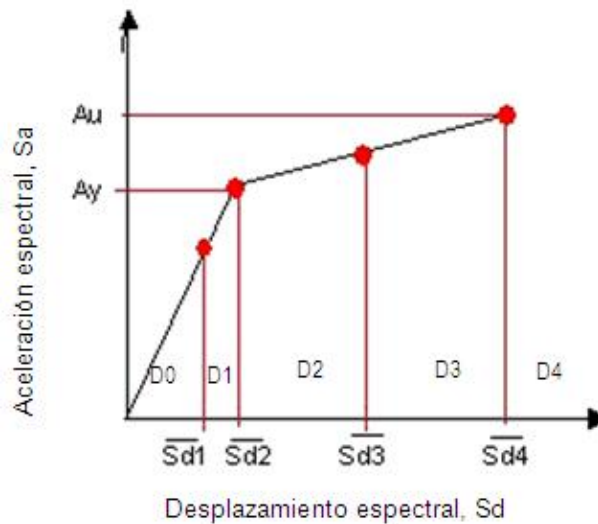
La obtención de curvas de fragilidad debe resolver dos problemas. El primero, para cada estado de daño  $d_s$ , consiste en conocer el umbral de daño, es decir el valor del parámetro medio  $\overline{S_d}_{d_s}$ , para el que la probabilidad de excedencia del estado de daño es del 50%. La resolución del segundo problema debe permitir conocer la

distribución de probabilidades de excedencia de daño para, en este caso, cualquier valor del desplazamiento espectral  $S_d$  lo que va a permitir determinar el parámetro  $\beta_{ds}$ . La resolución de ambos problemas no es trivial y puede abordarse desde diversas ópticas. El mejor método consistiría en la observación directa del daño causado por terremotos y lo ideal sería disponer de datos de acelerogramas, valores espectrales y daños que permitieran cubrir todo el rango de definición de la curva de fragilidad. Pero esta situación no se da prácticamente en ninguna región del mundo. En ausencia de datos que permitan definir correctamente la curva de fragilidad, se puede recurrir a la experimentación. La construcción de modelos a escala y su sometimiento a acciones sísmicas puede contribuir de forma razonable a una correcta definición de las curvas de fragilidad, pero este método es costoso. Un tercer método consiste en la simulación numérica de terremotos y estructuras y el análisis de los efectos de la acción sísmica sobre los edificios en base a programas capaces de representar correctamente la respuesta del edificio. Este método requiere implementar algoritmos capaces de resolver las ecuaciones del movimiento de los edificios y un conocimiento preciso de las características estructurales y arquitectónicas de los edificios que se estudian. En todos los casos queda la imprecisión en la definición de los estados de daño y su descripción en términos de valores espectrales. Existen métodos simplificados que se basan en suposiciones razonables y en opiniones expertas. El método que se ha utilizado aquí define los umbrales de daño a partir de la curva de capacidad y para la distribución del daño esperado se supone una distribución de probabilidad binomial o beta equivalente.

### ***Umbrales de daño***

Lagomarsino *et al* (2002), definen los umbrales de los estados de daño para un edificio concreto en base a la curva de fragilidad. Los puntos de cedencia y de resistencia última se toman como los umbrales de daño para los estados de daño moderado y completo. Los umbrales de daño para los estados de daño leve y severo se fijan suponiendo valores razonables respectivamente en la rama elástica del espectro de capacidad y entre los puntos de cedencia y de capacidad última. La Figura 6.11 muestra este procedimiento y las ecuaciones [6.11][6.12][6.13][6.14]

cuantifican los valores concretos de los umbrales de daño que se han fijado en base a la experiencia y a la opinión experta. El método se fundamenta en el hecho que no es esperable daño estructural hasta que el edificio no ingresa en el rango de comportamiento inelástico. Es ahí donde se producen deformaciones permanentes que son la causa de daño físico en el edificio.



**Figura 6.11.** Definición de los umbrales de los estados de daño a partir del espectro de capacidad.

$$\overline{Sd}_1 = 0.7D_y \quad \text{Leve} \quad [6.11]$$

$$\overline{Sd}_2 = D_y \quad \text{Moderado} \quad [6.12]$$

$$\overline{Sd}_3 = D_y + 0.25(D_u - D_y) \quad \text{Severo} \quad [6.13]$$

$$\overline{Sd}_4 = D_u \quad \text{Completo} \quad [6.14]$$

***Distribución del daño esperado***

Para un estado de daño, el umbral de daño corresponde al valor de la variable espectral, desplazamiento espectral en nuestro caso, para el cual la probabilidad de excedencia del estado de daño considerado es del 50%. Si suponemos que el daño esperado para este desplazamiento espectral sigue una distribución de probabilidad determinada, podemos estimar las probabilidades de excedencia de los otros estados de daño. Nuestro método supone que la distribución de probabilidad es binomial o beta equivalente y estima las probabilidades de ocurrencia y de excedencia de cada estado de daño suponiendo que uno de ellos presenta una probabilidad de excedencia del 50%. La Tabla 6.10 muestra el resultado de realizar este ejercicio. Estos valores de probabilidad de excedencia se usarán para ajustar la curva de fragilidad definida por la ecuación [6.10].

**Tabla 6.10.** Probabilidades para los estados de daño esperados, fijando la probabilidad de cada estado de daño al 50%. Se supone una distribución binomial o beta equivalente.

<b>Condición</b>	<b>Leve <math>P_{\beta}(1)</math></b>	<b>Moderado <math>P_{\beta}(2)</math></b>	<b>Severo <math>P_{\beta}(3)</math></b>	<b>Completo <math>P_{\beta}(4)</math></b>
$P_{\beta}(1)=0.5$	0.500	0.119	0.012	0.000
$P_{\beta}(2)=0.5$	0.896	0.500	0.135	0.008
$P_{\beta}(3)=0.5$	0.992	0.866	0.500	0.104
$P_{\beta}(4)=0.5$	1.000	0.988	0.881	0.500

***Ajuste de las curvas***

Una vez conocidos los desplazamientos espectrales correspondientes a los umbrales de cada estado de daño y la distribución de probabilidades de excedencia de todos y cada uno de los estados de daño en el valor del desplazamiento espectral umbral correspondiente, estos desplazamientos espectrales, junto con las distribuciones de probabilidad dadas en la Tabla 6.10, se ajusta por mínimos cuadrados la función de

distribución lognormal  $\Phi$ , de la ecuación [6.10] y se obtiene la desviación estándar  $\beta_{ds}$ .

La Tabla 6.11 muestra los parámetros  $\overline{Sd}_{ds}$  y  $\beta_{ds}$  obtenidos de esta forma para cada una de las tipologías de edificios analizadas. La Figura 6.12 muestra los resultados obtenidos para edificios de mampostería de altura media. Se incluyen los umbrales de los estados de daño con las correspondientes distribuciones de probabilidad y las curvas de fragilidad. La Figura 6.13 muestra el caso de los edificios de hormigón armado de altura intermedia. Puede apreciarse que los edificios de hormigón armado tienen un mejor comportamiento sísmico que los de mampostería. Por ejemplo, para un desplazamiento espectral de 4 cm, la probabilidad esperada para el estado de daño completo es aproximadamente del 30% para los edificios de hormigón mientras que sube hasta un 60% para los de mampostería.

**Tabla 6.11.** Parámetros característicos (desviaciones típicas  $\beta_i$  y valores medios  $\overline{Sd}_i$ ) de las curvas de fragilidad para las tipologías analizadas y para los 4 estados de daño.

Tipología de edificio		Leve		Moderado		Severo		Completo	
		$\overline{Sd}_1$ (cm)	$\beta_1$	$\overline{Sd}_2$ (cm)	$\beta_2$	$\overline{Sd}_3$ (cm)	$\beta_3$	$\overline{Sd}_4$ (cm)	$\beta_4$
Mampostería No Reforzada	4 plantas	0.19	0.28	0.27	0.37	0.54	0.54	1.36	0.72
	5 plantas	0.44	0.40	0.63	0.50	1.20	0.75	2.91	0.70
	6 plantas	0.46	0.30	0.68	0.65	1.68	0.65	2.61	0.65
Hormigón Armado	3 plantas	0.49	0.28	0.70	0.37	1.84	0.82	5.24	0.83
	5 plantas	0.99	0.28	1.42	0.36	2.34	0.50	5.11	0.61
	8 plantas	1.33	0.28	1.89	0.29	2.59	0.34	4.68	0.45

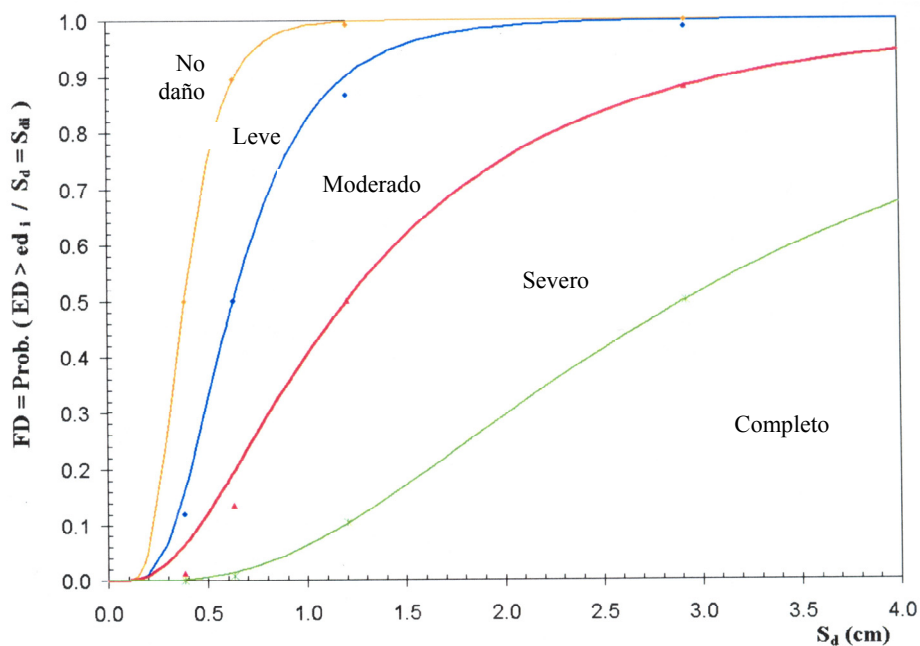


Figura 6.12. Curvas de fragilidad para edificios de mampostería no reforzada de altura media (4 plantas) (Bonett, 2003).

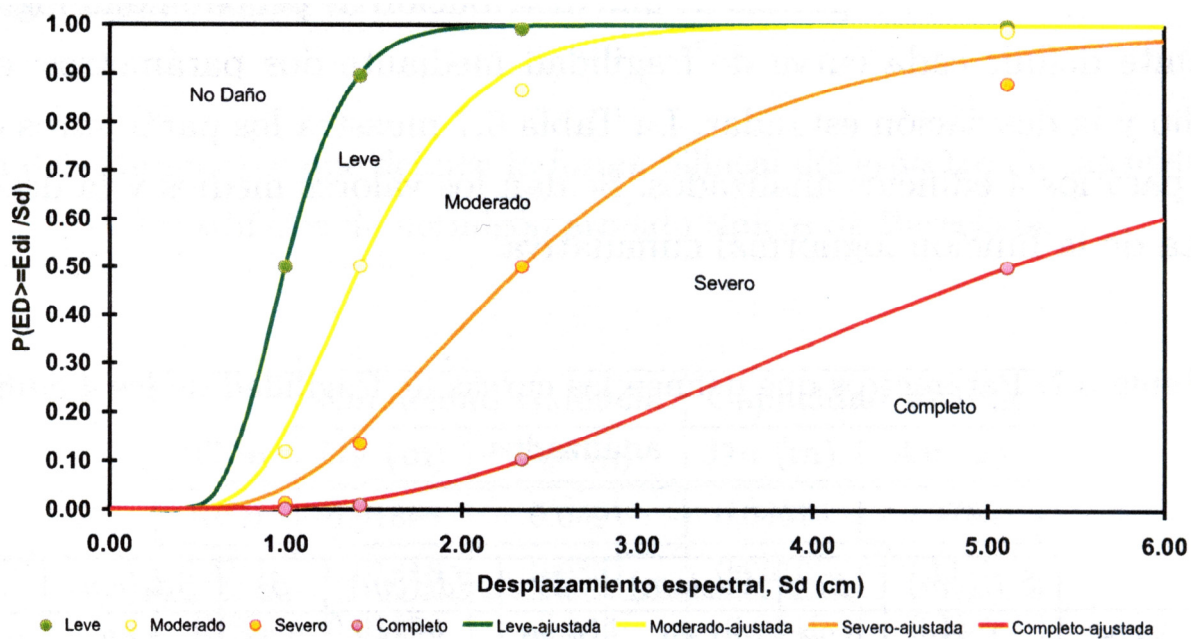


Figura 6.13. Curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado de altura media (5 plantas) (Moreno, 2006).

## 6.5 Resumen y conclusión

Las tendencias actuales de análisis y predicción del daño sísmico esperado en ambientes urbanos usan dos métodos: el Método del Índice de Vulnerabilidad (MIV) y el Método del Espectro de Capacidad (MEC). El primero cuantifica la acción sísmica en términos de intensidad macrosísmica y evalúa la resistencia sísmica del edificio en términos de un índice de vulnerabilidad. La calibración de funciones y matrices de vulnerabilidad permiten desarrollar escenarios de riesgo sísmico en pueblos y ciudades a partir de información simplificada sobre la acción sísmica y sobre los edificios. El MEC define la acción sísmica en términos espectrales y evalúa la resistencia sísmica de los edificios en términos de curvas de fragilidad. En este capítulo se han desarrollado índices de vulnerabilidad y curvas de fragilidad para los edificios residenciales de Barcelona.

Los índices de vulnerabilidad se han asignado en función de la clase de vulnerabilidad a la que pertenece el edificio, modificándolo de forma individual para cada edificio concreto en función de diversos parámetros que afectan a su comportamiento. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que los edificios de mampostería son edificios más antiguos y más vulnerables que los de hormigón armado ya que la mayoría fueron construidos sin ningún tipo de regulación sísmica, al no existir normativas o no ser obligatorias en Barcelona en el momento de su construcción. El bajo nivel de protección sísmica de los edificios de hormigón armado y el mal comportamiento dinámico de sus forjados reticulares inducen también una elevada vulnerabilidad.

Para desarrollar curvas de fragilidad se ha utilizado una técnica simplificada que permite su desarrollo a partir de los espectros de capacidad y de unas pocas hipótesis sobre los umbrales de los estados de daño y de la distribución de probabilidad de daño. Con todo, el método requiere el modelado y análisis estático no lineal de los edificios, por lo que se ha optado por desarrollar espectros de capacidad y curvas de fragilidad sólo para los edificios de mampostería y de hormigón armado ya que estas dos tipologías abarcan el 92% de los edificios residenciales de la ciudad. Concretamente el 72.3% de los edificios residenciales son de mampostería y el



19.7% de hormigón armado. Los edificios de hormigón armado también en este caso presentan un mejor comportamiento frente a los sismos que los de mampostería. Por ejemplo, para un desplazamiento espectral de 4 cm, la probabilidad de colapso es aproximadamente de un 30% para los edificios de hormigón y es mayor, del 60%, para edificios de mampostería.

Nuestros análisis de vulnerabilidad y fragilidad apuntan hacia una baja capacidad de resistencia sísmica de los edificios de Barcelona. Este fenómeno es típico de las ciudades que como Barcelona se hallan en áreas de sismicidad moderada o baja y es causado por la nula preocupación por el fenómeno sísmico. Pero esta elevada vulnerabilidad unida a la acumulación de población e infraestructuras hacen esperables daños y riesgos considerables para intensidades sísmicas probables en la ciudad.

<b>6. VULNERABILIDAD, CAPACIDAD Y FRAGILIDAD .....</b>	<b>175</b>
6.1 Introducción	175
6.2 La matriz de tipologías de edificios (BTM)	177
6.3 Vulnerabilidad	182
6.3.1 Índices básicos	182
6.3.2 Modificadores	184
6.3.3 Índices de vulnerabilidad plausibles	199
6.4 Capacidad y fragilidad	203
6.4.1 Espectros de capacidad	204
6.4.2 Curvas de fragilidad	207
6.5 Resumen y conclusión	213

Bonett, R., Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lagomarsino, S. y Penna, A. (2004). Performance assessment for unreinforced masonry buildings in low seismic hazard areas. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá)*, CD-ROM, Paper No. 409.

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.

Boyle, R. R. y Clark, W. A. V. (1964). "The concept of shape in geography". *Geographical review* (54): 561-572.

Bunge, W. (1962). "Theoretical Geography". *Lund Studies in Geography, Ser. C. No. 1*.

Carr, A. (2000). *Inelastic Dynamic Analysis Program: RUAUMOKO and Post-processor for RUAUMOKO*. Department of Civil Engineering, University of Canterbury. New Zealand.

Castelló, D. y Mañà, F. (2004). *The vulnerability of old buildings in the Eixample district*. ITEC, Barcelona. pp.

CEN (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Comité Européen de Normalisation, Brussels. 219 pp.

FEMA/NIBS: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences (1999). *HAZUS' 99 technical manual. Earthquake Loss Estimation Methodology*, Washington, D.C., USA. pp.

Galasco, A., Lagomarsino, S. y Penna, A. (2002). *TreMuri Program: Seismic Analyser of 3D masonry buildings. Technical report*. Universidad de Génova, Italia. pp.

Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2003). Comunicación personal, Genoa (Italy)

ICB, S. A., Informació Cartogràfica i de Base, S.A. (1986). *Recull de gràfiques, instruccions i supports de recollida d'informació impresos i altres documents*. Ajuntament de Barcelona, Barcelona. 52 pp. (en catalán)

Irizarry, J. (2004). An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System Barcelona. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería

- del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 290 pp.
- Irizarry, J., Goula, X. y Susagna, T. (2002). *Seismic Hazard Assesment for the City of Barcelona*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona. 95 pp.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. y Resemini, S. (2002). *WP4-Vulnerability assesment of current buildings: I level methodology for the vulnerability assesment of current buildings and guidelines for the implementation. RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk escenarios with application to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-0014*. 28 pp.
- Lantada, N. y Nuñez, A. (2002). *Sistemas de Información Geográfica. Prácticas con ArcView*. Edicions UPC, Barcelona. 226 pp.
- Lungu, D., Aldea, A., Arion, A., Vacareanu, R., Petrescu, F. y Cornea, T. (2001). *WPI Report European distinctive features, inventory database and typology*. Risk-UE Project. 58 pp.
- Mena, U. (2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 240 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.
- Moreno, R., Pujades, L. G., Barbat, A. H. y Aparicio, A. C. (2004). Influence of masonry infills walls on the seismic behaviour of multi-storeys waffle slabs RC buildings. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No.209*.
- MV101 (1963). *Norma N.V.101-1962. Acciones en la edificación*. Ministerio de la Vivienda, decreto del 17 de enero de 1963 (195/1963). pp.
- NCSE-02 (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente Española. Parte General y de Edificación, Comisión Permanente de Normas Sismorresistente, Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre de 2002, Boletín Oficial del Estado nº 244, viernes 11 de octubre de 2002*. Ministerio de Fomento. 35898-35987 pp.
- Paricio, A. (2001). *Secrets d'un sistema constructiu: l'Eixample*. Edicions UPC, Barcelona. 100 pp. (en catalán)
- PDS-1 (1974). *Norma Sismorresistente P.D.S.-I*. Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno, Decreto de 30 de agosto de 1974, BOE, 279, 21 de noviembre de 1974. 3723-3740 pp.
- PGS-1 (1968). *Decreto 106/1968, de 16 de enero, por el que se aprueba la aplicación de la «Norma Sismorresistente PGS I (1968), parte A»*. Presidencia del Gobierno. BOE 30/1968. Fecha de publicación. 04/02/1968. 1658 pp.

SES2002 (2002). *Simulación de escenarios sísmicos, SES 2002. Manual técnico*. Ministerio del Interior. Dirección General de Protección Civil e Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 47 pp.

Udwin, D. (1981). *Introductory spatial analysis*. Ed. Methuen, London. 212 pp.

<b>Figura 6.1.</b> Diferencia de alturas en las subparcelas de un edificio a) vista en planta b) vista en 3D	191
<b>Figura 6.2.</b> Edificio de 15 plantas con patio de luces interior de cero plantas y un patio lateral de una planta.	191
<b>Figura 6.3.</b> Edificio con irregularidades en planta, y centro de gravedad (cg).	194
<b>Figura 6.4.</b> Distribución de edificios del distrito de l' Eixample según su longitud de fachada.	196
<b>Figura 6.5.</b> Modificadores $M_{hf}$ , en función del número de plantas de los edificios adyacentes.	198
<b>Figura 6.6.</b> Modificadores en función de la posición dentro de la manzana (izquierda) y esquema de los modificadores asignados a las parcelas de una manzana (derecha).	199
<b>Figura 6.7.</b> Índice de vulnerabilidad medio de edificios de hormigón armado por ZRP.	202
<b>Figura 6.8.</b> Índice de vulnerabilidad medio de edificios de mampostería por ZRP.	202
<b>Figura 6.9.</b> Espectro de capacidad bilineal para edificios de mampostería no reforzada de altura media (M3.3 M) y alta (M3.3 H).	206
<b>Figura 6.10.</b> Espectro de capacidad bilineal para edificios de hormigón armado de altura baja (RC3.2 L), media (RC3.2 M) y alta (RC3.2 H).	206
<b>Figura 6.11.</b> Definición de los umbrales de los estados de daño a partir del espectro de capacidad.	209
<b>Figura 6.12.</b> Curvas de fragilidad para edificios de mampostería no reforzada de altura media (4 plantas) (Bonett, 2003).	212
<b>Figura 6.13.</b> Curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado de altura media (5 plantas)(Moreno, 2006).	212
<b>Tabla 6.1.</b> Matriz de tipologías de edificios (BTM) de Risk-UE, con su correspondiente código de la base de datos de Barcelona y diseño sísmico en la ciudad.	179
<b>Tabla 6.2.</b> Clases de vulnerabilidad propuestas para las tipologías de la BTM de Risk-UE.	183
<b>Tabla 6.3.</b> Índices de vulnerabilidad propuestos para las tipologías de la BTM de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	184
<b>Tabla 6.4.</b> Modificadores regionales del índice de vulnerabilidad por tipologías, según periodos constructivos basados en el diseño sísmico.	186
<b>Tabla 6.5.</b> Modificador en función de la altura del edificio para cada tipología.	189
<b>Tabla 6.6.</b> Modificador en función de la regularidad en planta del edificio	195
<b>Tabla 6.7.</b> Modificador en función del estado de conservación del edificio.	197
<b>Tabla 6.8.</b> Estimación del índice de vulnerabilidad plausible.	200
<b>Tabla 6.9.</b> Características de los espectros de capacidad para los seis edificios analizados.	205
<b>Tabla 6.10.</b> Probabilidades para los estados de daño esperados, fijando la probabilidad de cada estado de daño al 50%. Se supone una distribución binomial o beta equivalente.	210
<b>Tabla 6.11.</b> Parámetros característicos (desviaciones típicas $\beta_i$ y valores medios $\overline{Sd}_i$ ) de las curvas de fragilidad para las tipologías analizadas y para los 4 estados de daño.	211