
CAPÍTULO VI

Evaluación de los escenarios de daño

6 EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE DAÑO

6.1 Introducción

Como se observó en los capítulos anteriores, los estudios de Riesgo Sísmico a nivel urbano requieren de una metodología que permita evaluar la calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios, para poder obtener posibles escenarios de daño como consecuencia de un terremoto. Evidentemente, esto sólo será posible con la disposición de los datos requeridos por la metodología, es decir, la información de los edificios, de las características del suelo en donde se encuentran ubicados y de la peligrosidad sísmica de la zona. Para este trabajo se eligió la metodología del índice de vulnerabilidad que permite evaluar la calidad estructural de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado mediante la calificación de 11 parámetros. La base de datos construida en el capítulo anterior, permite en general evaluar la mayoría de los parámetros, sin embargo, al realizar un estudio a nivel urbano en donde se encuentran localizados miles de edificios, la información requerida puede ser muy amplia, ocasionando inevitablemente que algún dato sea muy difícil de obtener y que en algún caso inclusive no exista, para lo cual se puede inferir a partir de estudios estadísticos realizados en trabajos anteriores o generándolo aleatoriamente. Una vez calculada la vulnerabilidad de los edificios se sustituyen en las funciones de vulnerabilidad para obtener los posibles escenarios de daño.

La metodología fue propuesta por Benedetti y Petrini, en 1984, y se modificó ligeramente por Caicedo (1993) y Yépez (1996), para poder aplicarse al tipo de construcciones existente en Barcelona, esto ha permitido aplicarse en diferentes trabajos entre los que se encuentran, el proyecto europeo SERGISAI (1998); o en estudios generales como se muestra en Barbat *et al*, (1996), Mena, (1997) y Mena *et al*, (1999), entre otros. En este capítulo se describirá el proceso que se utilizó en la evaluación de los parámetros del índice

de vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado, así como su implementación en el Sistema de Información Geográfica, ARCINFO.

6.2 Evaluación de los parámetros del índice de vulnerabilidad

La gama de materiales que se pueden emplear en la construcción de estructuras es muy amplia, permitiendo resistir casi cualquier acción a la que se someta y obteniendo cualquier forma que se proyecte. Obviamente, el uso de un material determinado para la construcción de un edificio lleva asociado un estudio de confiabilidad estructural que permita obtener un factor de seguridad para equipar la seguridad de la construcción con el costo de la misma. Entre los materiales más comunes de construcción en la ciudad de Barcelona, se encuentran la mampostería no reforzada, el hormigón armado, el acero y madera, como se pudo observar en la Figura 5.16, siendo indiscutiblemente la mampostería el material más utilizado, seguido del hormigón armado y en menor medida el acero y una combinación de estos materiales.

1	AREA	Área de la parcela
2	PERIMETER	Perímetro de la parcela
3	PARCEL#	Identificador interno de ARCINFO
4	PARCEL-ID	Identificador del usuario
5	DISTRIO1-ID	Identificador del distrito
6	MANZANA	Identificador de la manzana
7	NUM-PARCE	Identificador de la parcela
8	MANZA	Código numérico de la manzana
9	DIVISION	Código auxiliar de la parcela
10	NUMERO	Código numérico de la parcela
11	ANYO	Año de construcción
12	PEND	% Pendiente del terreno
13	SOTANO	Nº de sótanos
14	ALTMAX	Altura máxima
15	ALTMIN	Altura mínima
16	ALTPRO	Relación ALTMIN / ALTMAX
17	AREAP	Área total construida
18	UNIDAD	Nº de unidades de información
19	TIPO1A	Material de la estructura auxiliar
20	TIPO1B	Material de la estructura
21	TIPOLOGIA	Etiqueta de la tipología
22	TIPO2A	Material de los muros auxiliar
23	TIPO2B	Material de los muros
24	TIPO3A	Material de los forjados auxiliar
25	TIPO3B	Material de los forjados
26	TIPO4	Material de la cubierta
27	TIPO5	Material de la fachada
28	TIPO6	Material del piso
29	ESFMAX	σ cortante de la mampostería
30	SUELO	Tipo de suelo
31	ZONA	Zona sísmica
32	VAR	Nº de estructuras en 1 parcela
33	ECX	Excentricidad en la dirección x
34	ECY	Excentricidad en la dirección y
35	ECMAX	Excentricidad máxima
36	AX	Área de muros en la dirección x
37	AY	Área de muros en la dirección y
38	LS	Espaciamiento máximo de muros

Tabla 6.1. Términos contenidos en la base de datos que se encuentra asociada a las coberturas de las parcelas de cada distrito.

Los estudios de riesgo sísmico realizados en la ciudad de Barcelona han permitido obtener funciones de vulnerabilidad para los edificios de mampostería no reforzada y dos funciones para los edificios de hormigón armado (con pórticos sismorresistentes y de losas reticulares), mediante técnicas de simulación y generación por Monte Carlo. Sin embargo, en este último caso los edificios de hormigón armado que se estudiarán corresponderán únicamente los de losas reticulares, por ser el tipo de construcción más común en la ciudad de Barcelona. Como se vio en el capítulo III, el índice de vulnerabilidad evalúa en general los mismos parámetros para los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado, con

la diferencia en el valor que se les asigna y el peso que tienen en el resultado final. Por lo tanto, en este capítulo se describirá en forma resumida el proceso de evaluación de los parámetros para ambos tipos de construcciones. La evaluación se realiza utilizando la base de datos construida en el capítulo anterior (Tabla 6.1), apoyándose de programas en lenguaje AML utilizando como ambiente de trabajo ARCPLOT. Esta Tabla, resume los datos disponibles para cada edificios de la ciudad, construida en el capítulo V, en la que se destaca los datos que identifican la parcela (PARCEL#, PARCEL-ID, DISTRI01-ID, MANZANA, y PARCELA), niveles del edificios (SOTANO, ALTMAX, ALTMIN, ALTPRO), área construida (AREAP), edad del edificio (ANYO), material de construcción (TIPO1B, TIPO2B, TIPO3B, TIPO4, TIPO5 y TIPO6), tipo de suelo (SUELO, ZONA) y características generales del edificio útiles para la evaluación de los parámetros (ESFMAX, ECFMAX, AX, AY y LS).

➤ **Parámetro 1. Tipo y organización del sistema resistente**

Para los edificios de mampostería no reforzada, se evalúa el grado de organización de l sistema resistente vertical de la estructura sin tomar en cuenta el material utilizado. Se enfatiza en la necesidad de tener en cuenta la presencia y eficacia de las conexiones entre los elementos resistentes verticales ortogonales, procurando de esta manera considerar la posible semejanza del comportamiento de la estructura analizada con el de una estructura ortogonal cerrada, tipo cajón. Además, se hace un especial énfasis en el uso de una norma sismorresistente para la construcción del edificio.

Para evaluar este parámetro se realizó una revisión de la historia de los códigos sísmicos en España, para determinar el año en la que entran por primera vez en vigor. De acuerdo a la norma AE-88 (Norma Básica de la Edificación) España no esta localizada en una región de sismicidad alta, aunque, los eventos sísmicos que han ocurrido en el pasado en algunas partes del país han provocado daños importante en las estructuras y la pérdida de muchas vidas humanas, sin embargo, a pesar de la necesidad de un código sísmico, no hubo ninguna normativa legal hasta 1963, en donde por primera vez se definió la acción sísmica y se propuso una metodología para el cálculo de fuerzas sísmicas en los edificios.

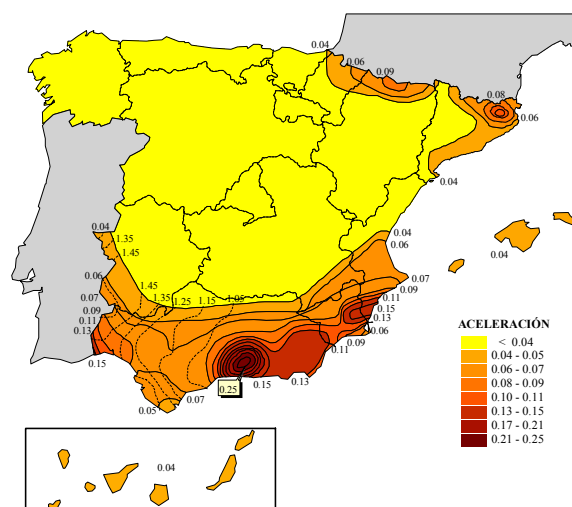


Figura 6.1. Mapa de peligrosidad sísmica de España, para un periodo de retorno de 500 años, de acuerdo a la Norma de Construcciones Sismorresistente de España (NCSE-94).

En 1962, se inicio el desarrollo de un código sísmico general (P.G.S.-1), que fue aprobado en 1969 por la Comisión Interministerial de la Presidencia de Gobierno. Las provisiones del código sísmico se aplicaron principalmente a los edificios, con algunas recomendaciones específicas para el diseño sísmico de otras estructuras como son autopistas, vías de tren, túneles, puentes, presas, plantas de luz y plantas nucleares, incluyendo además por primera vez un mapa de peligrosidad sísmica para España. Aunque el P.G.S.-1 se aprobó como código provisional, permaneció en uso hasta 1974 cuando se expidió una versión actualizada del mismo (P.D.S.-1). Este nuevo código eliminó las referencia de estructuras que no sean edificios, obligando a definir acciones sísmicas específicas para estas construcciones, teniendo al menos los valores prescritos en el código sísmico general. Sin embargo, al estar localizada la ciudad de Barcelona en una zona de baja peligrosidad, aunado a la falta de control y vigilancia en la aplicación de las primeras normas no permiten tener constancia de su uso real. Por lo tanto se ha supuesto que no ha sido aplicada ninguna norma como lo constata la actual norma sismorresistente (NCSE-94). En esta norma, en el apartado 1.2.3 del capítulo I, correspondiente a los criterios de aplicación de la Norma, específica:

“No es obligatoria la aplicación de esta Norma: a) En las construcciones de moderada importancia ó b) En las demás construcciones cuando la aceleración sísmica de cálculo, a_c sea inferior a 0.06g”.

De acuerdo al mapa de peligrosidad sísmico de España (Figura 6.1), considera que la aceleración sísmica de cálculo, para la Ciudad de Barcelona es de 0.04g, por lo que todas las construcciones quedan fuera de la aplicación de la Norma sismorresistente. Por lo tanto la máxima calificación que podrían obtener los edificios en este parámetro sería la B, obteniéndose a partir del material utilizado en la construcción del sistema resistente y muros, así como la edad de los edificios.

En los edificios de hormigón armado ocurre el mismo fenómeno, es decir, la aplicación de la norma sismorresistente es muy importante ya que el parámetro analiza las características del sistema resistente, definiéndolo como aquel sistema que absorbe más del 70% de la acción sísmica. Aspecto que no se cumple ya que no se ha utilizado ninguna norma sismorresistente. Por lo tanto, el valor del parámetro 1, se asignará de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 6.2, utilizando los campos de año de construcción, material de construcción del sistema resistente y de los muros del edificio.

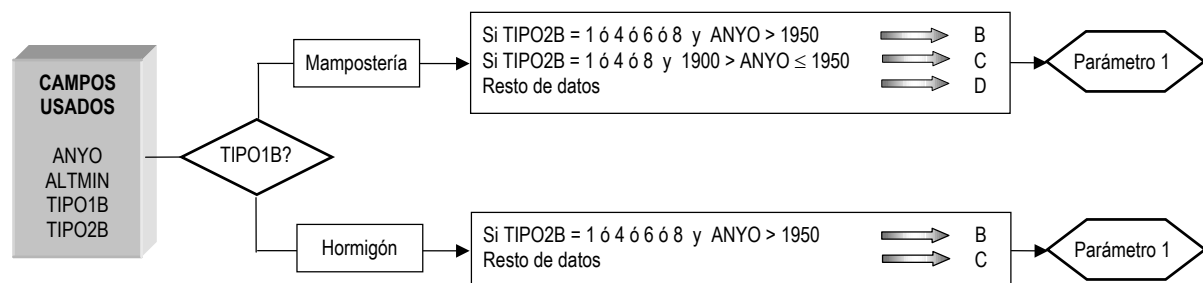


Figura 6.2. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 1 (Tipo y organización del sistema resistente). La calificación máxima que se puede asignar en ambos casos de edificios es la B. Los valores del campo TIPO1B y TIPO2B, corresponden a los asignados en la Tabla 5.8.

➤ **Parámetro 2. Calidad del sistema resistente**

En los edificios de mampostería no reforzada se evalúa el tipo de material utilizado, diferenciándolo cualitativamente por su resistencia. La calificación se efectúa tomando en cuenta dos factores: 1) el tipo de material utilizado así como la forma del elemento de la mampostería, y 2) la homogeneidad de dicho material y de los elementos a lo largo de los paneles que van desde piedra maciza con diferentes calidades de tallado y de ligamento entre las piezas, hasta bloques y ladrillos de arcilla o de mortero-cemento, variando entre prefabricados, ladrillos cocidos, tipo de arcilla utilizada o existencia de un leve refuerzo. En los edificios de hormigón se evalúa de una forma similar la calidad del sistema resistente, considerando además características como la mano de obra o la calidad de ejecución.

En ambos tipos de edificios el parámetro se evalúa a partir de la información con que se cuenta en la base de datos, correspondiente al material utilizado en la construcción de las diferentes partes de edificio y el año de construcción, con lo que se trata de diferenciar las distintas épocas del proceso constructivo. En ambos casos el valor del parámetro se asigna de acuerdo al diagrama de la Figura 6.3, los mismos campos del parámetro anterior.

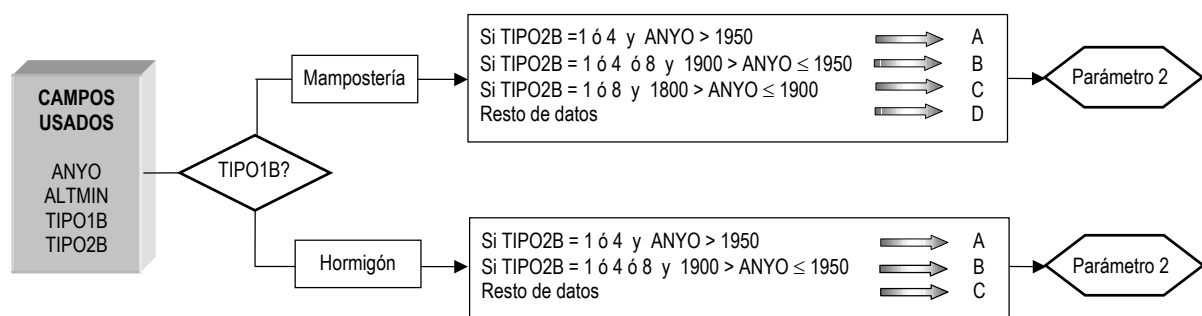


Figura 6.3. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 2 (Calidad del sistema resistente). Los valores del campo TIPO2B, corresponden a los asignados en la Tabla 5.8.

➤ **Parámetro 3. Resistencia convencional**

Para los edificios de mampostería no reforzada se requiere cálculos sencillos pero conceptualmente importantes. Utilizando la hipótesis del comportamiento de estructura ortogonal, cerrada (tipo cajón), se puede evaluar con bastante fiabilidad la resistencia que puede presentar un edificio frente a cargas horizontales. Se aplica un concepto muy utilizado en estructuras y en normativas de edificación, que es el coeficiente sísmico C , definido como la relación entre la fuerza máxima resistente horizontal y el peso del edificio, descrito por la ecuación:

$$C = \frac{a_0 \cdot \tau_k}{q \cdot N} \sqrt{1 + \frac{q \cdot N}{1.5 \cdot a_0 \cdot \tau_k \cdot (1 + \gamma)}} \quad \text{ec. 6.1}$$

En donde N es el número de pisos del edificio; τ_k es la resistencia a cortante de los paneles de mampostería, cuyo valor se calcula de ensayos experimentales de muestras de los edificios de estudio. Cuando este valor no se obtiene experimentalmente, se pueden recurrir a los valores que se muestran en la Tabla 6.2.

Tipo de material	Esfuerzo cortante (T/m^2)
Ladrillo macizo, calidad regular	6 – 12
Piedra mal tallada	2
Piedra bien tallada	7 – 9
Ladrillo macizo, buena calidad	18
Bloque macizo, mortero – cemento	18
Mampostería nueva, ladrillo macizo	20
Mampostería nueva, bloque macizo	20
Mampostería nueva, ladrillo/bloque hueco	18

Tabla 6.2. Valores recomendados de esfuerzo cortante máximo para paneles de mampostería (Yépez, 1996).

El resto de las variables (a_o , γ y q) de la ec. 6.1, se calculan de acuerdo a:

$$A = \min [A_x ; A_y] \quad \text{ec. 6.2}$$

$$B = \max [A_x ; A_y] \quad \text{ec. 6.3}$$

$$a_o = \frac{A}{A_t} \quad \text{ec. 6.4}$$

$$\gamma = \frac{B}{A} \quad \text{ec. 6.5}$$

$$q = \frac{(A+B) \cdot h}{A_t} \cdot P_m + P_s \quad \text{ec. 6.6}$$

En donde, A_t es el área total construida en planta (m^2), A_x y A_y son las áreas totales resistentes de muros (m^2) en la dirección x e y respectivamente, cuyo valor para este trabajo se inferirá del estudio realizado por Caicedo en 1993 (Figura 6.4 y 6.5), h es la altura promedio de entrepisos (m), P_m es el peso específico de la mampostería (T/m^3) y P_s el peso por unidad de área de forjado (T/m^2).

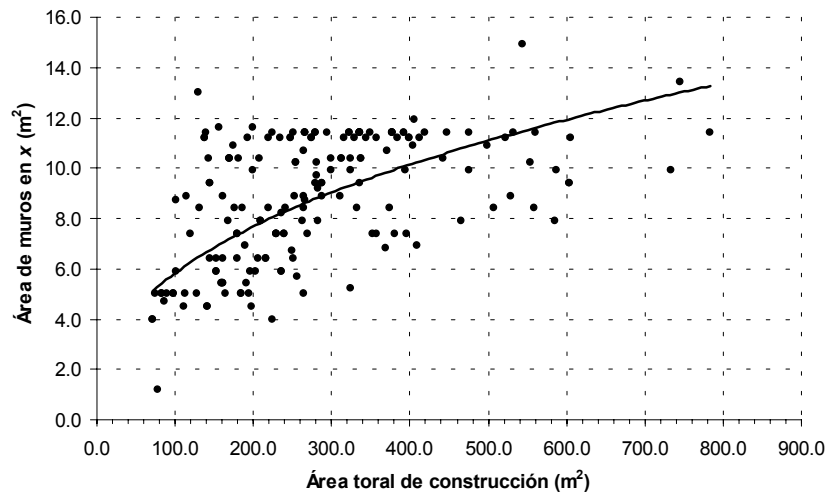


Figura 6.4. Área de muros en función de la dimensión en planta del edificio para el eje X (Caicedo, 1993).

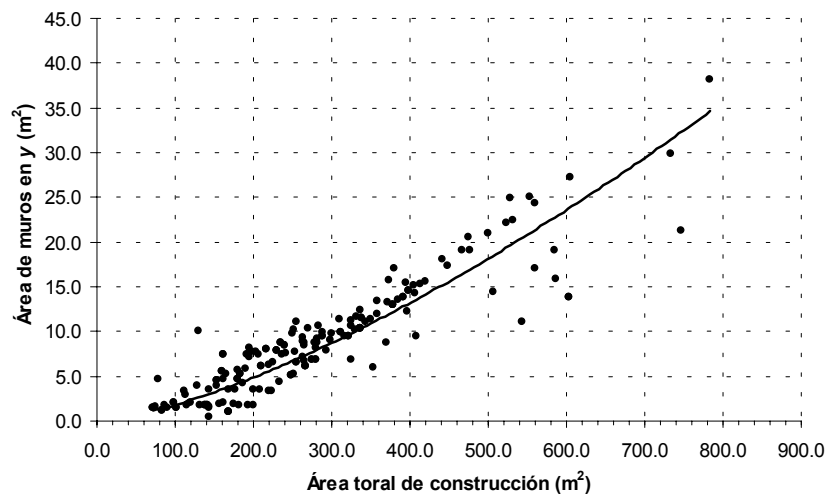


Figura 6.5. Área de muros en función de la dimensión en planta del edificio para el eje Y (Caicedo, 1993).

Cuando los paneles resistentes no siguen las direcciones ortogonales x o y , sino que forman un ángulo β diferente de cero con dichos ejes, los valores de A_x y de A_y se evalúan multiplicando dichas áreas por $(\cos \beta)^2$. Como puede observarse, el valor de q es el peso promedio de un piso por unidad de superficie cubierta, como contribución tanto del peso de los paneles como del peso de los forjados (Tabla 6.3).

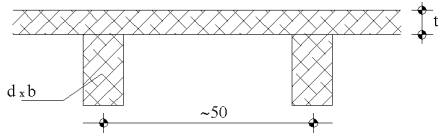
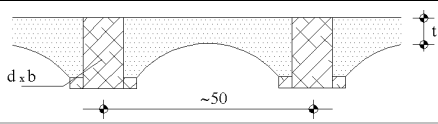
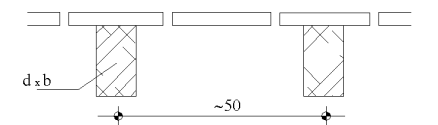
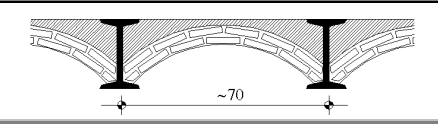
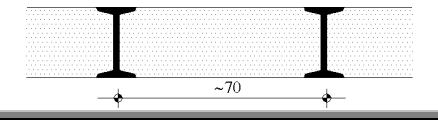
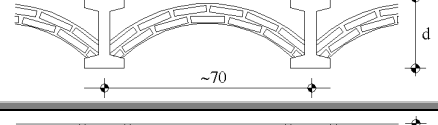
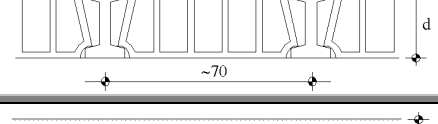
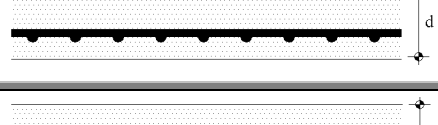
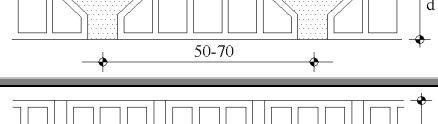
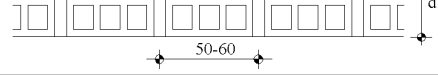
Forjado	Descripción del forjado	Peso (Kg/m ²)	
		Rango	Promedio
	1. Viguetas de madera y entarimado.	40 – 70	55
	2. Viguetas de madera y bovedillas de yeso.	100 – 160	130
	3. Viguetas de madera y tablero de ladrillo.	60 – 140	100
	4. Viguetas metálicas y bovedillas de ladrillo.	130 – 280	205
	5. Viguetas metálicas y mortero ligero.	160 – 390	275
	6. Vigueta de hormigón y bovedillas de ladrillo.	180 – 290	235
	7. Viguetas de hormigón y bloque huecos.	100 – 180	140
	8. Losa de hormigón armado.	190 – 480	335
	9. Losa aligerada de hormigón armado.	200 – 320	260
	10. Losa de cerámica armada.	150 – 240	195

Tabla 6.3. Forjados tipo utilizado para el cálculo de coeficiente C , obtenidos de la norma básica de edificaciones AE-88.

Para obtener el coeficiente sísmico C , se fija un valor arbitrario: $\bar{C} = 0.4$, a fin de calcular el valor normalizado que permite la calificación apropiada del parámetro. Por lo tanto, el valor que se utiliza para calificar el parámetro se obtiene al calcular el coeficiente α_m (ec. 6.7).

$$\alpha_m = \frac{C}{C} \quad \text{ec. 6.7}$$

Para los edificios de hormigón armado, al igual que los edificios de mampostería requiere de cálculos estructurales simplificados, en base a una relación entre el cortante actuante en la base y el cortante resistente de la estructura. El cortante actuante se define a partir de un espectro elástico de respuesta, mientras que el cortante resistente está basado en la capacidad a cortante del sistema resistente estructural (Anexo D). De esta forma, la fuerza sísmica de referencia F en el piso n puede calcularse mediante la expresión:

$$F = 0.4 \cdot R \cdot W_i \cdot h_i \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i} \quad \text{ec. 6.8}$$

Donde :

W_i y h_i son el peso y la altura del piso i , respectivamente. R es la ordenada espectral definida mediante:

$$R = R_o \quad \text{si} \quad 0 \leq T \leq T_o \quad \text{ec. 6.9}$$

$$R = \frac{R_o}{\left(\frac{T}{T_o}\right)^r} \quad \text{si} \quad T_o < T \quad \text{ec. 6.10}$$

R_o , T_o y r dependen del tipo de terreno (S_1 o S_2) sobre el cual está cimentado la estructura y cuyos valores se muestran en la Tabla 6.4.

El terreno tipo S_1 se refiere a rocas calcáreas, eventualmente presentando una capa superior alterada de un espesor máximo de 5 m, ó a otro tipo de terreno caracterizado por una velocidad de propagación de las ondas de corte V_s con valores superiores a los 700 m/s en toda la profundidad de interés para cimentación de la estructura. El terreno tipo S_2 se refiere a depósitos aluviales profundos de densidad media o baja, caracterizados por valores de V_s inferiores a 250 m/s en estratos poco profundos (5 – 30 m), e inferiores a 350 m/s en estratos más profundos (mayores a 50 m). Se incluye en éste último tipo a los suelos arcillosos con depósitos de espesores entre 30 y 90 m y valores de V_s inferiores a 500 m/s.

Tipo de suelo	T_o	r	R_o
Terreno firme o roca (S1)	0.35	2 / 3	2.5
Terreno medio (S2)	0.80	2 / 3	2.2

Tabla 6.4. Valores que definen la ordenada espectral en función del tipo de suelo.

T ó periodo fundamental de la estructura se calcula con la ecuación obtenida por Espinoza (1999), para los edificios de hormigón armado (ec. 6.11), en donde N corresponde al número de niveles del edificio.

$$T = 0.032 N + 0.089 \quad \text{ec. 6.11}$$

La evaluación del parámetro requiere del cálculo de un coeficiente α_h , que representa la relación entre la fuerza resistente y la fuerza de diseño mediante la relaciones:

$$\alpha_h = \frac{C}{0.4 \cdot R} \quad \text{ec. 6.12}$$

$$C = \frac{A_o \cdot \tau}{q \cdot N} \quad \text{ec. 6.13}$$

$$q = \frac{A_x + A_y}{A_t} \cdot h \cdot P_m + P_s \quad \text{ec. 6.14}$$

$$A_o = \frac{\min(A_x, A_y)}{A_t} \quad \text{ec. 6.15}$$

Donde A_t es el área total en planta (m^2); A_x y A_y son las áreas totales de las secciones resistente (de hormigón armado y de mampostería), en los sentidos x e y respectivamente; A_o es el valor mínimo entre A_x y A_y partido por A_t ; h es la altura media de los pisos (m), P_m es el peso específico de los elementos del sistema resistente (T/m^3); P_s es el peso por unidad de área del sistema resistente (T/m^2), y τ es la resistencia a cortante de los elementos del sistema resistente, obtenida como una ponderación entre los valores de resistencia a cortante (τ_i) de cada uno de los materiales que constituyen el sistema resistente estructural (en este caso, hormigón y mampostería), mediante la ec. 6.16. En esta ecuación se puede apreciar que el factor de ponderación son los porcentajes relativos de las áreas contribuyentes de los elementos del sistema resistente.

$$\tau = \frac{\sum \tau_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad \text{ec. 6.16}$$

Para calcular los coeficiente α_m y α_h se utilizan los campos del Tabla 6.1, correspondientes a la altura máxima, área total construida, el material utilizado en el sistema resistente, los muros y el tipo de forjado, así como el esfuerzo máximo a cortante, tipo de suelo y área de muros en las direcciones x e y . Por último, el calculo del parámetro sigue el diagrama de la Figura 6.6.

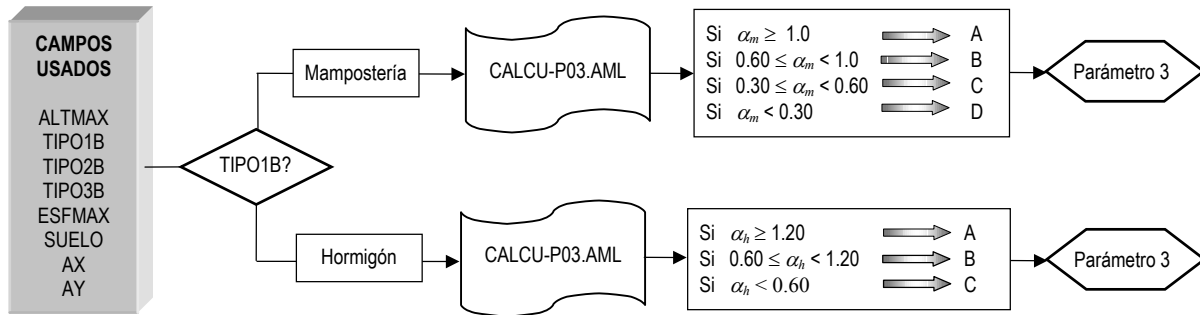


Figura 6.6. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 3 (Resistencia convencional).

➤ **Parámetro 4. Posición del edificio y de la cimentación**

Para los edificios de mampostería no reforzada este parámetro se evalúa mediante una inspección a simple vista de la influencia del terreno y de la cimentación. El análisis se limita a la obtención de la consistencia y de la pendiente del terreno, a la posible diferencia entre las cotas de cimentación y a la presencia de terraplenes no equilibrados simétricamente. En cuanto a los edificios de hormigón armado se evalúan las misma características del terreno, considerando pendientes más pronunciadas que las de mampostería.



Figura 6.7. Mapa topográfico de la ciudad de Barcelona, dividido de acuerdo al tipo de suelo.

Por lo tanto, la evaluación del parámetro se realizará con los valores de la pendiente obtenidos al construir la cobertura de la topografía (Figura 5.11) y el tipo de suelo en donde se encuentra edificada la construcción (Figura 6.7), dividido en substrato (tipo1), cuaternario antiguo y reciente (tipo 2 y 3) y terrero artificial (tipo 4). Este cálculo siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 6.8

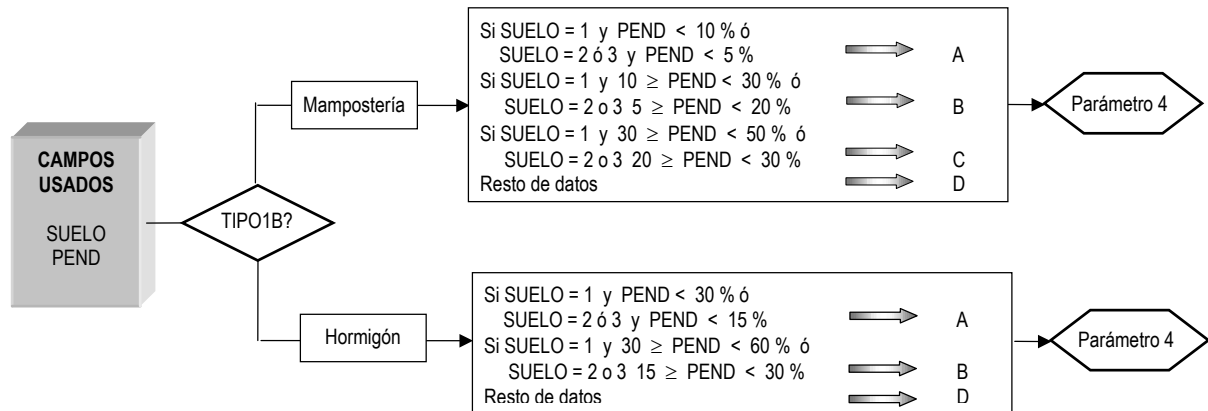


Figura 6.8. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 4. (Posición del edificio y de la cimentación).

➤ Parámetro 5. Forjados

En ambas construcciones (mampostería no reforzada y hormigón armado), la calidad del esquema resistente del piso tiene una notable importancia al influir en el buen funcionamiento de los elementos resistentes verticales. A partir de las experiencias con terremotos pasados, se ha observado que es de singular importancia que el sistema de forjados se encuentre bien conectado al sistema resistente vertical, que pueda transmitir tanto las cargas verticales que soporta el edificio, como las horizontales debidas al sismo hacia los paneles y de allí a la cimentación. Cuando dichas conexiones no se encuentran en estado aceptable, la vibración lateral de los paneles resistentes tienden a separarlos de los forjados, provocando la caída de estos últimos y el desarrollo de un mecanismo de falla con características de reacción en cadena con el resto de forjados; dicha reacción se producirá como consecuencia de altas cargas de impacto.

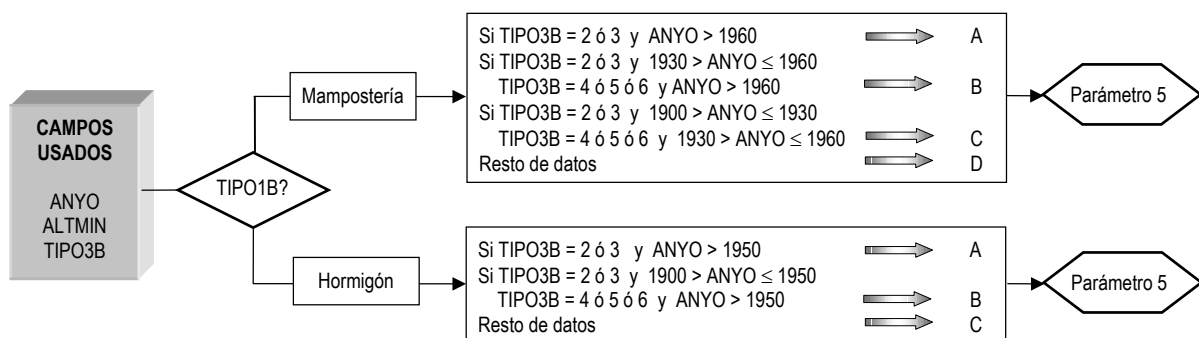


Figura 6.9. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 5 (Tipo de forjados). Los valores del campo TIPO3B, corresponden a los asignados en la Tabla 5.8.

Por otro lado, la deficiencia de estas conexiones generan inestabilidad en la estructura global, perdiendo los forjados su capacidad de arriostrar los muros, aumentando con ello drásticamente la longitud de pandeo de los paneles y llegándose así a un debilitamiento drástico de su capacidad de recibir cargas. En resumen, este efecto podría causar el colapso total y violento de todo el edificio. Este parámetro, en ambas construcciones se calculará con la información del tipo de forjado y tipo de muros contenidos en la cobertura de las parcelas, así como el año de construcción del edificio. El valor del parámetro se obtienen siguiendo la Figura 6.9.

➤ Parámetro 6. Configuración en planta

La forma y la disposición en planta de los edificios son determinantes en su comportamiento ante excitaciones sísmicas. La asignación de las calificaciones posibles se puede explicar mediante la Figura 6.10, definiendo los parámetros $\beta_1 = a/L$ y $\beta_2 = b/L$, donde a representa la dimensión menor del edificio, L es la dimensión mayor y b la dimensión de los elementos que sobresalgan de las dimensiones principales a y L de la planta.

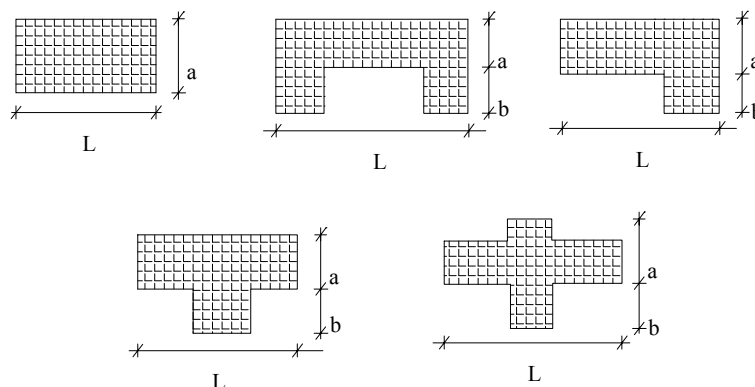


Figura 6.10. Formas originales en planta consideradas en la metodología del índice de vulnerabilidad (Yépez, 1996).

El método evalúa la condición de simetría en planta de los edificios, proponiendo los valores más altos del parámetro cuando las dimensiones en planta se asemejan a secciones cuadradas, sin protuberancias adicionales y penalizándose las secciones excesivamente alargadas o con protuberancias demasiado grandes, las cuales pueden provocar problemas de torsión en planta y concentraciones de esfuerzos en las esquinas y en los elementos más alejados de los centros de gravedad y de rigidez.

La implementación de este parámetro dentro del Sistema de Información Geográfica, impide evaluar el parámetro como lo indica la metodología original, lo que obliga a desarrollar un método alternativo para evaluar dicha regularidad. Debido a que este parámetro depende de la geometría de la planta del edificio, el método propuesto es el siguiente para ambos tipos de edificios:

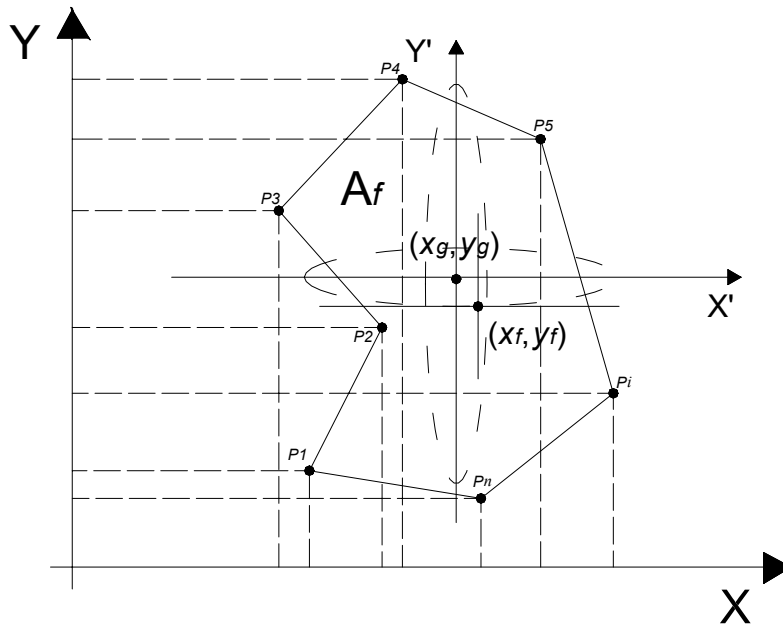


Figura 6.11a. Forma general de un planta considerada para el cálculo del parámetro 6 (configuración en planta del edificio).

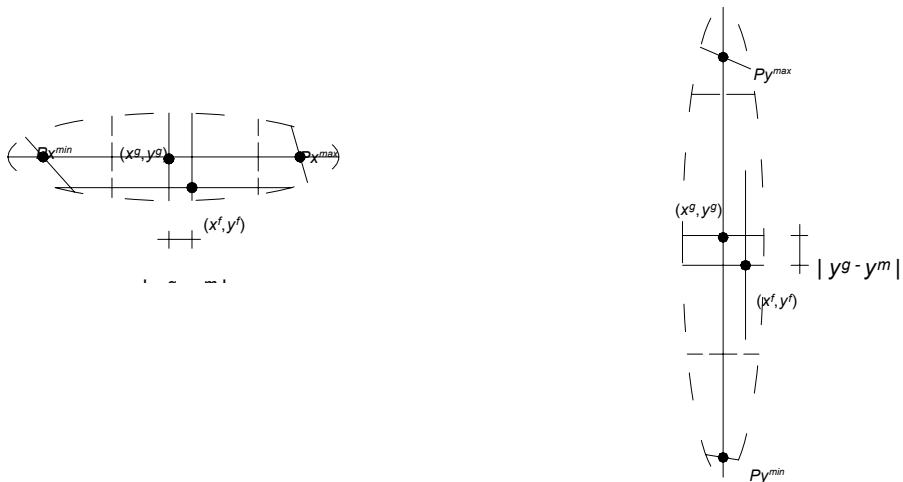


Figura 6.11b. La ampliación de las zonas próximas al centroide permiten observar los valores considerados para el cálculo del parámetro. Las elipses indican la zona ampliada.

Sean $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$, los puntos de la forma geométrica (Figura 6.11a) correspondientes a las coordenadas $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$, que definen la planta de cada edificio. El centroide o centro de gravedad (x_g, y_g) se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{ec. 6.17}$$

$$y_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{ec. 6.18}$$

En donde A_i , son áreas parciales auxiliares de la figura que sirven para obtener el centro de gravedad y se obtienen de multiplicar $x_i \cdot y_i$. Se calcula además, un valor medio de los puntos más alejados de la figura en donde cruza una línea imaginaria que pasa por el centro de gravedad (Figura 6.11b), mediante las ecuaciones 6.19 y 6.20 (Figura 6.11b), en donde, x_{min} , x_{max} , y_{min} y y_{max} , corresponden a los valores de los puntos Px_{min} , Px_{max} , Py_{min} y Py_{max} , respectivamente.

$$x_m = (Px_{min} + Px_{max}) / 2 \quad \text{ec. 6.19}$$

$$y_m = (Py_{min} + Py_{max}) / 2 \quad \text{ec. 6.20}$$

Una vez calculados estos valores se sustituyen en las ecuaciones 6.21 y 6.22, con lo que se obtienen los valores de la regularidad en las direcciones x e y de la estructura. El valor máximo obtenido de la ecuación 6.23, permitirá obtener el parámetro 6, como se muestra en la Figura 6.12.

$$IR_x = \frac{|x_g - x_m|}{\frac{I}{2} \cdot |x_{max} - x_{min}|} \quad \text{ec. 6.21}$$

$$IR_y = \frac{|y_g - y_m|}{\frac{I}{2} \cdot |y_{max} - y_{min}|} \quad \text{ec. 6.22}$$

$$IR = \max\langle IR_x, IR_y \rangle \quad \text{ec. 6.23}$$

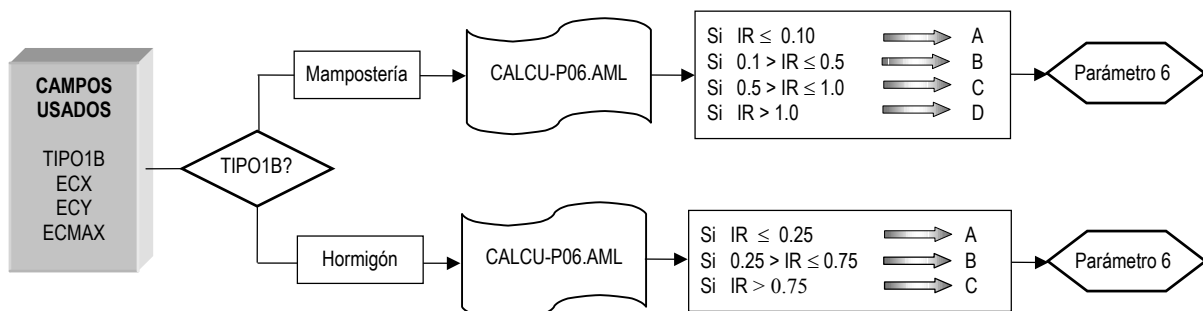


Figura 6.12. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 6 (Configuración en planta).

➤ **Parámetro 7. Configuración en elevación**

La irregularidad en elevación de edificios de mampostería suele estar determinada por la presencia de torretas y porches. Para evaluar la presencia de torretas puede recurrirse a la Figura 6.13, en la cual se muestran las dimensiones consideradas para los parámetros H y T , cuya relación se utiliza para evaluar este parámetro. Se puede apreciar fácilmente, que el método califica favorablemente la existencia de variaciones excesivas en la masa de dos pisos consecutivos o en la superficie del porche. Por lo tanto, la evaluación de este parámetro se realiza utilizando la variación de la altura en el edificio, es decir, los valores de la altura mínima (obtenido de $H - T$) y máxima del edificio (H), y el tipo de material utilizado en la construcción de los muros divisorios. El valor del parámetro se obtiene de acuerdo a la Figura 6.14, en donde RL es la relación entre las dos alturas ó altura promedio del edificio (ALTPRO).

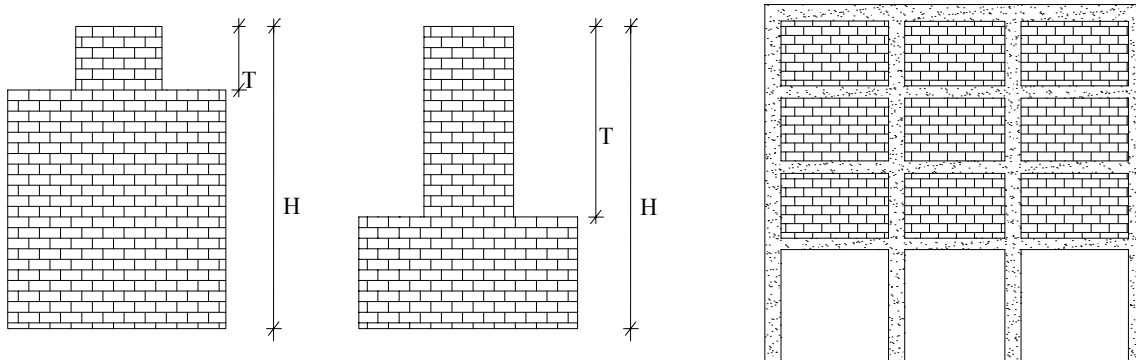


Figura 6.13. Formas originales consideradas para la evaluación del parámetro 7.

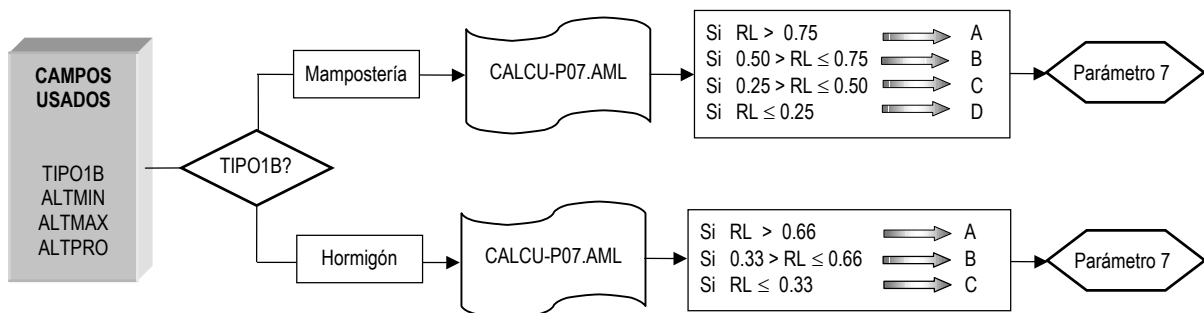


Figura 6.14. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 7 (Configuración en elevación).

➤ **Parámetro 8. Espaciamiento máximo entre muros y conexiones entre elementos críticos**

Para los edificios de mampostería no reforzada, se tiene en cuenta el posible espaciamiento excesivo entre muros ubicados transversalmente a los muros maestros. La clasificación se define en función del factor L/S , donde S es el espesor del muro maestro y L

es el espaciamiento máximo entre muros transversales. Este parámetro indica que al aumentar el espaciamiento máximo, producto de la eliminación de muros internos secundarios, se altera la vulnerabilidad sísmica del edificio. Este es un típico efecto de las ampliaciones y remodelaciones arquitectónicas que se realizan en las construcciones existentes, generalmente como consecuencia del cambio de uso de ciertos pisos en las edificaciones. Por otra parte, para el caso de los edificios de hormigón armado, a diferencia de los edificios de mampostería, analiza el tipo de conexión entre elementos críticos resaltando la importancia que tienen las uniones viga – columna ó losa – columna.

Sin embargo, en ambos casos no se cuenta con la información suficiente para calcular el parámetro, lo que obliga a evaluarlo de la siguiente manera: para el caso de los edificios de mampostería se recurre a datos estadísticos obtenidos en trabajos anteriores (Caicedo, 1993), en donde, se utiliza una relación entre el área construida en planta del edificio y el espaciamiento de los muros como lo muestra la Figura 6.15. Con esta gráfica se calcula la relación L/S , que servirá para determinar el parámetro de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 6.16.

Por otra parte para los edificios de hormigón armado, como se comentó califica la conexión entre elementos críticos, es decir, evalúa el tipo de unión entre los elementos resistentes vertical y horizontal mediante tres factores, cuyos valores dependen de detalles constructivos entre ambos elementos. Como esta información no se encuentra en la base de datos y en general es difícil obtenerla, se recurre a la generación aleatoria del parámetro para determinar el valor del parámetro, utilizando una función de distribución normal.

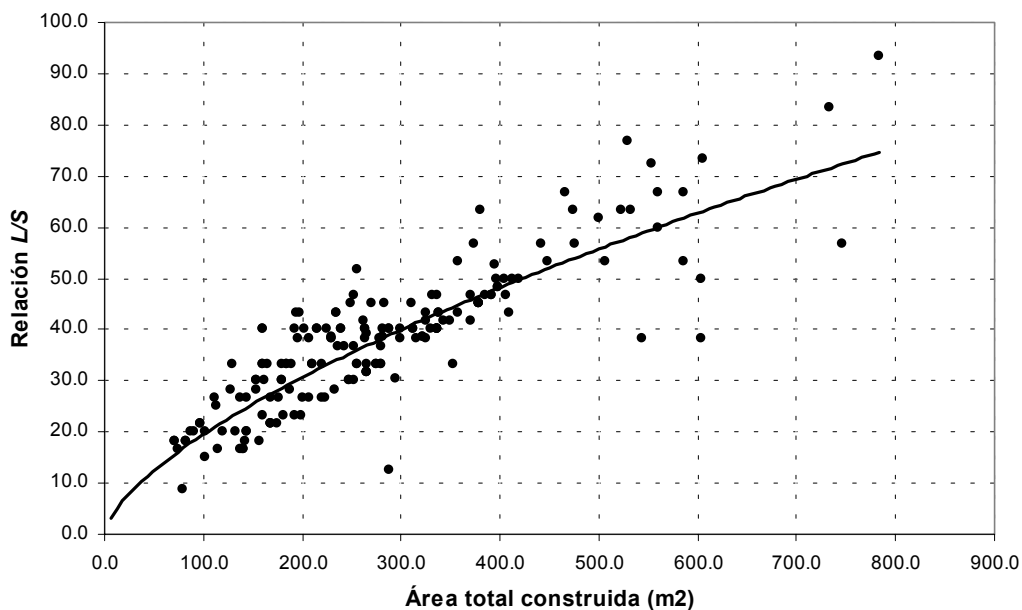


Figura 6.15. Relación del área total construida con el espaciamiento máximo de muros en los edificios de mampostería no reforzada (Caicedo, 1993).

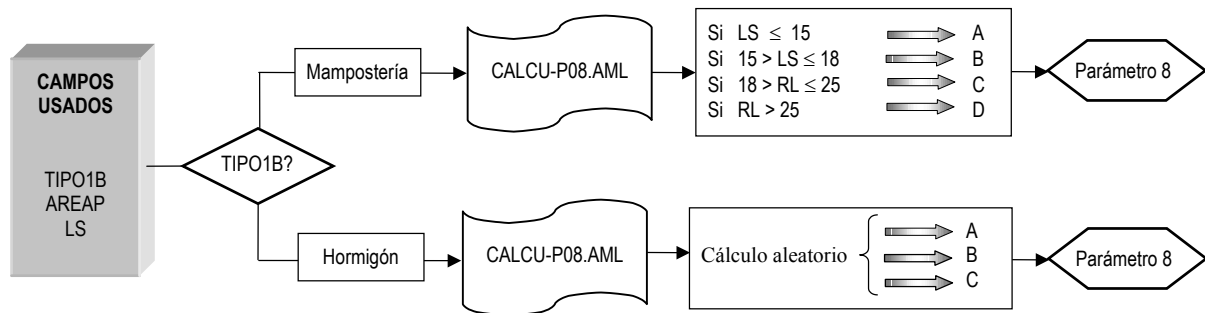


Figura 6.16. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 8 (Espaciamiento máximo entre muros y conexiones entre elementos críticos).

➤ **Parámetro 9. Tipo de cubierta y elementos estructurales de baja ductilidad**

En el caso de los edificios de mampostería la influencia del tipo de cubierta en el comportamiento sísmico de un edificio es muy importante. Factores como su tipología y peso determinan dicho comportamiento. La evaluación de los parámetros se realiza utilizando el campo correspondiente a la edad de los edificios y el material utilizado en la construcción de la cubierta (Tabla 6.1).

Mientras que para los edificios de hormigón se califican los elementos estructurales de baja ductilidad. Esta información aunque no necesita detalles de los elementos poco dúctiles, si requiere conocer su posición, información por otra parte que no se encuentra en la base de datos, por lo tanto también se recurre a la generación aleatoria para su determinación (Figura 6.17), utilizando una función de distribución normal.

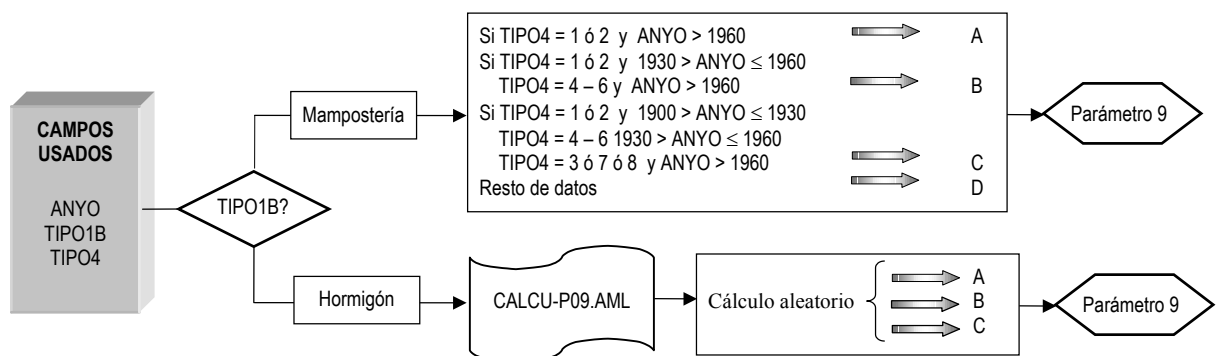


Figura 6.17. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 9 (Tipo de cubierta y elementos de baja ductilidad). Los valores del campo TIPO4B, corresponden a los asignados en la Tabla 5.8.

➤ **Parámetro 10. Elementos no estructurales**

Se intenta tener en cuenta el efecto de los elementos que no forman parte del esquema estructural resistente, tales como cornisas, parapetos, balcones o cualquier elementos que sobresalga de la estructura y cuya caída pueda provocar víctimas. Debido a que constituye un parámetro secundario que no provoca un aumento de la vulnerabilidad de la estructura, sino que incluye el efecto de un peligro colateral, no se hace distinción entre los dos primeros niveles de calificación. En ambos tipos de construcciones se evalúa este parámetro en forma aleatoria utilizando una función de distribución normal, ya que esta información no se puede obtener directamente de la base de datos (Figura 6.18).

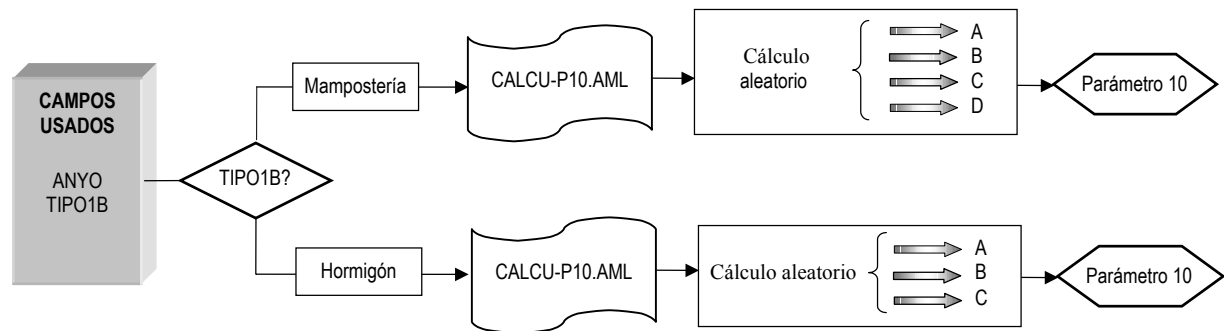


Figura 6.18. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 10 (Elementos no estructurales).

➤ **Parámetro 11. Estado de conservación**

Por último, este parámetro, enteramente subjetivo califica de una manera visual la presencia de desperfectos internos de la estructura, así como posibles irregularidades como productos de fallos en el proceso constructivo. Es obvio que la edad de la construcción en este caso juega un papel importante, debido a que el estado de conservación dependerá de la antigüedad del edificios, ya que el material de construcción se deteriora con los años lo que lleva a la pérdida de la capacidad de resistencia. Por lo tanto, en ambos tipos de construcción el parámetro se evaluará utilizando la edad de construcción (Figura 6.19).

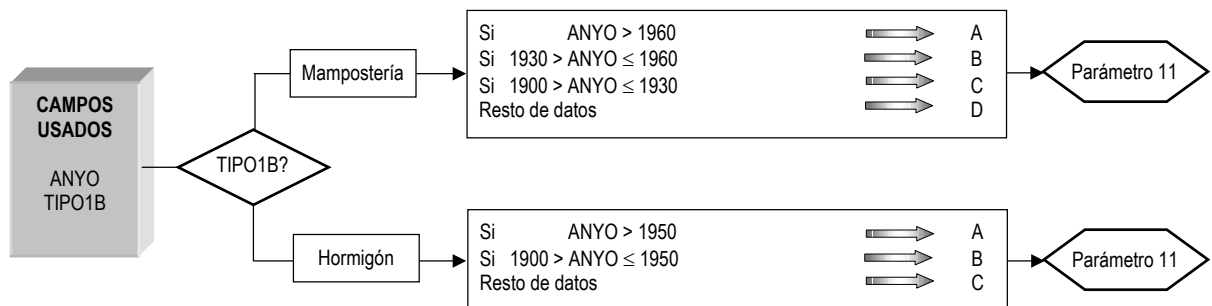


Figura 6.19. Diagrama de flujo para la evaluación del parámetro 11 (Estado de conservación).

6.3 Mapas de vulnerabilidad y escenarios de daño

El siguiente paso y definitivo es el cálculo del índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado y la posterior aplicación de las funciones de vulnerabilidad para la obtención de los escenarios de daño.

Este cálculo se realiza siguiendo los diagramas de flujo descritos en el apartado anterior implementados dentro de ARCINFO, utilizando la base de datos de la cobertura de las parcelas (Tabla 6.1), y algunos programas en lenguaje AML. Este proceso agrega nuevos campos a la base de datos de las coberturas, entre los que se encuentran los once parámetros del índice de vulnerabilidad y el valor correspondiente al índice de daño para las diferentes intensidades (Tabla 6.5).

1	AREA
2	PERIMETER
3	PARCEL#
4	PARCEL-ID
5	DISTRI01-ID
6	MANZANA
7	NUM-PARCE
8	MANZA
9	DIVISION
10	NUMERO
11	ANYO
12	PEND
13	SOTANO
14	ALTMAX
15	ALTMIN
16	ALTPRO
17	AREAP
18	UNIDAD
19	TIPO1A
20	TIPO1B
21	TIPOLOGIA
22	TIPO2A
23	TIPO2B
24	TIPO3A
25	TIPO3B
26	TIPO4
27	TIPO5
28	TIPO6
29	ESFMAX
30	SUELO
31	ZONA
32	VAR
33	ECX
34	ECY
35	ECMAX
36	AX
37	AY
38	LS
39	COEF
40	P01
41	P02
42	P03
43	P04
44	P05
45	P06
46	P07
47	P08
48	P09
49	P10
50	P11
51	VUL
52	DVI
53	DVII
54	DVIII
55	DIX

PARÁMETROS DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD CALCULADOS	
IV Total	
Índice de daño de acuerdo a la intensidad de estudio	

Tabla 6.5. Campos contenidos en la base de datos que se encuentra asociada a las coberturas de las parcelas de cada distrito.

Con estos resultados el siguiente paso es decidir la forma en la que se mostrarán los valores, para describir correctamente los efectos que un sismo puede causar en la zona de estudio. Como se definió en el capítulo V, las unidades consideradas para construir las coberturas de los edificios son la parcela, la manzana y el distrito, y en esta parte del trabajo además el barrio. Cada unidad de estudio tiene una utilidad diferente dependiendo de las necesidades que se persigan y sobre todo de la forma en la que se quieran presentar. Estas diferencias se mostrarán con el ejemplo del distrito del Eixample en donde se utilizará como unidad la parcela y con los ejemplos de la ciudad utilizando como unidad los distritos y barrios. Por lo tanto los primeros mapas que se mostrarán corresponderán al índice de vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado calculados para el distrito del Eixample, así como los mapas de los escenarios de daño para las intensidades de VI, VII, VIII y IX en la escala MSK. Esto permitirá mostrar de una forma detallada los resultados obtenidos en el estudio de Riesgo Sísmico, aunque quizás no sea la forma más conveniente, ya que al realizar un estudio a nivel urbano el número de edificios puede ser muy grande (en el caso de Barcelona se tiene una base de datos de más de 60.000 edificios) lo que puede provocar que su visualización se complique. Esto evidentemente se puede resolver utilizando algún programa auxiliar elaborado en el ambiente ARCINFO para el manejo de la información, o algún programa comercial cuyas opciones son mayores, como es el caso de ARCVIEW, no obstante la razón principal de este inconveniente, es que los resultados se deben analizar dentro de un contexto estadístico por región y no como un resultado único del edificio, por lo tanto considerar unidades como los barrios o los distritos, permitiría observar mejor los resultados.

Aun así, como ejemplo ilustrativo en la Figura 6.20, se muestra el mapa de vulnerabilidad sísmica de los edificios del distrito del Eixample. En él se estudiaron 6074 edificios, divididos de la siguiente manera: 4408 edificios de mampostería no reforzada (72.56 %) y 1666 edificios de hormigón armado (27.43%), con las características mostradas en la Tabla 6.1. Una vez evaluado el índice de vulnerabilidad para cada tipo de edificio, se utilizan los siguientes 5 grupos para clasificarlos de acuerdo al valor obtenido: 0 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 80 y 80 – 100 (el rango de estos grupos puede variar dependiendo del detalle que se pretenda en el estudio) y se utilizan dos colores para diferenciar los tipos de edificio considerados (café para los edificios de mampostería y azul para los edificios de hormigón armado). En forma numérica, los resultados obtenidos para la vulnerabilidad sísmica se muestra en la Tabla 6.6.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	32	0.73	2	0.12
20 – 40	797	18.08	419	25.15
40 – 60	2436	55.26	1187	71.25
60 – 80	966	21.91	56	3.36
80 – 100	177	4.02	2	0.12

Tabla 6.6. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios del Eixample.

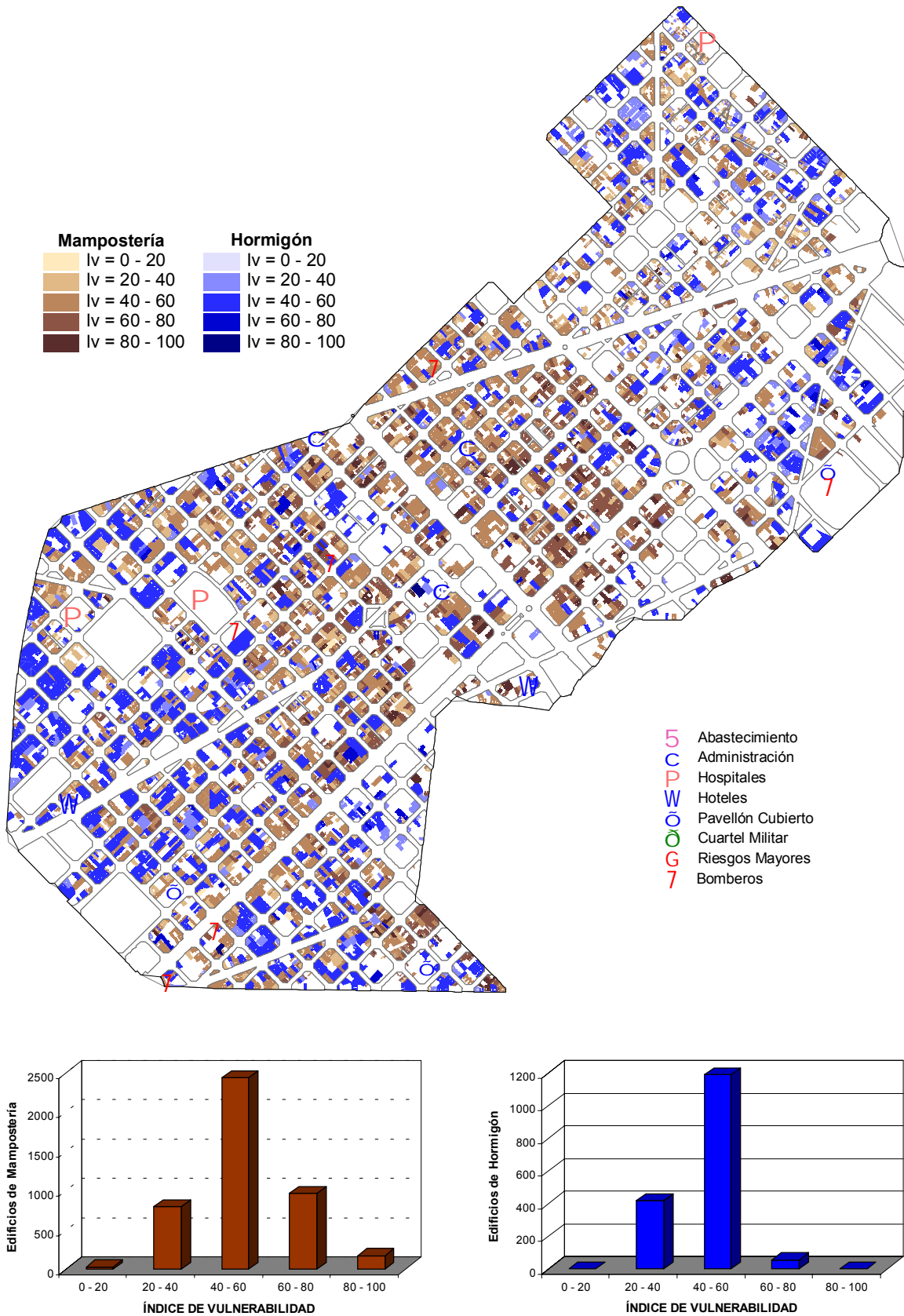


Figura 6.20. Mapa de vulnerabilidad sísmica para los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado del Distrito del Eixample. En las gráficas se agrupan los edificios de acuerdo a su grado de vulnerabilidad sísmica y tipo de edificio.

En la Tabla 6.6, se puede observar que la mayoría de los edificios se encuentran en el tercer grupo de vulnerabilidad, es decir, el 55.26 % (2436) de los edificios de mampostería no reforzada tienen un índice de vulnerabilidad entre 40 – 60 %, mientras que los edificios de hormigón armado concentra casi el 72 % (1187 edificios) en este grupo. Esto significa que existe un grado de vulnerabilidad de mediana a alta en el distrito, como consecuencia entre otros motivos de la falta del uso de una normativa sismorresistente, al tipo de suelo en el que se encuentran edificados ó a la antigüedad de los edificios.

En el mapa de vulnerabilidad sísmica del distrito del Eixample, se muestran además algunos de los edificios considerados esenciales por el ayuntamiento (Hospitales, estaciones de bomberos, pabellones cubiertos, estaciones de policía, etc.), para los cuales no se ha calculado la vulnerabilidad, por lo menos en esta etapa, ya que requieren de un estudio más detallado. Sin embargo, la ubicación de estos edificios puede servir para realizar un mejor análisis del Riesgo Sísmico de la ciudad.

Como se comentó en el capítulo II, el Riesgo Sísmico depende de la vulnerabilidad sísmica de los edificios y de la peligrosidad sísmica del lugar, por lo que a pesar de observar una vulnerabilidad sísmica de los edificios de mediana a alta, esto no es preocupante mientras no ocurra un terremoto. En este caso, este tipo de estudios permiten observar los efectos que puede provocar un terremoto de determinada intensidad, mediante los mapas de escenarios de daño como se mostrará más adelante. Para mostrar los valores del índice de daño, se dan las mismas recomendaciones, que en el caso de los valores del índice de vulnerabilidad, es decir, los resultados obtenidos se pueden mostrar utilizando las diferentes unidades de estudio (parcela, manzana, barrio ó distrito), dependiendo del objetivo del trabajo.

En las Figuras 6.21 – 6.24, se muestran los escenarios de daño obtenidos para el distrito del Eixample, considerando cuatro terremotos con intensidades de VI, VII, VIII y IX en la escala MSK, aunque para este último, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada, debido a que la mayoría de los edificios de hormigón armado con losas reticulares colapsarían para esta intensidad, según los estudios realizados en la simulación de las funciones de vulnerabilidad. Los resultados del índice de daño corresponde a un valor económico para ambos tipos de edificios, por lo tanto los resultados se pueden combinar obteniendo de esta forma el escenario de daño final, para la intensidad del terremoto estudiado.

Para elaborar los mapas de escenarios de daño, los resultados del índice se clasifican en los siguientes 6 grupos: 0.0 – 2.5, 2.5 – 7.5, 7.5 – 15.0, 15.0 – 30.0, 30.0 – 60.0 y 60.0 – 100.0. Esta clasificación de daño se propuso basándose en las distintas escalas de daño propuesta en el Anexo C, en donde se define de una forma amplia el daño provocado por un terremoto a una estructura. La escala propuesta toma en cuenta las recomendaciones de todos los trabajos revisados en el anexo, con lo cual se crea una escala más completa, cuyo significado se muestra en la Tabla 6.7.

RANGOS DE DAÑO	NIVEL	SIGNIFICADO
0.0 – 2.5	Ninguno	En este nivel, el daño en los elementos estructurales es despreciable, con la aparición de pequeñas grietas en elementos no estructurales. No se requieren costos de reparación. Su efecto en el comportamiento de la estructura es despreciable.
2.5 – 7.5	Ligero	En este nivel, el daño en los elementos no estructurales es generalizado, provocando inclusive el desprendimiento de baldosas. Pueden aparecer grietas en elementos estructurales como muros de carga, vigas o columnas, cuya reparación requiere la inversión de un pequeño porcentaje de la estructura. Su efecto en el comportamiento de la estructura es mínimo.
7.5 – 15.0	Moderado	En este nivel, el daño en elementos no estructurales es muy importante, incrementando con esto el costo de reparación. El daño en los elementos estructurales puede ser importante, afectando el comportamiento de la estructura en menor medida, sin embargo, no corre peligro la estabilidad de la estructura.
15.0 – 30.0	Considerable	En este nivel, el daño de los elementos estructurales es importante, requiriendo grandes reparaciones, aunque no es necesario el desalojo del edificio. El costo de las reparaciones, puede ser un porcentaje importante de la estructura.
30.0 – 60.0	Fuerte	En este nivel, el daño en los elementos estructurales es muy importante, poniendo en riesgo la estabilidad de la estructura. En la mayoría de los casos el costo de reparación puede ser igual al costo del edificio, por lo que se recomienda la demolición, para la posterior construcción. En todo el tiempo se requiere el desalojo del edificio, por seguridad de las personas.
60.0 – 100	Severo	El nivel de daño en los elementos estructurales es muy grande, necesitando demoler el edificio, si antes no ha colapsado.

Tabla 6.7. Escala de daño considerada en este trabajo para la construcción de los mapas de escenarios de daño propuesta en este trabajo.

Utilizando esta escala, los resultados obtenidos del distrito del Eixample se muestran en la Tabla 6.8, correspondiendo al número de edificios y el porcentaje de ellos, que sufren un cierto nivel de daño dependiendo de la intensidad del terremoto de estudio.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO EN ESTE ESTUDIO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	691	11.38	222	3.65	44	0.72	5	0.11
2.5 - 7.5	1756	28.91	876	14.42	196	3.23	23	0.52
7.5 – 15.0	2425	39.92	1302	21.44	671	11.05	82	1.86
15.0 – 30.0	952	15.67	1990	32.76	1354	22.29	586	13.30
30.0 – 60.0	244	4.02	1498	24.66	2051	33.77	1457	33.06
60.0 – 100.0	0	0.00	186	3.06	1758	28.94	2254	51.15

Tabla 6.8. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito del Eixample, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

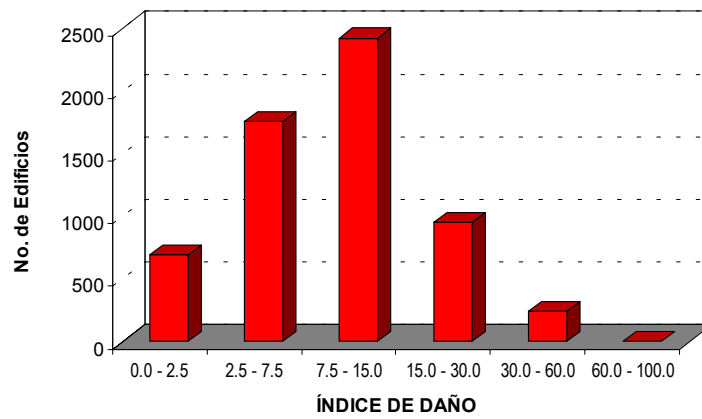
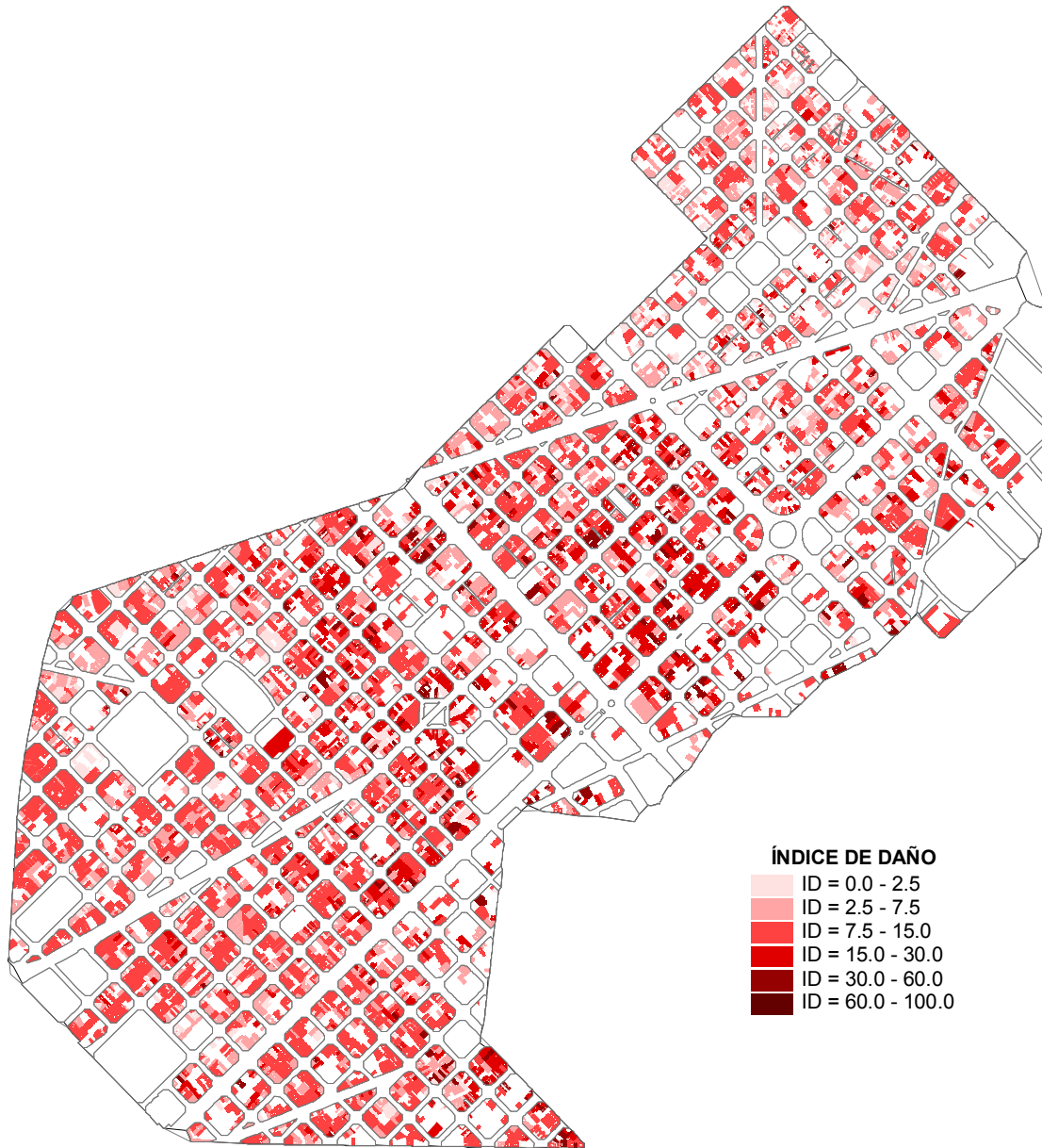


Figura 6.21. Escenario de daño calculado para un sismo de intensidad VI en la escala MSK para el Distrito del Eixample.

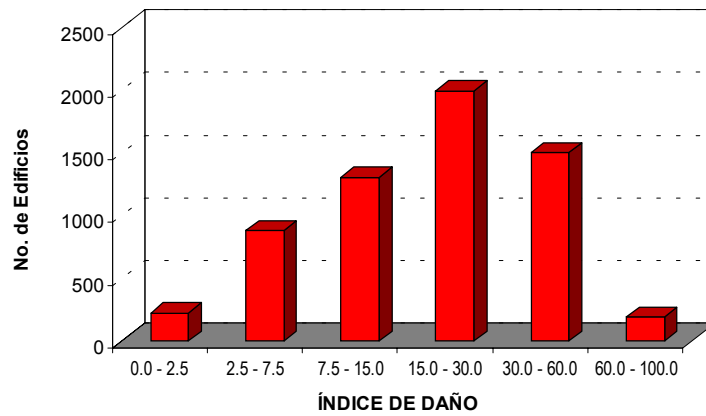
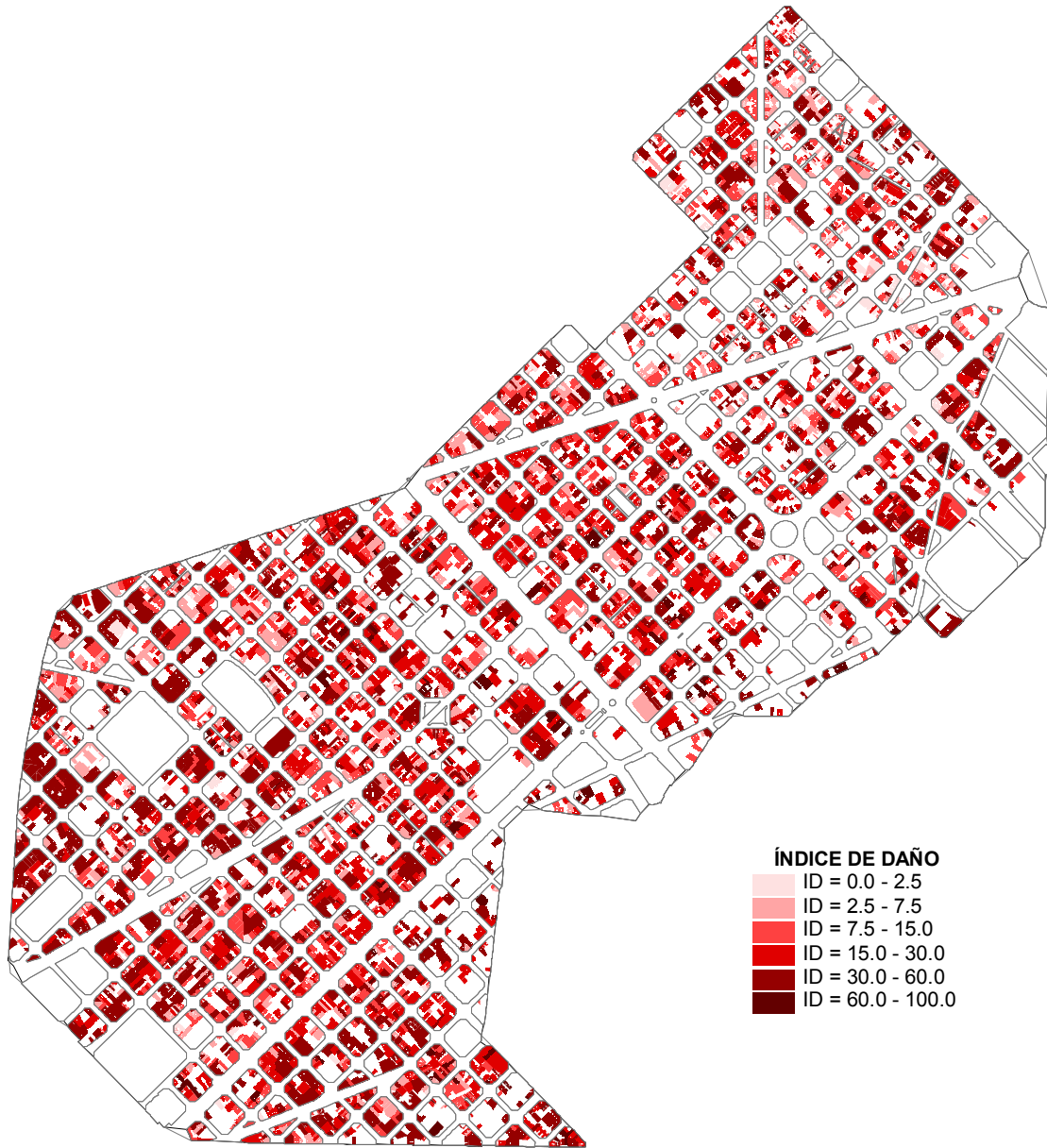


Figura 6.22. Escenario de daño calculado para un sismo de intensidad VII en la escala MSK para el Distrito del Eixample.

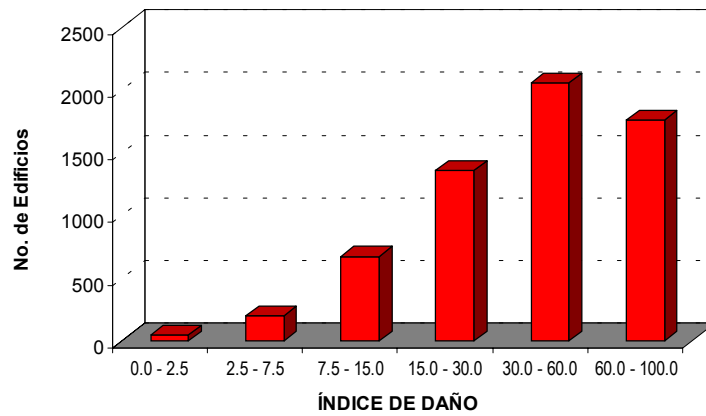
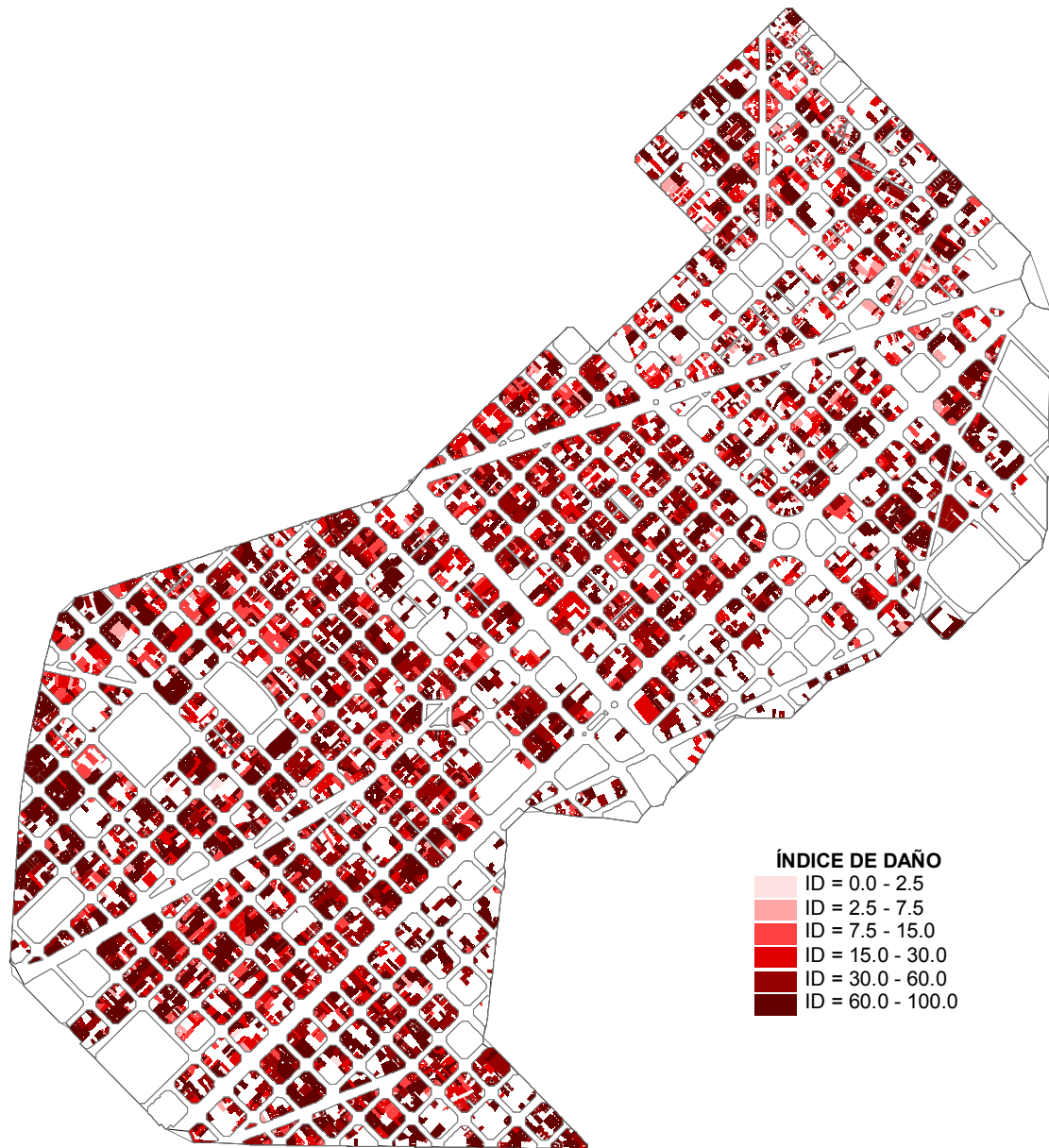


Figura 6.23. Escenario de daño calculado para un sismo de intensidad VIII en la escala MSK para el Distrito del Eixample.

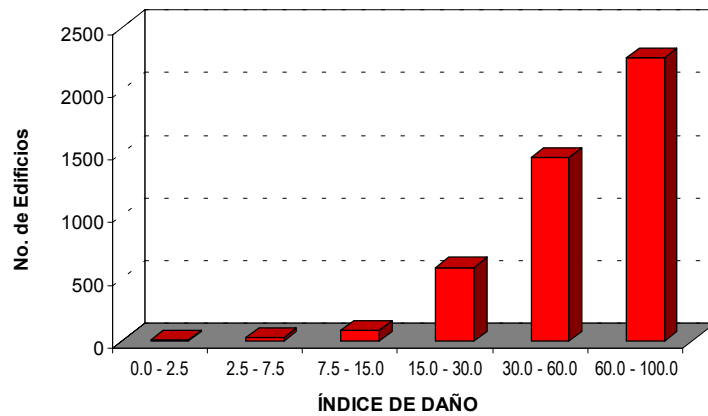
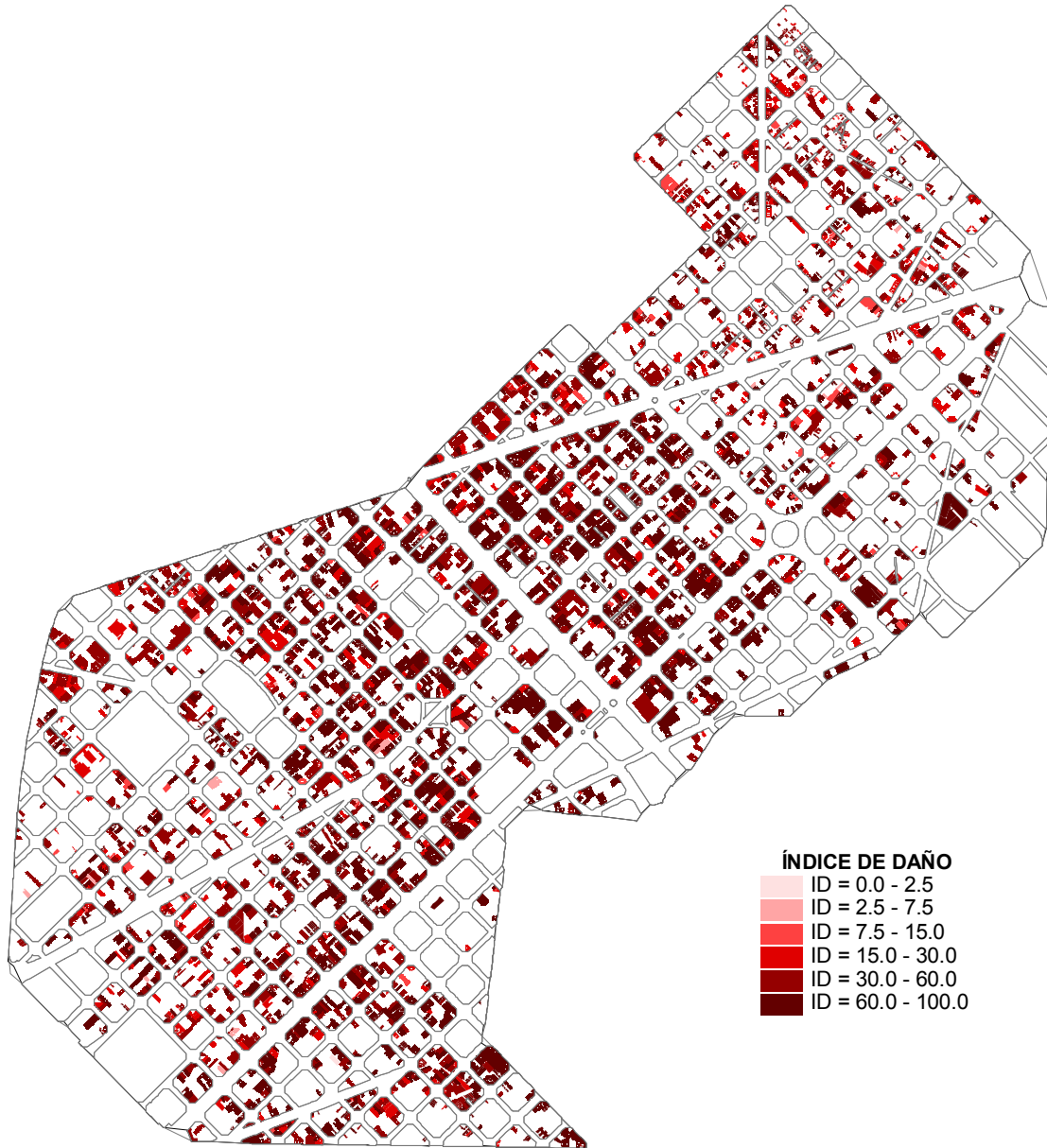


Figura 6.24. Escenario de daño calculado para un sismo de intensidad IX en la escala MSK para el Distrito del Eixample.

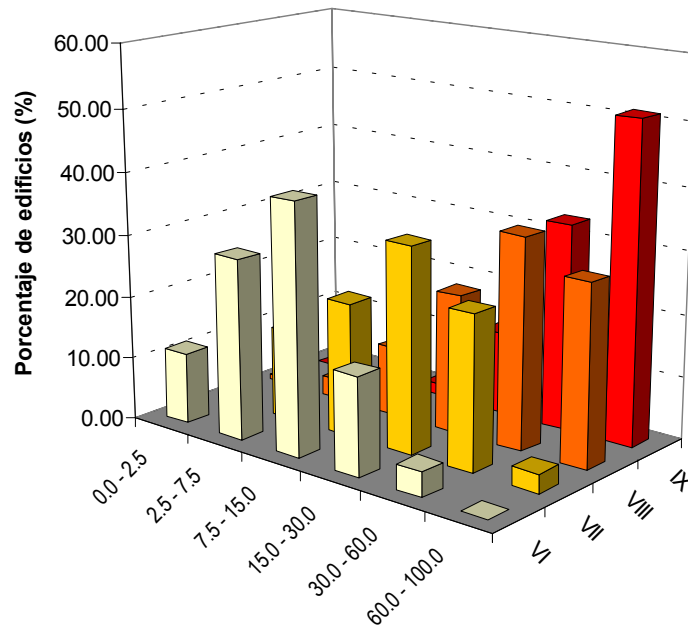


Figura 6.25. Porcentaje de edificios del distrito del Eixample, clasificados por grado de daño dependiendo del terremoto de estudio considerado.

Para el escenario de daño correspondiente a una intensidad de VI (Figura 6.21), se calcula que casi un 40 % de los edificios sufrirán un daño considerable (7.5 – 15.0), para el cual se necesitan reparaciones importantes, aunque no corre peligro la estabilidad de la estructura. En este mismo escenario cerca del 16 % de los edificios sufrirán un daño moderado y el 4 % un daño fuerte. En este primer escenario, se espera que no exista ningún daño mayor, donde se requiriera la demolición de la estructura.

Para el escenario de daño correspondiente a una intensidad de VII, los daños se incrementa de una forma considerable. En este caso, el porcentaje de edificios con daños considerables es de 21 %, incrementándose al doble el número de edificios con un daño moderado y hasta un 24 % los edificios con un daño fuerte. Para este escenario el porcentaje de edificios que requieren demolición o que han sufrido colapso es el 3 % (186).

En el caso del escenario de daño correspondiente a un intensidad de VIII, los daños son muy importantes llegando a un grado mayor, casi el 30 % de los edificios, es decir, cerca de 1800. En el caso de un terremoto de intensidad IX, la mayoría de los edificio de hormigón armado, colapsarían y más del 50 % de los edificios de mampostería también estarían dentro de este rango.

Una forma más avanzada de mostrar estos resultados es haciéndolo en forma tridimensional. De esta manera se puede apreciar la vulnerabilidad y el daño de los edificios, de una forma más real, con la desventaja de requerir más recursos y datos para su elaboración, sin embargo, es una buena propuesta para el inicio de este tipo mapas. Como ejemplo, se muestra en este trabajo los mapas del índice de vulnerabilidad (Figura 6.26) para el distrito del Eixample y el escenario de daño para una intensidad de VII (Figura 6.27) en 3 dimensiones, utilizando las mismas escalas de vulnerabilidad que se muestran en la Figura 6.20.

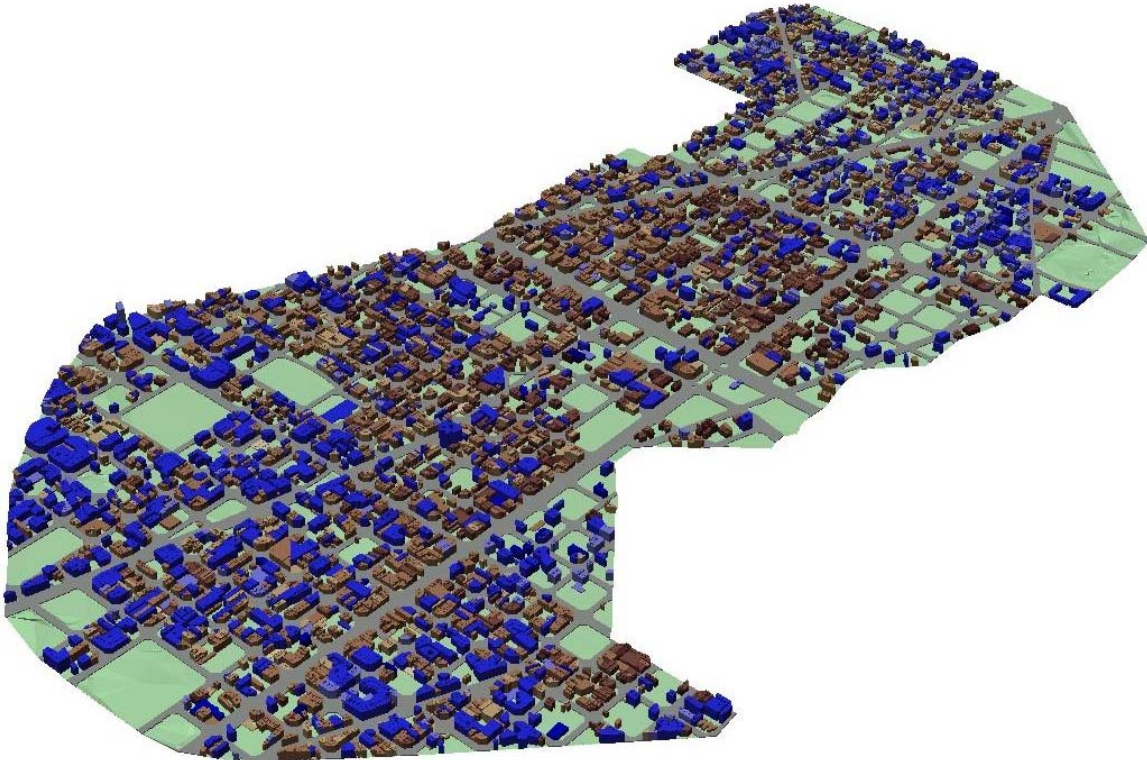


Figura 6.26. Vista tridimensional de mapa de vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado del Distrito del Eixample.

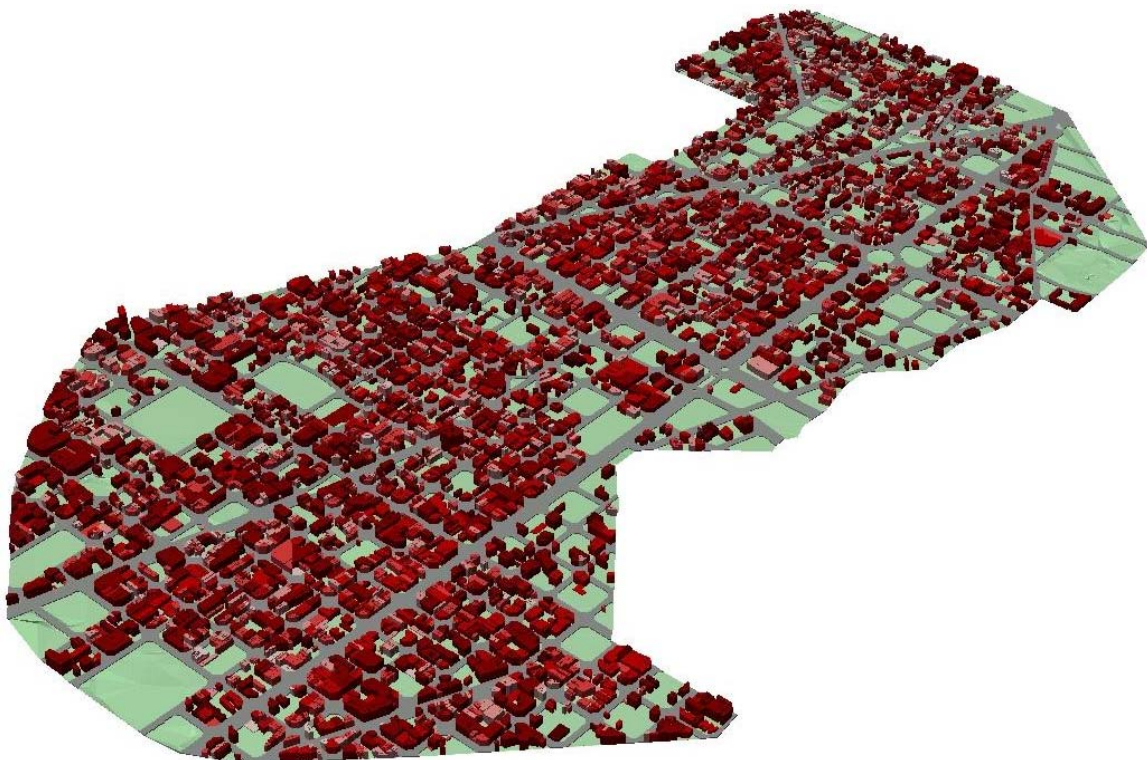


Figura 6.27. Vista tridimensional del escenario de daño calculado para un sismo de intensidad VII en la escala MSK, para el Distrito del Eixample.

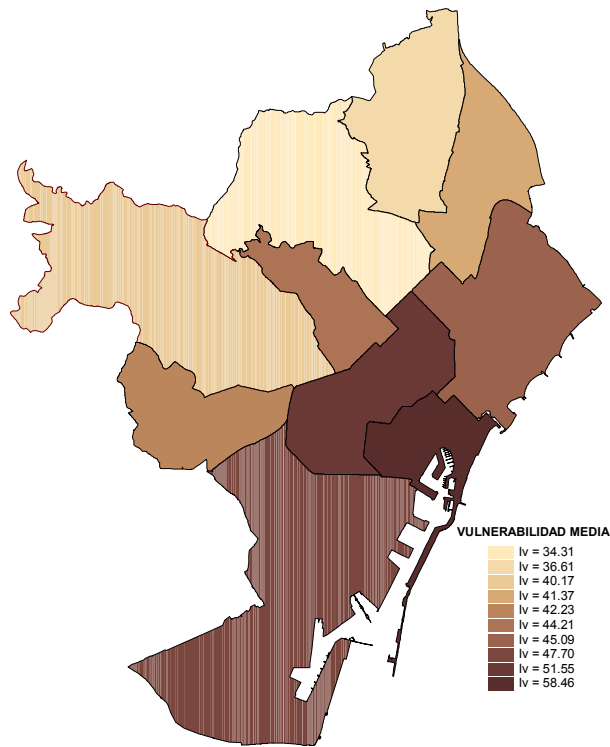


Figura 6.28. Vulnerabilidad media de los edificios de mampostería no reforzada por Distritos.

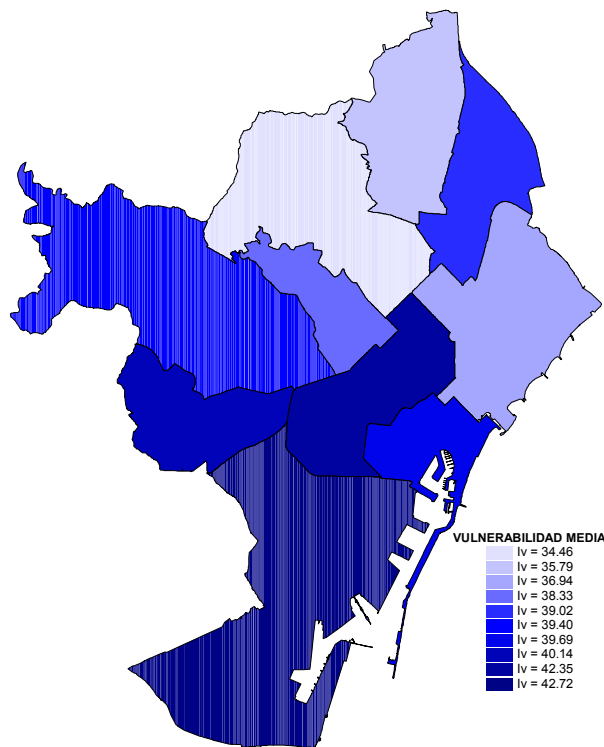


Figura 6.29. Vulnerabilidad media de los edificios de hormigón armado por Distritos.

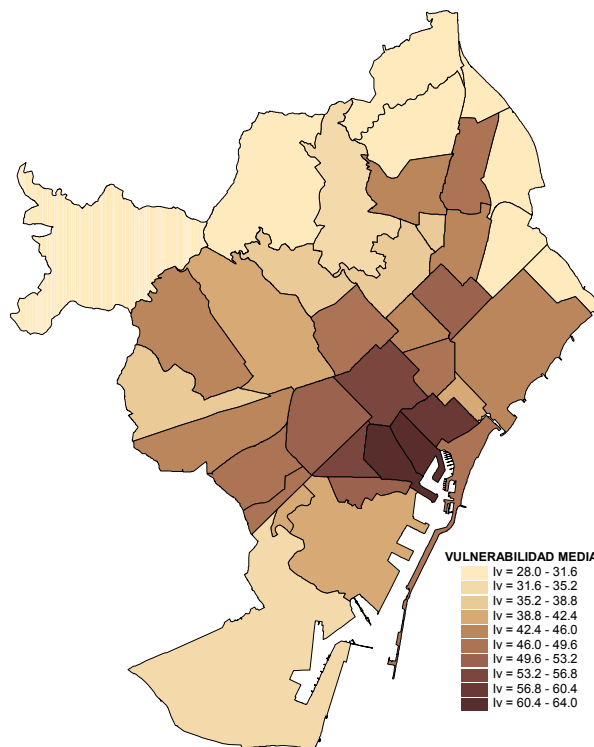


Figura 6.30. Vulnerabilidad media de los edificios de mampostería no reforzada por Barrios.

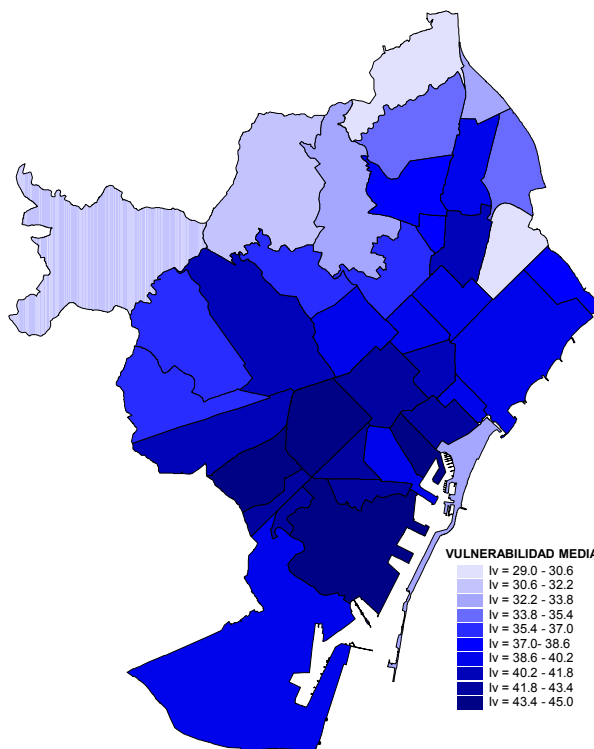


Figura 6.31. Vulnerabilidad media de los edificios de hormigón armado por Barrios.

En las Figuras 6.28 – 6.32, se muestra los valores medios del índice de vulnerabilidad calculados para los distritos y barrios. Esta forma de mostrar los resultados permite observar la distribución de los resultados en un contexto más adecuado para los estudios de Riesgo Sísmico a nivel urbano. En el mapa de la Figura 6.28, se dibuja la vulnerabilidad media de los edificios de mampostería, con valores que van del 34.31 % correspondiente al distrito de Horta – Guinardo a un valor máximo para el distrito de Ciutat Vella (58.46 %). Este mismo comportamiento se presenta en la Figura 6.29, para los edificios de hormigón armado, con un valor mínimo de 34.46 correspondiente al distrito de Horta – Guinardo y un valor máximo de 42.72, para el distrito de Sants Montjüic (Tabla 6.9).

Distrito	VULNERABILIDAD MEDIA		ÍNDICE DE DAÑO MEDIO PARA LAS INTENSIDADES			
	Mampostería	Hormigón	VI	VII	VIII	IX
1	58.46	39.69	15.38	25.65	49.28	74.02
2	51.55	42.35	10.43	21.56	48.75	61.97
3	47.7	42.72	9.23	18.57	41.91	53.98
4	42.23	40.14	7.31	18.86	47.58	43.13
5	40.17	39.4	6.59	16.03	38.9	39.59
6	44.21	38.33	7.71	16.29	36.92	47.39
7	34.31	34.46	4.02	9.71	23.15	28.99
8	36.61	35.79	5.08	12.57	30.26	33.73
9	41.37	39.02	6.78	15.15	36.23	42.36
10	45.09	36.94	8.03	19.82	45.28	49.69

Tabla 6.9. Valores de índice de vulnerabilidad media e índice de daño medio por distrito.

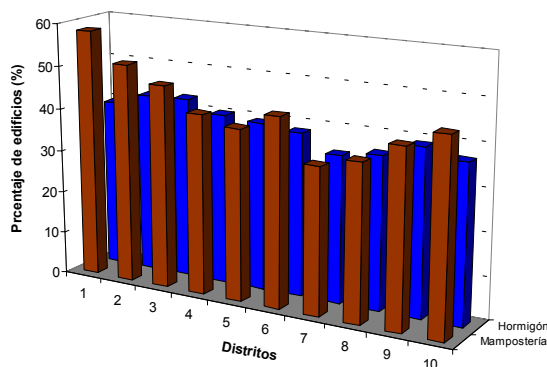


Figura 6.32. Índice de vulnerabilidad media por tipo de edificio para los diez distritos de la ciudad.

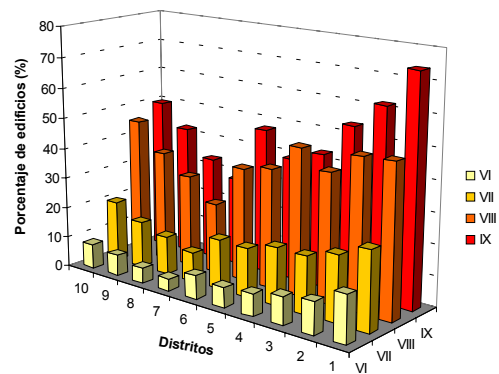
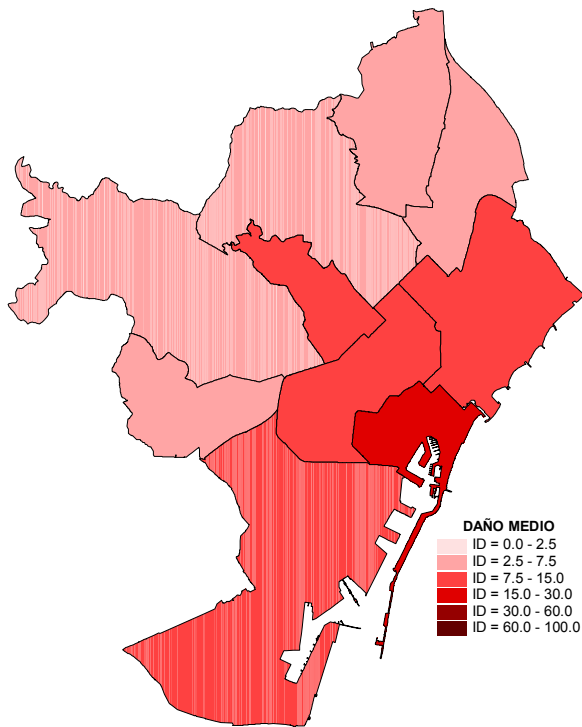
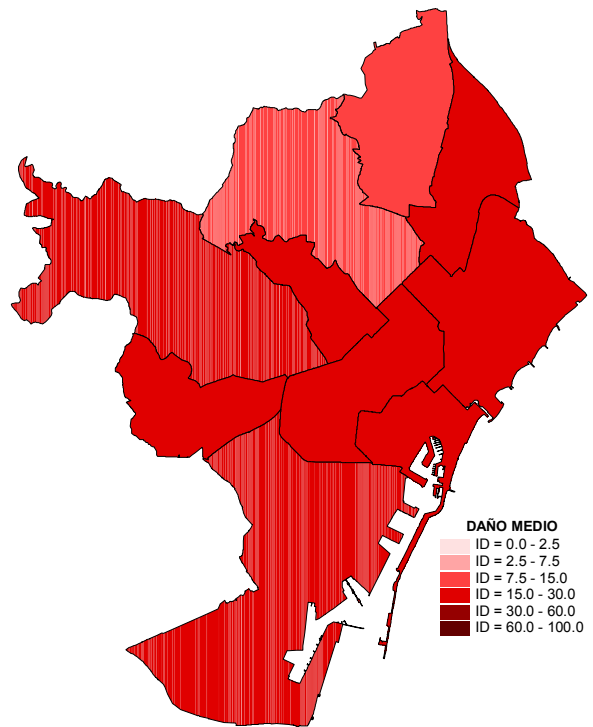


Figura 6.33. Índice de daño medio de los 4 escenarios de daño para los diez distritos de la ciudad.

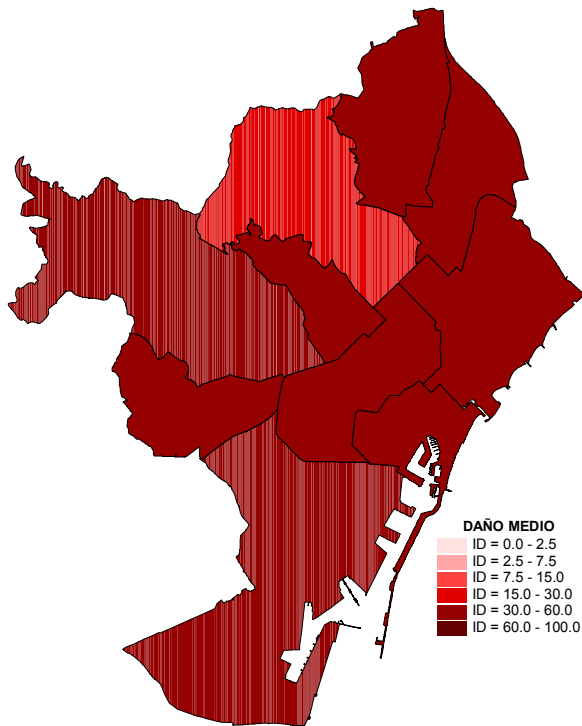
Obviamente, si reducimos la unidad de estudio para mostrar los resultados, los valores mínimos y máximos de la vulnerabilidad se amplían, es decir, si se observa en las Figura 6.30, el valor mínimo para los edificios de mampostería es de 28.0 % correspondiendo a la Ciutat Meridiana ubicado en el distrito de Sant Andreu, mientras que el valor máximo (64.0 %) corresponde al barrios Gòtic ubicado en el distrito de Ciutat Vella. En cuanto a los edificios de hormigón armado (Figura 6.31), el valor mínimo es de 29.0 % para el barrio de Ciutat Meridiana y el máximo es de 45 % para el barrio Gòtic (Tabla 6.10).



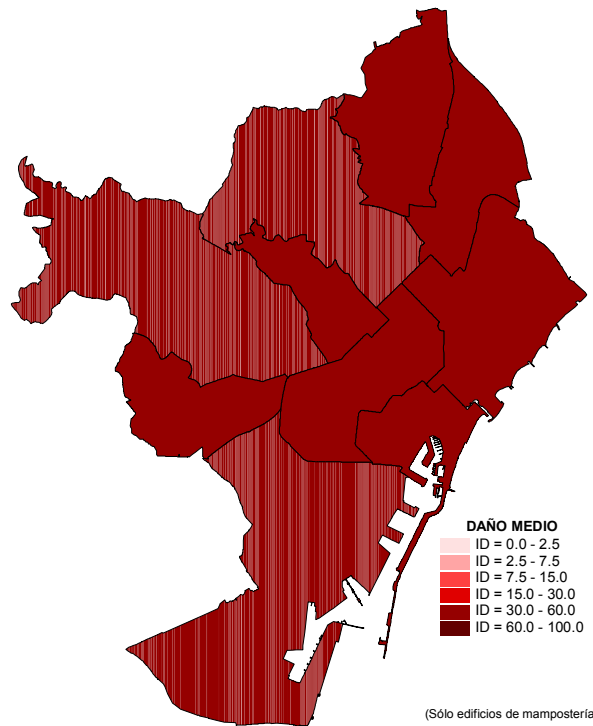
a) Intensidad de VI en la escala MSK



b) Intensidad de VII en la escala MSK



c) Intensidad de VIII en la escala MSK



d) Intensidad de IX en la escala MSK

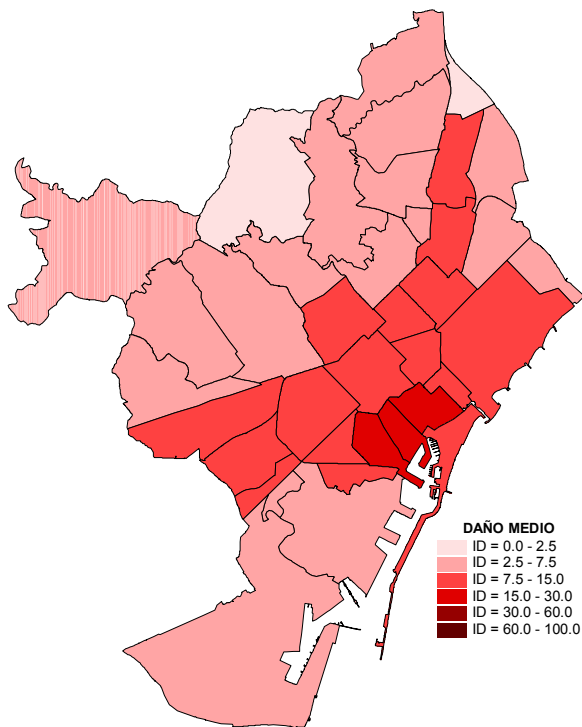
(Sólo edificios de mampostería)

Figura 6.34. Escenarios de daño medio por distrito de la ciudad de Barcelona, para diferentes intensidades.

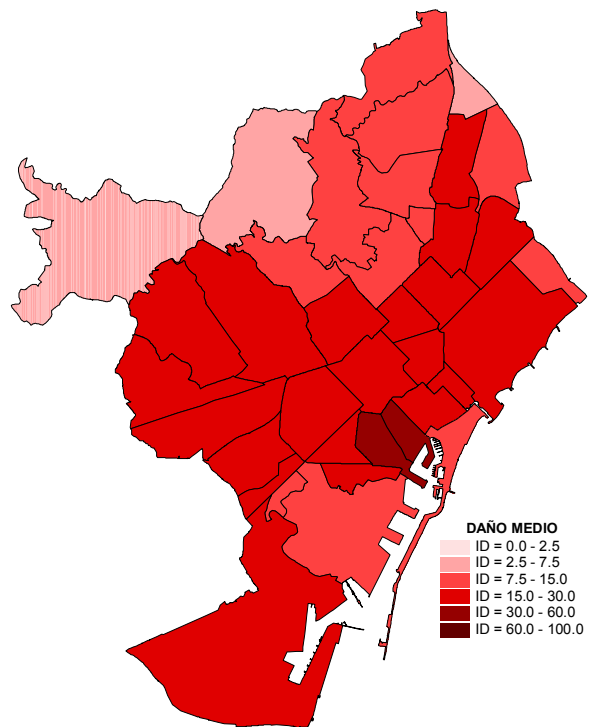
Distrito	Barrio	Nombre	VULNERABILIDAD MEDIA		ÍNDICE DE DAÑO MEDIO			
			Mampostería	Hormigón	VI	VII	VIII	IX
01	1	Barceloneta	47.22	33.36	7.92	13.77	29.19	52.87
	2	Parc	58.53	42.71	15.48	25.54	49.09	74.54
	3	Gòtic	63.61	44.71	19.15	31.28	58.12	83
	4	Raval	63.45	40.08	18.11	31.1	59.39	83.58
02	5	Sant Antoni	54.33	42.86	11.51	24.33	55.34	67.44
	6	Esquerra Eixample	51.17	43.81	10.25	21.55	50.47	61.78
	7	Dreta Eixample	55.93	42.48	12.85	23.48	48.98	70.51
	8	Estació Nord	49.08	40.78	9.41	22.19	50.43	56.63
	9	Sagrada Família	44.98	39.94	7.54	17.24	40.23	48.19
03	10	Poble - Sec	50.83	42.08	10.32	19.33	41.96	59.87
	11	Montjuïc	40.46	43.53	5.49	10.4	23.74	40.26
	12	Z. Franca - Port	32.68	38.91	5.72	16.64	40.12	27.46
	13	Font de la Guatlla	40.73	42.25	6.06	14.35	35.9	39.89
	14	Bordeta - H.	48.39	43.33	9.67	19.79	45.25	55.79
	15	Sants	48.32	43.77	9.51	18.85	42.41	54.99
04	16	Les Corts	43.17	41.09	7.59	19.15	48.64	45.02
	17	Pedralbes	37.46	36.64	6.05	17.6	42.88	33.49
05	18	Sant Gervasi	41.02	40.47	6.83	17.5	43.58	40.65
	19	Sarrià	43.06	36.72	7.37	16.3	37.07	44.93
	20	Vallvidrera - Les P.	29.84	31.48	2.63	5.42	12.87	22.7
06	21	Gràcia	48.3	38.96	9.12	18.65	41.52	55
	22	Vallcarca	35.41	36.89	4.62	11.12	26.89	30.97
07	23	Guinardó	36.59	36.88	4.77	12.1	29.66	32.36
	24	Hòrta	34.19	32.59	3.89	8.91	20.7	29.09
	25	Vall d'Hebron	29.13	31.19	2.37	6.22	14.97	20.11
08	26	Vilapicina-Turo	42.74	37.88	6.57	13.92	32.44	45.46
	27	Roquetes - V.	29.78	34.97	3.69	11.21	28.14	20.67
	28	Ciutat Meridiana	28.63	29.6	3.84	13.6	30.51	19.17
09	29	Sagrera	43.97	40.9	8.16	20.37	50.21	46.7
	30	Congrés	36.03	37.34	4.03	9.55	23.76	30.86
	31	Sant Andreu	47.07	39.96	8.56	17.24	39.74	53.4
	32	Bon Pastor	29.1	35.27	4.43	13.67	34.12	21.03
10	33	Trinitat Vella	29.62	33.66	2.29	5.57	14.33	20.6
	34	Fort Pius	42.37	38.67	8.05	22.73	54.12	44.41
	35	Poblenou	45.71	38.82	8.27	17.12	38.06	50.54
	36	Barris Besòs	28.76	37.94	4.55	14.33	35.74	19.06
	37	Clot	49.65	39.95	9.33	23.12	53.85	58.92
	38	Verneda	30.66	30.45	5.9	22.36	49.55	22.39

Tabla 6.10. Valores de índice de vulnerabilidad media e índice de daño medio por barrio.

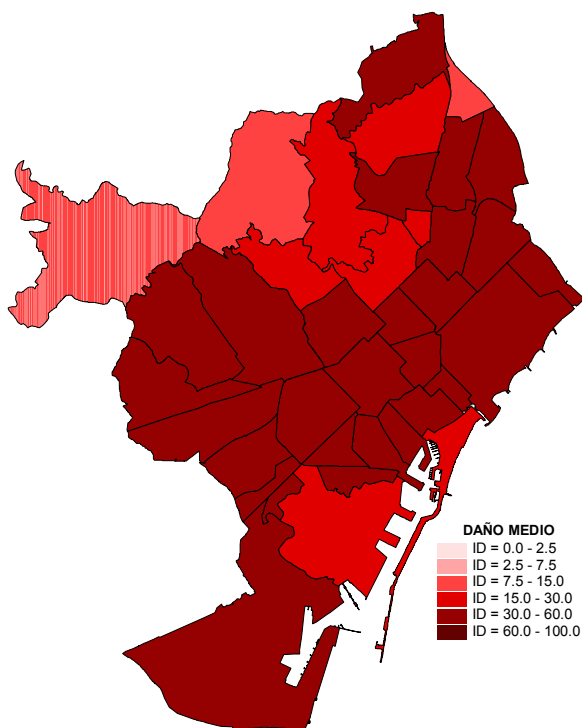
Finalmente, en las Figura 6.33 y 6.35, se muestran los valores correspondientes al índice de daño medio para los distritos y barrios de la ciudad. En estas Figuras 6.34 y 6.36, se puede apreciar el incremento en el daño como consecuencia de un terremoto mayor, principalmente en donde se utiliza como unidad el barrio. Se observa que el mayor daño se producirá en la distrito de Ciutat Vella, coincidiendo con los edificios más antiguos de la ciudad.



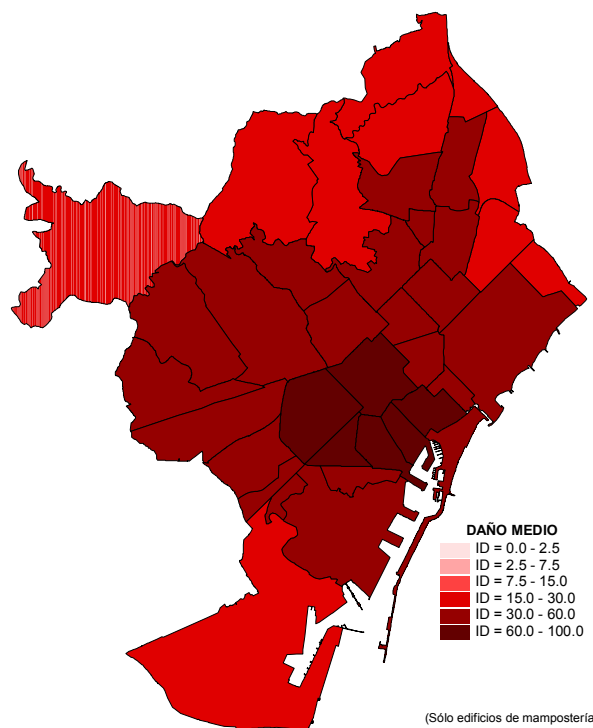
a) Intensidad de VI en la escala MSK



b) Intensidad de VII en la escala MSK



c) Intensidad de VIII en la escala MSK



d) Intensidad de IX en la escala MSK

(Sólo edificios de mampostería)

Figura 6.35. Escenarios de daño medio por barrio de la ciudad de Barcelona, para diferentes intensidades.

6.4 Resumen del capítulo

En este capítulo se muestran finalmente los resultados planteados en los objetivos iniciales, es decir, el cálculo de los escenarios de daño para la ciudad de Barcelona. Aunque en esta parte del trabajo se muestran en forma resumida el proceso utilizado para la evaluación de los parámetros del índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado, el cálculo fue complejo y muy laborioso debido a la gran cantidad de información con que se cuenta de los edificios existentes en la ciudad de Barcelona. Aun así es mínimo, comparando con el trabajo que se llevaría si se realizará un estudio detallado de los edificios de la ciudad y sobre todo por la importancia que estos resultados tendrán en los futuros planes de reducción de desastres.

En este apartado se hace una descripción del proceso de evaluación de los 11 parámetros del índice de vulnerabilidad mediante un diagrama de flujo. En él se indican los campos de la base de datos de las coberturas de las parcelas, que se utilizan para evaluar el índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado.

Una parte importante de este capítulo es la forma en la que se muestran los resultados obtenidos. Para esto se utiliza como ejemplo el distrito del Eixample, para visualizar los resultados (índice de vulnerabilidad Tabla 6.6 e índice de daño Tabla 6.8) utilizando como unidad de estudio la parcela. Otra forma de mostrar los resultados es utilizando como unidades de estudio el barrio o el distrito, como se comprueba en los mapas de vulnerabilidad y escenarios de daño para la ciudad. Finalmente en la Tablas 6.11 – 6.19, se muestran los resultados del índice de vulnerabilidad e índice de daño para los 9 distritos restantes

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	5	0.16	2	1.16
20 – 40	443	13.88	84	48.84
40 – 60	1216	38.10	73	42.44
60 – 80	1223	38.31	11	6.40
80 – 100	305	9.56	2	1.16

Tabla 6.11a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Ciutat Vella.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	388	11.53	140	4.16	11	0.33	0	0.00
2.5 – 7.5	556	16.53	393	11.68	180	5.35	2	0.06
7.5 – 15.0	905	26.90	822	24.44	291	8.65	24	0.75
15.0 – 30.0	1155	34.33	683	20.30	727	21.61	362	11.34
30.0 – 60.0	359	10.67	1045	31.06	829	24.64	637	19.96
60.0 – 100.0	0	0.00	281	8.35	1326	39.42	2166	67.86

Tabla 6.11b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Ciutat Vella, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	43	1.24	1	0.11
20 – 40	1090	31.50	228	24.28
40 – 60	1651	47.72	690	73.48
60 – 80	577	16.68	19	2.02
80 – 100	99	2.86	1	0.11

Tabla 6.12a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Sants Montjuïc.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	938	20.85	421	9.36	80	1.78	9	0.26
2.5 - 7.5	1215	27.01	1003	22.29	400	8.89	24	0.69
7.5 – 15.0	1563	34.74	897	19.94	731	16.25	208	6.01
15.0 – 30.0	496	11.02	958	21.29	1039	23.09	706	20.40
30.0 – 60.0	177	3.93	1030	22.89	962	21.38	1176	33.99
60.0 – 100.0	0	0.00	90	2.00	1187	26.38	1336	38.61

Tabla 6.12b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Sants Montjuïc, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	21	2.02	2	0.26
20 – 40	466	44.81	216	28.35
40 – 60	478	45.96	532	69.82
60 – 80	72	6.92	12	1.57
80 – 100	3	0.29	0	0.00

Tabla 6.13a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Les Corts.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	361	20.03	170	9.43	39	2.16	7	0.67
2.5 - 7.5	616	34.18	442	24.53	143	7.94	12	1.15
7.5 – 15.0	736	40.84	245	13.60	351	19.48	52	5.00
15.0 – 30.0	66	3.66	356	19.76	310	17.20	297	28.56
30.0 – 60.0	16	0.89	584	32.41	341	18.92	442	42.50
60.0 – 100.0	0	0.00	5	0.28	618	34.30	230	22.12

Tabla 6.13b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Les Corts, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	109	3.14	5	0.30
20 – 40	1684	48.54	630	37.66
40 – 60	1415	40.79	1011	60.43
60 – 80	236	6.80	26	1.55
80 – 100	25	0.72	1	0.06

Tabla 6.14a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Sarria – S. Gervasi.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	1561	30.36	882	17.15	275	5.35	18	0.52
2.5 – 7.5	1723	33.51	1290	25.09	619	12.04	83	2.39
7.5 – 15.0	1579	30.71	773	15.03	1064	20.69	379	10.93
15.0 – 30.0	201	3.91	989	19.23	907	17.64	1099	31.68
30.0 – 60.0	60	1.17	1185	23.05	938	18.24	1202	34.65
60.0 – 100.0	0	0.00	23	0.45	1339	26.04	688	19.83

Tabla 6.14b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Sarria – S. Gervasi, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	50	1.45	1	0.09
20 – 40	1422	41.33	461	43.66
40 – 60	1466	42.60	574	54.36
60 – 80	430	12.50	20	1.89
80 – 100	73	2.12	0	0.00

Tabla 6.15a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Gràcia.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	1297	28.84	706	15.70	137	3.05	13	0.38
2.5 – 7.5	1337	29.73	1004	22.33	596	13.25	36	1.05
7.5 – 15.0	1350	30.02	888	19.75	811	18.03	355	10.32
15.0 – 30.0	373	8.29	1004	22.33	949	21.10	906	26.33
30.0 – 60.0	127	2.82	818	18.19	1030	22.90	1017	29.56
60.0 – 100.0	0	0.00	77	1.71	974	21.66	1114	32.37

Tabla 6.15b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Gràcia, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	191	3.67	5	0.37
20 – 40	3613	69.35	826	61.78
40 – 60	1283	24.63	494	36.95
60 – 80	120	2.30	11	0.82
80 – 100	3	0.06	1	0.07

Tabla 6.16a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Horta – Guinardo.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	3427	52.34	2410	36.81	558	8.52	19	0.36
2.5 – 7.5	1961	29.95	1783	27.23	1891	28.88	142	2.73
7.5 – 15.0	1017	15.53	708	10.81	1479	22.59	1244	23.88
15.0 – 30.0	108	1.65	1053	16.08	932	14.24	2041	39.17
30.0 – 60.0	13	0.20	588	8.98	954	14.57	1329	25.51
60.0 – 100.0	0	0.00	5	0.08	733	11.20	433	8.31

Tabla 6.16b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Horta – Guinardo, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	115	3.75	6	0.52
20 – 40	1956	63.84	624	54.17
40 – 60	956	31.20	508	44.10
60 – 80	36	1.17	14	1.22
80 – 100	1	0.03	0	0.00

Tabla 6.17a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Nou Barris.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	1871	44.38	1308	31.02	251	5.95	10	0.33
2.5 – 7.5	1059	25.12	944	22.39	1092	25.90	83	2.71
7.5 – 15.0	1229	29.15	178	4.22	782	18.55	654	21.34
15.0 – 30.0	43	1.02	1191	28.25	306	7.26	1134	37.01
30.0 – 60.0	3	0.07	590	13.99	1092	25.90	533	17.40
60.0 – 100.0	0	0.00	5	0.12	693	16.44	649	21.18

Tabla 6.17b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Nou Barris, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	100	3.27	4	0.38
20 – 40	1540	50.38	383	36.48
40 – 60	1118	36.57	648	61.71
60 – 80	290	9.49	14	1.33
80 – 100	9	0.29	1	0.10

Tabla 6.18a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Sant Andreu.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	1345	32.75	846	20.60	211	5.14	9	0.29
2.5 - 7.5	1195	29.10	990	24.11	665	16.19	73	2.39
7.5 – 15.0	1275	31.04	553	13.46	843	20.53	342	11.19
15.0 – 30.0	234	5.70	862	20.99	646	15.73	930	30.42
30.0 – 60.0	48	1.17	848	20.65	802	19.53	930	30.42
60.0 – 100.0	0	0.00	8	0.19	940	22.89	772	25.25

Tabla 6.18b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Sant Andreu, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA		EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	
	Nº	(%)	Nº	(%)
0 – 20	58	3.18	9	0.67
20 – 40	638	35.02	715	53.20
40 – 60	868	47.64	583	43.38
60 – 80	230	12.62	36	2.68
80 – 100	28	1.54	1	0.07

Tabla 6.19a. Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios de Sant Martí.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDO PARA LAS INTENSIDADES							
	VI		VII		VIII		IX	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
0.0 – 2.5	592	18.70	392	12.38	83	2.62	12	0.66
2.5 - 7.5	1136	35.88	429	13.55	318	10.04	41	2.25
7.5 – 15.0	1137	35.91	487	15.38	345	10.90	158	8.67
15.0 – 30.0	233	7.36	1088	34.37	525	16.58	393	21.57
30.0 – 60.0	56	1.77	738	23.31	993	31.36	548	30.08
60.0 – 100.0	0	0.00	32	1.01	902	28.49	670	36.77

Tabla 6.19b. Resultados del índice de daño obtenidos para el distrito de Sant Martí, considerando cuatro terremotos de estudio. Para el terremoto de intensidad IX, sólo se consideran los edificios de mampostería no reforzada.