

# SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑO SÍSMICO EN ZONAS URBANAS

FABRICIO YÉPEZ MOYA

ALEX H. BARBAT

y

JOSEP A. CANAS

*E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Módulo D2, Gran Capitán s/n,  
08034 Barcelona, España*

## RESUMEN

Se presenta una metodología para realizar un proceso de simulación del daño en edificios de mampostería no reforzada existentes en una zona urbana. A partir de la simulación del comportamiento de miles de edificios hipotéticos y de un estudio probabilista de los resultados, se infieren matrices de probabilidad condicional de daño y funciones de vulnerabilidad, las cuales constituyen los componentes básicos de los estudios de vulnerabilidad sísmica y, por ende, de los estudio de riesgo sísmico. El soporte de la metodología presentada es el método italiano del índice de vulnerabilidad, junto con los resultados de un levantamiento de daños post-terremoto. La metodología desarrollada se aplica a una zona céntrica de la ciudad de Barcelona, obteniéndose posibles escenarios de daño característicos del lugar.

## SUMMARY

A methodology to perform a damage simulation procedure for existing non-reinforced masonry buildings in an urban zone is presented in this paper. By simulating the behaviour of thousands of hypothetical buildings and performing probabilistic studies of the computed results, damage probability matrices and vulnerability functions are obtained, which are the bases for vulnerability and seismic risk evaluations. The fundamentals of the presented methodology are the italian vulnerability index and the results of a post-earthquake survey damage study. As an example, an urban zone of Barcelona is examined and probable damage scenarios are developed.

## INTRODUCCIÓN

Los daños provocados por terremotos en las estructuras, con sus consecuencias económicas y sociales, han incentivado el estudio del riesgo sísmico en las estructuras de edificación en general y en especial en los edificios antiguos que, generalmente, son más vulnerables que los nuevos. En este trabajo se ha considerado una definición del *riesgo sísmico* basada en la convolución de los tres factores siguientes<sup>1</sup>:

Recibido: Marzo 1995

- la **peligrosidad sísmica** que representa la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de un área dada, de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad determinada;
- la **vulnerabilidad sísmica** de una estructura o grupo de estructuras, definida como el grado de daño debido a la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad determinada;
- el **coste** de las estructuras.

Sin lugar a dudas, un mecanismo para la mitigación del riesgo sísmico es la reducción de la vulnerabilidad y por ello, es muy importante su evaluación. El resultado esperado de los estudios de vulnerabilidad es el grado de daño que sufriría una estructura, de una tipología dada, sometida a la acción de un sismo de determinadas características. Dicho resultado puede obtenerse mediante: 1) *matrices de probabilidad de daño*, las cuales expresan en forma discreta la probabilidad condicional  $P[D = j|i]$  de obtener un nivel de daño igual a  $j$  dado un sismo de tamaño  $i$  y 2) *funciones de vulnerabilidad*, las cuales son relaciones que expresan en forma continua la vulnerabilidad en función de algún parámetro que describa el tamaño del sismo<sup>2</sup>.

La obtención tanto de matrices de probabilidad de daño como de funciones de vulnerabilidad puede realizarse, por una parte, mediante estudios estadísticos de datos observados durante sismos pasados (vulnerabilidad observada) y, por otra, mediante la simulación de resultados basada en modelos matemáticos y mecánicos de estructuras (vulnerabilidad calculada). Sin embargo, hay que resaltar la falta de estudios de este tipo e incluso la inexistencia de ellos en muchos países con una sismicidad significativa. Dependiendo de una u otra forma de expresar la vulnerabilidad de una estructura, puede obtenerse las expresiones que evalúan el riesgo específico  $S$  de la siguiente manera<sup>2</sup>:

- Utilizando matrices de probabilidad de daño

$$S = \sum_j \sum_i P[D = j|i] \times P[i] \quad (1)$$

lo que quiere decir que  $S$  se obtiene como producto de la probabilidad condicional de que se produzca un nivel de daño  $j$ , dado un sismo de intensidad  $i$ , por la probabilidad de obtener dicho sismo para un periodo de retorno dado y, todo ésto, para cada nivel de daño correspondiente a cada intensidad. De esta manera, el riesgo específico  $S$  queda asociado al mismo periodo de retorno que el proporcionado por la peligrosidad sísmica.

- Utilizando funciones de vulnerabilidad

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{\max}} f(d|I) f(I) dI dd \quad (2)$$

$$S = F(d_{\max}) \quad (3)$$

donde  $F(\bar{d})$  es la función de distribución de probabilidad de daño acumulada para  $d = \bar{d}$ , siempre que las variables señaladas puedan ser consideradas como aleatorias,

independientes y continuas en su rango de definición. La expresión  $f(d|I)$  es la función de densidad de probabilidad de daño, condicionada respecto a la intensidad del sismo, y  $f(I)$  es la función de densidad de probabilidad de la intensidad del terremoto. Por consiguiente, el riesgo específico  $S$  vendrá dado por el valor máximo de la función de distribución de daño acumulada.

El objetivo de este artículo es realizar una simulación del daño provocado por terremotos en edificios de mampostería, en los cuales no se encuentra presente ningún tipo de refuerzo, tales como armado con varillas o perfiles de acero, armado con fibras naturales o sintéticas, pórticos de arriostre de hormigón, cinturones de amarre, anillos de confinamiento, soportes laterales adicionales, etc. A éstos se les denominará en este artículo como edificios de mampostería no reforzada. Se propone también un procedimiento de calibración de las funciones de vulnerabilidad obtenidas de la simulación a partir de la información de un levantamiento de daños post-terremoto y derivar, mediante un análisis probabilístico, matrices de probabilidad de daño que sean aplicables a España. Finalmente, se aplicará la metodología desarrollada a un sector de Barcelona.

## MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

Para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios existentes en zonas urbanas se ha escogido el método del índice de vulnerabilidad<sup>3</sup>, el cual ha sido desarrollado y ampliamente aplicado en diversas zonas sísmicas de Italia, basado en una gran cantidad de datos observados del daño provocado en edificios por los diferentes terremotos que ha sufrido la península itálica. El método del índice de vulnerabilidad identifica los parámetros más importantes que controlan el daño en un edificio ante una sollicitación sísmica. Los estudios de la configuración en planta y en elevación, el tipo y calidad de los materiales utilizados, la posición y la cimentación del edificio, la disposición de los elementos estructurales y no estructurales, así como el estado de conservación de la estructura, son calificados individualmente en una escala numérica afectada por un factor de peso, que trata de resaltar la importancia de un parámetro respecto al resto. A partir de los valores de los parámetros obtenidos de esta manera, se realiza una calificación global del edificio en una escala numérica continua con valores entre 0 y 382.5, que representan el índice de vulnerabilidad del edificio ( $I_v$ )<sup>4</sup>. En la Tabla I se resumen los parámetros utilizados, sus posibles calificaciones ( $K_i$ ), de acuerdo a las condiciones de calidad en que se encuentren (desde A –óptimo– hasta D –muy desfavorable–) y el factor de peso asignado a cada parámetro. El índice de vulnerabilidad global del edificio es evaluado mediante la expresión:

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i \times W_i \quad (4)$$

Aunque de por sí, el índice de vulnerabilidad es ya un parámetro que ayuda a identificar los edificios sísmicamente peligrosos, permite también definir funciones de vulnerabilidad que relacionen el propio índice de vulnerabilidad  $I_v$ , con el índice de daño  $D$  del edificio, condicionado sobre la intensidad

Num	Parámetro	$K_iA$	$K_iB$	$K_iC$	$K_iD$	Peso $W_i$
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.0
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4	Posición edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1.0
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

Tabla I. Escala numérica del Índice de Vulnerabilidad ( $I_v$ )<sup>4</sup>

macrosísmica  $I$ . La observación del daño en estructuras después de ocurrido un terremoto, así como la simulación del daño utilizando modelos matemáticos permiten la deducción, por métodos probabilistas, de funciones de este tipo. El índice de daño  $D$  se define mediante la asignación de valores a los diferentes componentes estructurales, tales como: elementos verticales, elementos horizontales, muros divisorios y elementos no estructurales. El resultado final es un índice de daño  $D$  cuyo valor, expresado en porcentaje, está comprendido entre 0 y 100.

Por otro lado, diversos estudios de vulnerabilidad sísmica basados en otros métodos de evaluación realizados en varios lugares del mundo, permiten concluir que no es del todo fiable la utilización de funciones de vulnerabilidad obtenidas en otros países. Por lo tanto, es importante la obtención de funciones de vulnerabilidad en los sitios en los que se realizan los estudios, a fin de tener en cuenta la utilización de tecnologías constructivas diferentes, mano de obra de distintas características, etc.<sup>2</sup> Ésto únicamente es posible utilizando y procesando la información que pueda obtenerse de un estudio post-terremoto que se realice en la región de interés.

A fin de obtener funciones de vulnerabilidad que relacionen los índices de daño y de vulnerabilidad, se ha realizado un estudio post-terremoto inmediatamente después de los sismos ocurridos el 23 de Diciembre de 1993 y el 4 de Enero de 1994, sentidos en una amplia zona del sur de España. Los epicentros de los sismos se localizaron en la provincia de Almería; el primero cerca de las poblaciones de San Roque y Berja y el segundo a unos 20 km de la costa, frente a las localidades de Almerimar y Baños. La profundidad focal fue de 10-15 km. La intensidad máxima evaluada en los sitios más críticos alcanzó el grado VII en la escala MSK, resultando seriamente afectadas ciertas estructuras tanto de mampostería como de hormigón armado<sup>5</sup>.

El procedimiento se inició con un levantamiento de los datos de cada edificio estudiado; a la vez que se examinó su vulnerabilidad, se realizó una evaluación del daño que sufrieron dichos edificios. El tipo y la extensión del daño son analizados y clasificados para cada uno de los elementos de cada edificio, tanto los que forman parte del sistema estructural resistente, como los elementos considerados no estructurales. Una vez obtenido el grado de daño en cada elemento, pudo determinarse un grado de daño global de toda la estructura y, a su vez, relacionarlo con el índice de daño utilizado en la metodología italiana. Disponiéndose de los índices de vulnerabilidad y de daño de cada edificio, se obtiene, mediante un análisis estadístico, la función de vulnerabilidad correspondiente al nivel de intensidad del terremoto ocurrido en el lugar. La función matemática ajustada puede expresarse en la forma

$$D = 2.76 \times 10^{-6} I_v^3 - 5.0335 \times 10^{-4} I_v^2 + 0.02959505 I_v - 0.08823776 \quad (5)$$

La Figura 1 muestra los datos de los levantamientos en forma de puntos, la curva de regresión polinomial en línea continua y, a manera de comparación, en línea discontinua las curvas italianas propuestas por Angeletti et al.<sup>6</sup> para intensidades VI, VII y VIII en la escala MCS. La curva de la Figura 1 constituye la primera función de vulnerabilidad observada obtenida a partir de un estudio post-terremoto en España y, posiblemente, la primera función obtenida fuera de Italia que utiliza el método del índice de vulnerabilidad<sup>2</sup>.

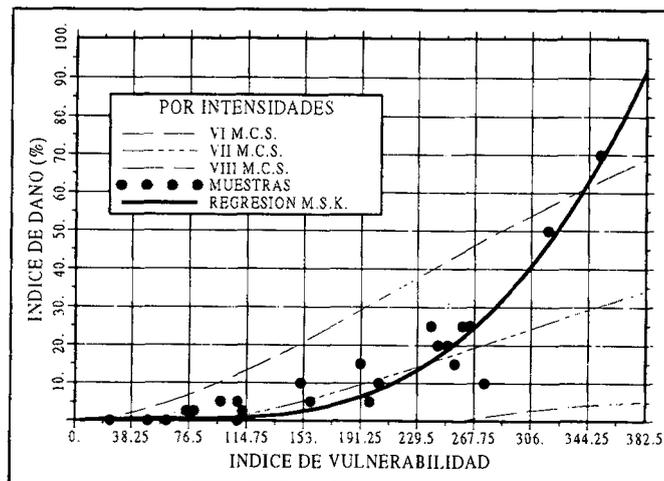


Figura 1. Función de vulnerabilidad observada en España, para un nivel de intensidad VII MSK<sup>2</sup>. En trazos entrecortados se representan las funciones propuestas por Angeletti et al.<sup>6</sup>

## SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

### Aspectos Generales

La aplicación de modelos matemáticos y de laboratorio fiables en simulación ha dado lugar a los estudios de vulnerabilidad calculada, como el que se describe a continuación, sin que se necesite disponer de la información proveniente de estudios post-terremoto para realizarlos.

La mampostería es un material no homogéneo y anisótropo y este aspecto, en conjunto con la diversidad de tipos de material y de tipologías constructivas, hace muy difícil la modelación estructural. La anisotropía del material en sí no representa un grave problema para modelar las estructuras, siempre y cuando los elementos de mampostería sean bastante regulares en toda la extensión del muro; en caso contrario, dicha modelación se vuelve muy compleja, lo cual, en la realidad es muy común, especialmente en el caso de edificios antiguos. Por todas estas consideraciones, es posible describir el comportamiento de muros de mampostería mediante modelos con diferentes grados de complejidad; la selección del modelo dependerá del conocimiento certero de las características de las cargas aplicadas y de los parámetros experimentales requeridos por el modelo<sup>7</sup>.

Los métodos basados en la vulnerabilidad calculada utilizan modelos estructurales capaces de reproducir las deformaciones cíclicas inelásticas experimentadas por sus elementos durante la aplicación de cargas sísmicas. Una vez que se haya calculado la respuesta de la estructura, estos métodos la relacionan con el daño ocurrido en los elementos estructurales o en la estructura misma, mediante indicadores de daño. Éstos reflejan únicamente la degradación de la capacidad de la estructura para resistir fuerzas sísmicas, razón por la cual es difícil relacionarlos con el daño real observado en edificios afectados por sismos, que es un indicador más fiable de las pérdidas económicas totales. Por otro lado, la utilización a gran escala de los métodos de vulnerabilidad calculada, es decir, el análisis de toda una zona urbana, puede resultar bastante difícil, por lo que su aplicación se restringe al estudio de estructuras tratadas de manera individual<sup>2</sup>. Así mismo, debido a la naturaleza y a los objetivos del presente trabajo no es posible aplicar modelos muy sofisticados dado que, tal como se verá más adelante, es necesario simular miles de edificios para los cuales las características y propiedades de los mismos, así como las de sus materiales constitutivos, son aleatorias. Por este motivo, es necesario utilizar un modelo más sencillo pero que refleje adecuadamente el comportamiento inelástico observado en los estudios experimentales, así como también, definir

un algoritmo apropiado para el proceso de cálculo. En el esquema de la Figura 2 se representa el algoritmo utilizado, el cual se explica en detalle a continuación.

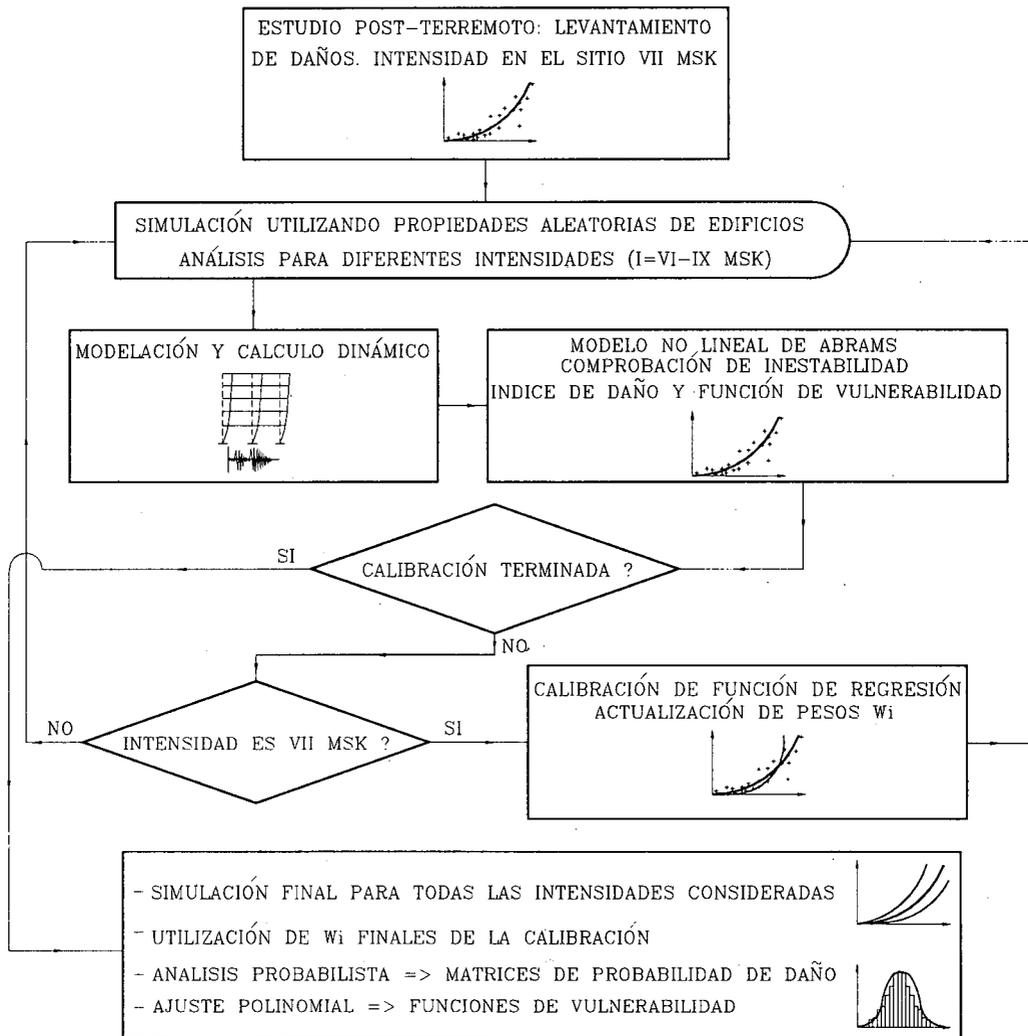


Figura 2. Algoritmo general del proceso de simulación

La primera etapa, correspondiente al levantamiento de los datos de campo y a la obtención de la función observada, ha sido descrita anteriormente. La segunda etapa comprende un proceso iterativo que se realiza para las intensidades macrosísmicas VI, VII, VIII y IX en la escala MSK, que incluye diferentes sub-etapas. El proceso tiene como punto de partida la generación aleatoria de la información de 60 edificios hipotéticos, a partir de datos que responden a una ley de distribución uniforme de probabilidades y, de acuerdo con dichos datos, se califica cada uno de los parámetros requeridos por la

metodología italiana para cada uno de los edificios. Esto permite calcular los índices de vulnerabilidad  $I_v$  y crear un archivo con toda la información necesaria de cada edificio para empezar las siguientes sub-etapas.

### Modelación y cálculo dinámico

En el proceso se consideran diferentes intensidades  $I$ , cada una de ellas asociada con una aceleración máxima esperada del movimiento del terreno  $a$  (en gals), mediante la siguiente relación descrita en la normativa sismorresistente NCSE-94 española<sup>8</sup>:

$$\log_{10} a = 0.30103 I - 0.2321 \quad (6)$$

Por otro lado, considerando diferentes aspectos condicionantes tales como la falta de resolución, característica de los estudios de peligrosidad sísmica, la concepción del modelo de daño a utilizarse, el cual requiere únicamente la respuesta máxima de la estructura, la baja ductilidad propia de las estructuras de mampostería y, por último, dado el hecho de que se requerirá evaluar, en una etapa posterior, la respuesta de miles de edificios, se ha optado por definir la acción sísmica mediante los espectros de respuesta de la misma normativa mencionada. Por todo ello, se utilizó el análisis modal discretizando las estructuras como ejes de cortante, es decir, con masas y rigideces concentradas en cada piso (cuando se cumplan las condiciones mínimas de estabilidad lateral y suficiencia de rigidez en el plano del sistema de forjado de las estructuras) o como un solo panel a cortante sin discretización en toda la altura del edificio (siempre que no se cumplan las condiciones anteriores).

### Evaluación del daño y obtención de resultados

De entre los pocos métodos existentes de evaluación de la resistencia máxima de elementos de mampostería ante cargas verticales y laterales, se ha escogido el de Abrams, el cual ha sido comprobado experimentalmente con numerosos ensayos realizados a escala natural en los laboratorios de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign<sup>9</sup>. El modelo describe adecuada y eficientemente el comportamiento inelástico de paneles de mampostería no reforzada. Tiene en cuenta el incremento substancial de la resistencia lateral posterior al agrietamiento inicial, lo cual permite alcanzar niveles de resistencia mucho mayores a los que se suponen en la mayoría de las normativas sismorresistentes del mundo. Dicho modelo incluye en el análisis los tipos de fallo que gobiernan el comportamiento del panel, tanto a flexocompresión como a cortante. Finalmente, el modelo evalúa la capacidad máxima del muro para resistir cargas sísmicas.

Para la evaluación del daño en las estructuras, se debe utilizar un modelo que se adapte a las condiciones y restricciones del presente estudio. Existen en la literatura diversas metodologías basadas en conceptos energéticos, de capacidades y deformaciones máximas, de potencial de daño, etc.<sup>10-12</sup> Se ha escogido una variante de las metodologías propuestas por las referencias 13 y 14, la cual permite calcular un *índice de daño de la estructura por piso*,  $D_{P_i}$ , utilizando la expresión

$$D_{P_i} = \frac{V_{\max} - V_y}{V_u - V_y} \quad (7)$$

donde se relacionan las solicitaciones a cortante: la máxima ( $V_{\max}$ ) y las correspondientes a los estados inicial ( $V_y$ ) y de máxima fisuración ( $V_u$ ), previo al colapso de los paneles de mampostería. De esta forma se logra adaptar la estimación del daño al algoritmo de cálculo y a los resultados proporcionados por el modelo de Abrams.

Para la determinación de un *índice global de daño*  $D$  de toda una estructura, se utiliza la sugerencia de Chung *et al.*<sup>15</sup>, definiéndolo como una suma ponderada de los índices de daño de cada piso individual, donde los pesos son mayores si los pisos son más bajos

$$D = \sum_{i=1}^n \left( \frac{n+1-i}{n} \right) D_{P_i} \quad (8)$$

siendo  $n$  el número de pisos. Finalmente, el índice se normaliza, expresándose en porcentaje.

A partir de los datos generados se realizaron, para cada uno de los edificios, todos los cálculos estructurales incluyendo la definición de la acción sísmica a aplicar, la discretización de la estructura, el análisis dinámico y la utilización del método de evaluación del daño, obteniéndose el índice de daño global  $D$  del edificio para cada nivel de intensidad macrosísmica en la escala MSK. Se efectuó primero la simulación para la intensidad VII correspondiente a la función de vulnerabilidad observada (Figura 1). Con los puntos obtenidos se realizó un ajuste polinomial, cuyo resultado está representado en la Figura 3, junto con la función de vulnerabilidad observada. Nótese que cada punto de la gráfica puede representar uno o varios edificios, dada la posibilidad de simular edificios con índice de vulnerabilidad y de daño similares.

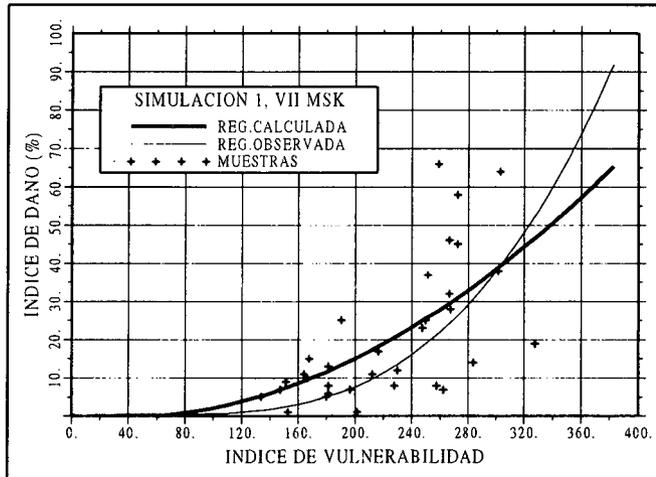


Figura 3. Primera simulación de edificios para intensidad VII y comparación con la función observada

### Calibración del modelo matemático

El ajuste obtenido mediante simulación es bastante similar a la curva observada para los rangos del índice de vulnerabilidad menores a 100; sin embargo, para valores mayores, la curva simulada alcanza valores más altos o más bajos. Aquí deben discutirse dos aspectos. El primero es que la curva observada está avalada por datos reales, por lo que se debe considerar que la simulada es la que no se ajusta adecuadamente a la “real”. El segundo es que la evaluación del índice de vulnerabilidad utiliza los pesos  $W_i$  en la ecuación (4), los cuales han sido propuestos en la referencia 4 (Tabla I) en base a la amplia experiencia en evaluación de daños ocasionados por sismos en edificios italianos. Teniendo en cuenta estos aspectos, se calibró la función de vulnerabilidad calculada a partir de la función de vulnerabilidad observada. La estrategia utilizada ha consistido en variar los pesos  $W_i$ , pero manteniendo la relación de proporción entre ellos, puesto que el método italiano jerarquiza los parámetros que tienen mayor influencia en el daño esperado en un edificio mediante los mencionados pesos. La calibración propuesta se realiza “llevando” la curva simulada hacia la observada mediante el siguiente proceso<sup>16</sup>:

- Considerando como datos los valores del índice de daño  $D$  de todos los edificios generados, se calcula el índice de vulnerabilidad  $I_V$  que cada uno de ellos debería tener para que correspondiese a la función observada. Ésto se puede lograr mediante una búsqueda de las raíces del polinomio de tercer orden, para cada edificio, que describe la curva de vulnerabilidad observada obtenida anteriormente (expresión 5). Dado que el valor de  $D$  es conocido para cada edificio, la ecuación se resuelve para obtener el valor de  $I_V$ .

Realizando este proceso, se observa que solamente una de las raíces es real, por lo que no existen problemas de indeterminación.

- Una vez obtenidos los valores de  $I_v$  que deberían tener los edificios hipotéticos, se aplica un proceso matemático de inversión generalizada condicional. Para ello se utiliza el sistema de ecuaciones lineales generado por la ecuación (4), una para cada edificio, en las cuales se conocen los valores de  $I_v$  y  $K_i$ . Se consideran además diez ecuaciones de restricción cuyo papel es el de mantener las proporciones originales entre los pesos  $W_i$  de la escala de la referencia 4.
- Como resultado de la inversión generalizada se obtienen nuevos valores de  $W_i$ , los cuales se utilizaron como datos para generar aleatoriamente nuevas características para 60 edificios y calcular sus índices de vulnerabilidad. A continuación se evalúan los nuevos valores del índice de daño  $D$  con los que, mediante un ajuste polinomial del mismo orden que el anterior, se obtiene una nueva curva simulada; dicha curva es comparada con la observada en la Figura 4.

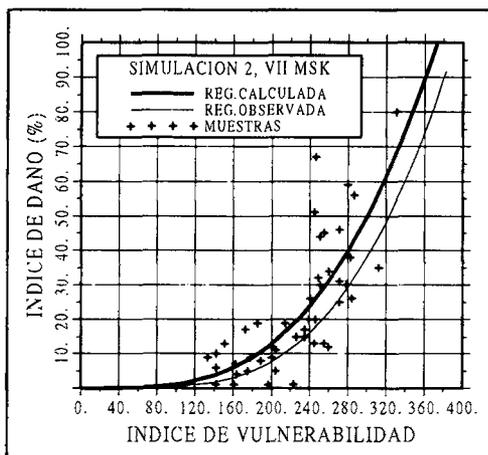


Figura 4. Segunda simulación para intensidad VII y comparación con la función observada

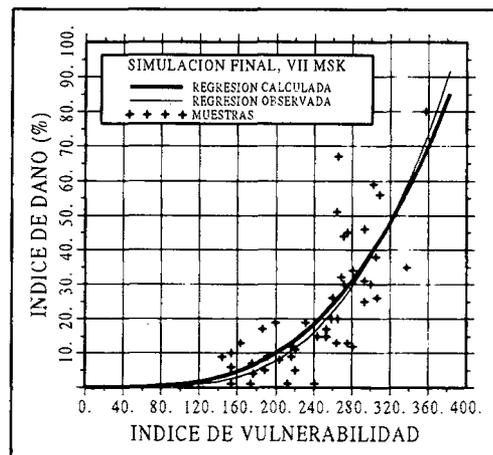


Figura 5. Simulación final de edificios para intensidad VII y comparación con la función observada

- Como se puede apreciar, la forma de las dos curvas es bastante parecida aunque existe un desfase; tal situación sugiere que puede alcanzarse la convergencia del método de calibración propuesto aquí. Por lo tanto, es necesario realizar una nueva iteración del proceso de ajuste, siguiendo todo el procedimiento descrito anteriormente: búsqueda de raíces de los polinomios de tercer orden, inversión generalizada condicional y análisis

polinomial regresional. De esta nueva iteración se obtienen otros valores de  $W_i$ , los cuales se presentan en la Tabla II, junto a los de la primera iteración y a los originales propuestos por Benedetti et al.<sup>4</sup>

Peso $W_i$	Originales Benedetti-Petrini	Iteración 1	Iteración 2
1	1.00	1.015	1.095
2	0.25	0.254	0.274
3	1.50	1.523	1.643
4	0.75	0.762	0.821
5	1.00	1.015	1.095
6	0.50	0.508	0.548
7	1.00	1.015	1.095
8	0.25	0.254	0.274
9	1.00	1.015	1.095
10	0.25	0.254	0.274
11	1.00	1.015	1.095

Tabla II. Valores de  $W_i$  originales de la escala propuesta por Benedetti et al.<sup>4</sup> y del proceso de calibración iterativo efectuado

- De la misma forma, con los nuevos pesos se generan nuevos edificios, se realizan los cálculos y se efectúa el análisis regresional obteniéndose la nueva función simulada, la cual se compara con la observada en la Figura 5. El coeficiente de correlación de la regresión polinomial de la curva así obtenida es del orden del 90%, muy similar al que se obtuvo en la regresión de la función de vulnerabilidad observada en el apartado anterior.

Se puede ver claramente que la similitud entre las curvas es excelente. Si se desea una mayor exactitud puede realizarse una nueva iteración; sin embargo, las dos iteraciones siguientes arrojaron pesos  $W_i$  que diferían solamente a partir de la cuarta cifra decimal con relación a la segunda iteración. Por ésto, se considera que el procedimiento ha convergido, finalizando de esta manera la calibración de la función simulada.

## ESTUDIO PROBABILISTA. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La generación previa de tan solo 60 valores, se realizó con el objeto de simplificar el desarrollo de los análisis polinomiales regresionales y las inversiones generalizadas necesarias para la calibración. A partir de aquí se entra en la fase formal de simulación, en la cual se genera la información completa de unos 2000 edificios hipotéticos. En la Figura 6 se muestran los puntos generados y la regresión polinomial obtenida para el grado de intensidad

VII MSK. Existen casos en los que cada punto de la gráfica representa varios puntos con similar índice de vulnerabilidad y similar índice de daño. El índice de correlación, aunque baje hasta un 80%, se considera adecuado.

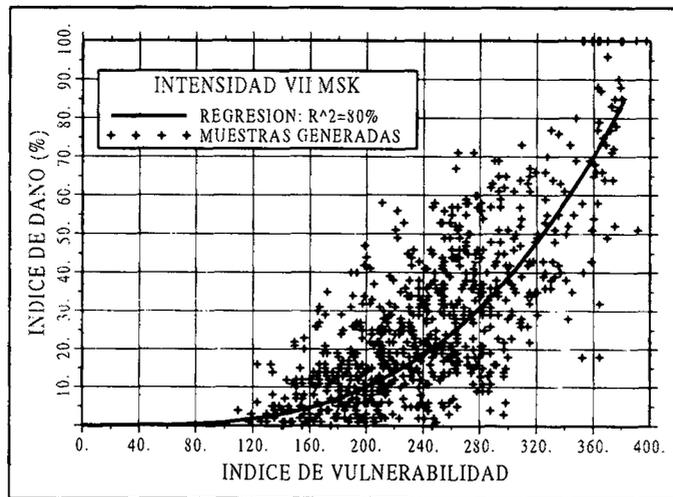


Figura 6. Simulación final de edificios y regresión polinómica para intensidad VII MSK

La primera fase del proceso formal de simulación realizado consiste en la generación aleatoria de los parámetros que intervienen en la determinación del índice de vulnerabilidad, los cuales provienen de una distribución uniforme de probabilidades. Posteriormente, utilizando una combinación lineal ponderada mediante los pesos calibrados, se obtiene el índice de vulnerabilidad. Un histograma de frecuencias relativas con todos los datos de los índices de vulnerabilidad generados se puede observar en la Figura 7, en la que se ha superpuesto la gráfica de la distribución normal. La Figura 8 muestra el diagrama de frecuencias acumuladas de los datos de la figura anterior, así como la función de distribución normal acumulada superpuesta. Como puede apreciarse, los datos se aproximan muy bien a la distribución normal; lo que se ha cumplido es el *teorema central del límite*, el cual está inmerso dentro de lo que se conoce como el *método de Montecarlo* que es el método empleado. El simular mediante un proceso determinista los resultados de muchos experimentos repetitivos a partir de datos de entrada obtenidos de manera probabilista, el construir el histograma de dichos resultados y el buscar la ley de distribución de probabilidad a la que se ajusta y por tanto lo representa es, en pocas palabras, la técnica de simulación por Montecarlo<sup>17</sup>.

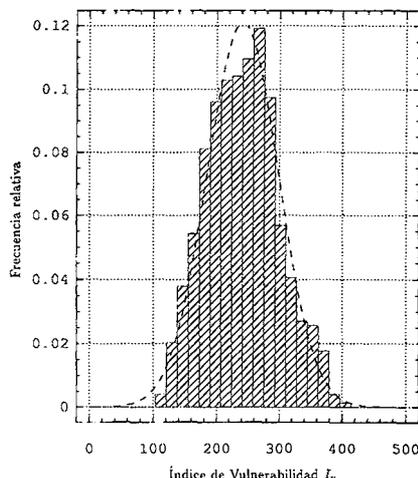


Figura 7. Histograma y ajuste a distribución normal para el índice de vulnerabilidad

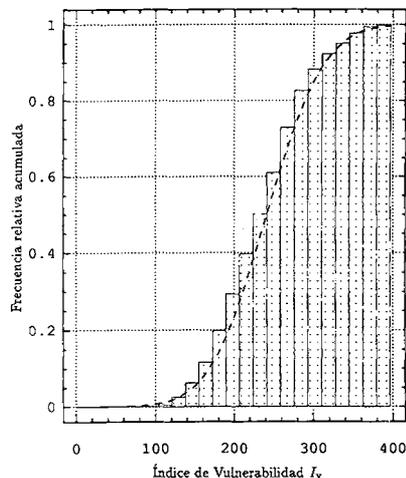


Figura 8. Frecuencias acumuladas y ajuste a la función de distribución normal para el índice de vulnerabilidad

La expresión probabilista para el cálculo del riesgo sísmico específico, en la cual se encuentra involucrado el método del índice de vulnerabilidad, se escribe como

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{v\max}} \int_0^{I_{\max}} f(d | I_v, I) f(I_v) f(I) dI dI_v dd \quad (9)$$

donde  $F(\bar{d})$  es la función de distribución de daño acumulada para  $d = \bar{d}$ . La expresión  $f(d | I_v, I)$  es la función de densidad de daño condicionada sobre el índice de vulnerabilidad y la intensidad del sismo, mientras que las funciones  $f(I_v)$  y  $f(I)$  son las funciones de densidad de  $I_v$  y de la intensidad del terremoto  $I$ . Nótese que el riesgo específico  $S$  viene igualmente expresado por la ecuación (3).

Las Figuras 7 y 8 no hacen sino expresar el término  $f(I_v)$  y, a simple vista, puede verse que el histograma de frecuencias del índice de vulnerabilidad es muy parecido a la distribución normal, lo que es más evidente al examinar el diagrama de frecuencias acumuladas. Un análisis estadístico riguroso requiere, sin embargo, utilizar los denominados *contrastos de significancia* tales como el *test*  $\chi^2$  cuadrado de Pearson o el *test* de Kolmogorov-Smirnov, a fin de obtener una conclusión matemática definitiva<sup>18</sup>. Para utilizar estas pruebas es necesario definir el nivel de significancia, cuyo valor típico es 0.01 o 0.05, aunque suele también considerarse suficiente 0.10, dependiendo del problema analizado<sup>18</sup>.

Comúnmente, el valor de dicho nivel de significancia suele representarse como porcentaje, es decir, sus valores típicos serán 1, 5 o 10%. Así pues, aplicando ambos test a la distribución del índice de vulnerabilidad, se observa que la distribución normal se ajusta para un nivel de significancia del 5%. Se ha definido de esta manera el parámetro  $f(I_v)$ , necesario para la evaluación de las expresiones (9) y (3) del riesgo sísmico.

En cuanto al parámetro  $f(I)$ , su función de densidad se obtiene a partir de estudios de peligrosidad sísmica. Podría utilizarse, por ejemplo, un ajuste de la distribución derivado de la relación entre el número anual de eventos de intensidad mayor o igual a un valor  $I$  y el valor de la intensidad  $I$  o, también, la probabilidad intrínseca de los mapas de peligrosidad sísmica, expresada mediante periodos de retorno. En todo caso, se supondrá que  $f(I)$  es un elemento conocido en la ecuación (9). El último paso es determinar el término  $f(d | I_v, I)$ , que representa la función de densidad del daño condicionada por  $I_v$  y por  $I$ .

En la referencia 4 se ha observado que, para determinados intervalos de  $\Delta I$  y de  $\Delta I_v$ , la distribución del daño condicionada sobre ellos tiende a ser normal, por lo que es posible discretizar la ecuación (9). Esto permite la obtención de la probabilidad condicional de daño,  $P[d | \Delta I_v, \Delta I]$ , en forma de matriz de probabilidad de daño con la salvedad de que, debido a la inclusión del parámetro  $I_v$ , resultará un arreglo en tres dimensiones. De esta manera, la ecuación (9) puede discretizarse de la siguiente forma:

$$P[d_i < d < d_{i+1}] = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m P[d_i < d < d_{i+1} | I_{v_j} < I_v < I_{v_{j+1}}, I_k < I < I_{k+1}] \\ \times P[I_{v_j} < I_v < I_{v_{j+1}}] \times P[I_k < I < I_{k+1}] \quad (10)$$

donde  $P[d_i < d < d_{i+1}]$  es la probabilidad de obtener un grado de daño entre los valores  $d_i$  y  $d_{i+1}$ . El primer término del miembro derecho es la probabilidad de daño entre los dos niveles anteriores, condicionada sobre el índice de vulnerabilidad  $I_v$  y la intensidad  $I$ . Los otros dos términos son las probabilidades totales para el índice de vulnerabilidad (que ya se conoce) y para la intensidad (que se supone conocida a partir de estudios de peligrosidad) comprendida entre los rangos indicados;  $m$  es el número total de intervalos  $\Delta I_v$  y  $n$  el número total de intervalos  $\Delta I$  considerados.

En la simulación realizada para la intensidad VII, los valores de  $k$  y  $n$  de la ecuación (10) serán iguales a 6. Se subdivide la escala del índice de vulnerabilidad en intervalos de ancho de banda 50 y, utilizando todos los datos del índice de daño  $D$  que se encuentren dentro de dichas bandas, se realiza un histograma de frecuencias. Posteriormente, se consideran los posibles modelos

probabilistas que se ajusten a los datos, es decir, que aprueben los tests de contraste con un nivel de significancia del 5% y, para casos muy extremos, del 10%. En las Figuras 9 a 12, inclusives, se presentan ejemplos de las gráficas de dichos histogramas junto con los modelos que pueden ajustarlos.

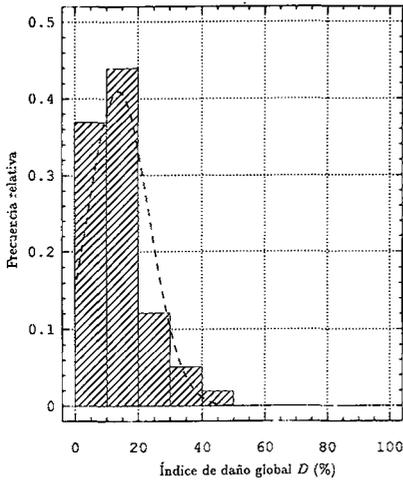


Figura 9. Histograma y distribución normal del daño.  $I_v \in [150,200]$ ,  $I=VII$  MSK

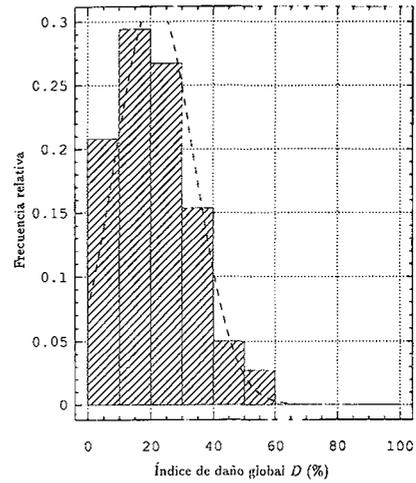


Figura 10. Histograma y distribución normal del daño.  $I_v \in [200,250]$ ,  $I=VII$  MSK

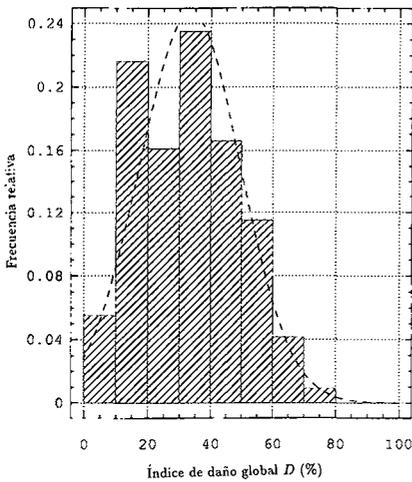


Figura 11. Histograma y distribución normal del daño.  $I_v \in [250,300]$ ,  $I=VII$  MSK

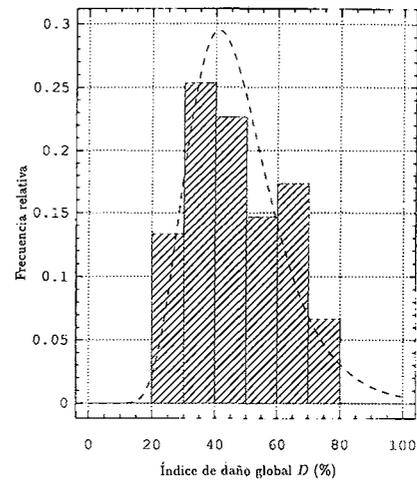


Figura 12. Histograma y distribución normal del daño.  $I_v \in [300,350]$ ,  $I=VII$  MSK

Del análisis de los histogramas se obtuvo que la distribución normal se ajusta de manera muy adecuada a todos los casos, excepto uno, en el cual no pudo cumplirse el contraste  $\chi^2$  de Pearson, pero sí el de Kolmogorov-Smirnov, por lo que se prefirió adoptar la distribución lognormal que sí los cumplía. Si se acepta la hipótesis de que los modelos matemáticos se ajustan a los datos simulados, se puede evaluar la función de densidad de daño condicionada por el  $I_v$  y por  $D$ , que no es más que una evaluación de la función de densidad de los modelos ajustados. Puede entonces calcularse la triple integral de la ecuación (9), reemplazando las funciones matemáticas de los modelos del índice de daño obtenidos ( $f(d | I_v, I)$ ), del modelo del índice de vulnerabilidad ( $f(I_v)$ ) y de la función de densidad de la intensidad ( $f(I)$ ) que proviene de la peligrosidad, realizar la convolución y el proceso de la evaluación del riesgo sísmico específico habrá culminado. Para facilitar la evaluación de la convolución puede aceptarse la discretización realizada en la ecuación (10) y con ello, obtener matrices de probabilidad para rangos discretizados, mediante la evaluación de las respectivas funciones de densidad de los modelos; de esta manera el proceso de convolución se convierte en una serie de operaciones más sencillas de realizar con valores de probabilidades, de la siguiente manera:

- Discretizando la función de densidad del índice de vulnerabilidad, se obtienen los valores que se encuentran en la Tabla III

Rango de $I_v$	Valor de $f(I_v)$
0 – 100	0.0064
100 – 150	0.0475
150 – 200	0.1795
200 – 250	0.3273
250 – 300	0.2885
300 – 350	0.1229
> 350	0.0228

Tabla III. Valores de  $f(I_v)$  discretizada, del modelo ajustado a los datos simulados mediante una distribución normal

- Discretizando la función de densidad de los modelos que ajustan los datos del índice de daño, se obtendrá la matriz de la Tabla IV. En el eje horizontal se encuentran los rangos de discretización del índice de daño en bandas de 20%, tal como lo hace la escala MSK y en el vertical los rangos del índice de vulnerabilidad considerados.

$f(d   I_v, I)$	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 100	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100 - 150	0.838	0.008	0.000	0.000	0.000
150 - 200	0.660	0.257	0.004	0.000	0.000
200 - 250	0.413	0.473	0.068	0.001	0.000
250 - 300	0.183	0.455	0.293	0.048	0.002
300 - 350	0.005	0.344	0.467	0.149	0.029
> 350	0.000	0.000	0.015	0.276	0.467

Tabla IV. Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, del modelo ajustado a los datos simulados I=VII MSK

Una vez realizado todo el proceso de simulación por ordenador correspondiente a la intensidad VII, se efectúan varias simulaciones para los niveles de intensidad VI, VIII y IX MSK. El proceso es exactamente igual al utilizado para el nivel VII, con la salvedad de que no se dispone de curvas observadas que permitan calibrar las curvas simuladas. Sin embargo, se parte de los pesos calibrados obtenidos para el nivel VII, con lo cual se espera obtener curvas que representen adecuadamente el fenómeno para la intensidad considerada. Los resultados que se presentan en la Figura 13 incluyen las

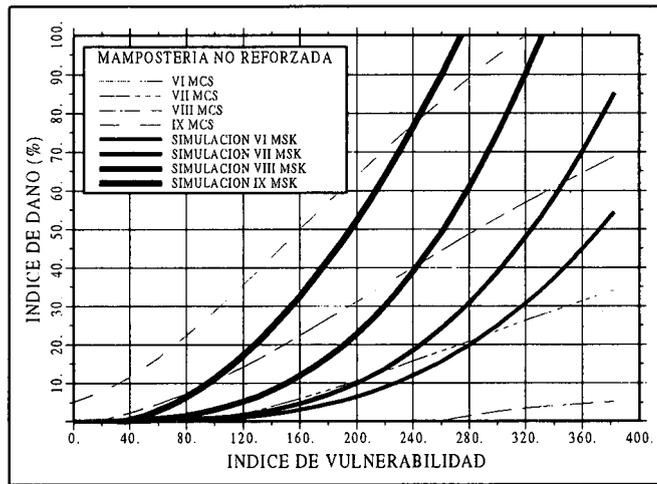


Figura 13. Funciones de vulnerabilidad obtenidas por simulación para mampostería no reforzada y diferentes escalas de intensidad MSK. Las líneas discontinuas representan las curvas italianas propuestas en la referencia 6

funciones de vulnerabilidad simuladas, todas ellas representando regresiones polinómicas en la forma<sup>16</sup>

$$D(\%) = a_1 + a_2 I_v + a_3 I_v^2 + a_4 I_v^3 \tag{11}$$

En la Tabla V se presentan los valores de los coeficientes de las regresiones, así como los índices de correlación obtenidos. Por otro lado, en las Tablas VI, VII

y VIII se presentan los valores de la función de densidad del daño, condicionada para un determinado índice de vulnerabilidad  $I_v$  y el nivel de intensidad  $I$  correspondiente (similares a los de la Tabla IV), para los mismos rangos de valores considerados.

Intensidad	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	Correl
VI	0.02	0.00115144	-0.00007704	0.00000117	80%
VII	0.02	0.00396271	-0.00014492	0.00000187	89%
VIII	-0.10	-0.00112200	0.00007070	0.00000254	88%
IX	-0.78	-0.03608463	0.00161535	-0.00000053	91%

Tabla V. Valores de los coeficientes de las regresiones polinómicas utilizadas e índice de correlación alcanzado

$f(d   I_v, I)$	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 100	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100 - 150	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150 - 200	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
200 - 250	0.731	0.223	0.007	0.000	0.000
250 - 300	0.421	0.522	0.038	0.000	0.000
300 - 350	0.119	0.728	0.143	0.010	0.001
> 350	0.000	0.027	0.608	0.340	0.025

Tabla VI. Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, correspondientes a los modelos ajustados a los datos simulados, I=VI MSK

$f(d   I_v, I)$	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 100	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100 - 150	0.976	0.002	0.000	0.000	0.000
150 - 200	0.540	0.409	0.015	0.000	0.000
200 - 250	0.124	0.244	0.285	0.198	0.082
250 - 300	0.010	0.083	0.280	0.377	0.203
300 - 350	0.000	0.000	0.000	0.115	0.813
> 350	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

Tabla VII. Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, correspondientes a los modelos ajustados a los datos simulados, I=VIII MSK

$P(d   I_v, I)$	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
0 - 100	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100 - 150	0.445	0.555	0.000	0.000	0.000
150 - 200	0.068	0.263	0.389	0.221	0.048
200 - 250	0.000	0.000	0.024	0.447	0.496
250 - 300	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
300 - 350	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
> 350	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

Tabla VIII. Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, correspondientes a los modelos ajustados a los datos simulados, I=IX MSK

Cada casillero de la Tabla III representa la probabilidad de obtener un valor de índice de vulnerabilidad entre los límites superior e inferior correspondiente, mientras que cada casillero de la Tabla IV representa la probabilidad de obtener un índice de daño entre dos límites, condicionada para un valor del índice de vulnerabilidad dentro de un rango dado, para los casos en los cuales la intensidad del terremoto supera el nivel VI y alcanza el VII en la escala MSK. Si se dispone de los valores de la función de densidad de la intensidad discretizada para valores entre el nivel VI y el nivel VII, la solución completa de la ecuación (10) se podría realizar como una serie de productos acumulados, pudiéndose expresar un resultado, por ejemplo, como: "existe una probabilidad del 30% de que se produzca un daño superior al 20%, pero inferior al 40%, en estructuras de mampostería no reforzada, cuyo índice de vulnerabilidad sea mayor que 200 pero menor que 250, si se produjese un terremoto tal que en el sitio de emplazamiento de la estructura bajo estudio se supere la intensidad VI no siendo mayor que VII MSK, para un periodo de retorno de 50 años". El mismo tipo de resultado se obtendrá para otras intensidades, considerando los valores de las Tablas VI - VIII.

Dependiendo de los rangos considerados para la discretización, puede también hablarse de una probabilidad acumulada. Un ejemplo de resultado podría tener esta forma: "existe una probabilidad del 80% de que se produzcan daños de hasta un 70% (o un 20% de probabilidad de que al menos se alcance el 70% de daño) en estructuras de mampostería no reforzada, cuyos índices de vulnerabilidad se encuentren en el rango de valores entre 200 y 300, en el caso que se produjese un sismo que supere la intensidad VIII no siendo mayor que IX MSK, para un período de retorno de 500 años".

Otro mecanismo para la evaluación del riesgo sísmico es el utilizar los denominados *escenarios de daño*. Son esquemas gráficos del proceso de convolución que muestran todos los niveles de daño alcanzables, según los valores de la intensidad considerada, haciendo uso de funciones de vulnerabilidad como las obtenidas en este estudio (Figura 13). La probabilidad de desarrollar dichos escenarios vendrá especificada por el periodo de retorno del terremoto cuya intensidad se considere.

### APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL "EIXAMPLE" DE BARCELONA

La metodología descrita anteriormente se ha utilizado para investigar la vulnerabilidad de edificios de mampostería en un sector del Eixample de Barcelona. La muestra analizada consta de 9 manzanas en las que existen 181 edificios de ladrillo construidos entre los años 1860 y 1939, y 35 edificios de otras

tipologías como son, hormigón armado, edificios metálicos, iglesias, etc. En este estudio, este último grupo de edificios especiales no han sido considerados. El número de pisos promedio de la muestra es 6, con una altura total y área promedio en planta de 19 metros y 281 metros cuadrados, respectivamente. El procedimiento seguido para el estudio de la vulnerabilidad de estos edificios consta, básicamente, de las tres fases siguientes:

1. En la primera fase se recopiló toda la información. Se obtuvo del Centro de Cartografía Automática del Ayuntamiento de Barcelona un mapa digitalizado del sector, el cual contenía cierta información acerca de los edificios, como por ejemplo: área, altura, delimitación, patios interiores y dirección postal. Por otro lado, se analizaron los planos de construcción de 25 de estos edificios, almacenados en el Archivo Histórico del Colegio de Arquitectos de Cataluña, con el propósito de derivar características comunes que fueran a agilizar posteriormente las investigaciones de campo. Finalmente, se examinó cada uno de estos edificios a fin de obtener los datos necesarios para la evaluación de su vulnerabilidad.
2. En la segunda fase se realizó el tratamiento de la información. Del análisis de los planos del Archivo Histórico se obtuvieron regresiones, las cuales se utilizaron para inferir las áreas resistentes de muros  $A_x$  y  $A_y$  a partir de las dimensiones en planta del edificio  $L_x$  y  $L_y$  en los sentidos ortogonales  $x$  e  $y$ , respectivamente, así como las áreas resistentes en función de la superficie en planta. Posteriormente se examinaron los edificios digitalizados en el mapa, para verificar la información de campo y determinar los parámetros complementarios en la definición del índice de vulnerabilidad. Finalmente, los edificios estudiados se organizaron de manera aleatoria, en manzanas similares a las reales.
3. En la última fase se utilizaron programas de ordenador implementados en un Sistema de Información Geográfico para calcular los mapas de vulnerabilidad y los escenarios de daño y, de esta forma, poder automatizar todo el proceso. Para ello se hace uso de las funciones de vulnerabilidad obtenidas en el apartado anterior.

Los resultados obtenidos para la zona se han representado mediante mapas e histogramas de frecuencias. En el mapa de la Figura 14 se puede apreciar el índice de vulnerabilidad de cada uno de los edificios para cinco diferentes rangos: bajo ( $I_v \leq 140$ ), medio-bajo ( $140 < I_v \leq 180$ ), medio ( $180 < I_v \leq 220$ ), alto ( $220 < I_v \leq 260$ ) y muy alto ( $I_v > 260$ ). La importancia de este mapa, con la escala definida de esta manera, radica en que permite una cierta "selección" de los edificios más vulnerables. De esta forma, se observa que hay 41 edificios (23%) con un rango de vulnerabilidad alto y muy alto, los cuales tendrían que

someterse a estudios más detallados antes de tomar cualquier decisión respecto a una posible reducción del riesgo sísmico en la zona estudiada.

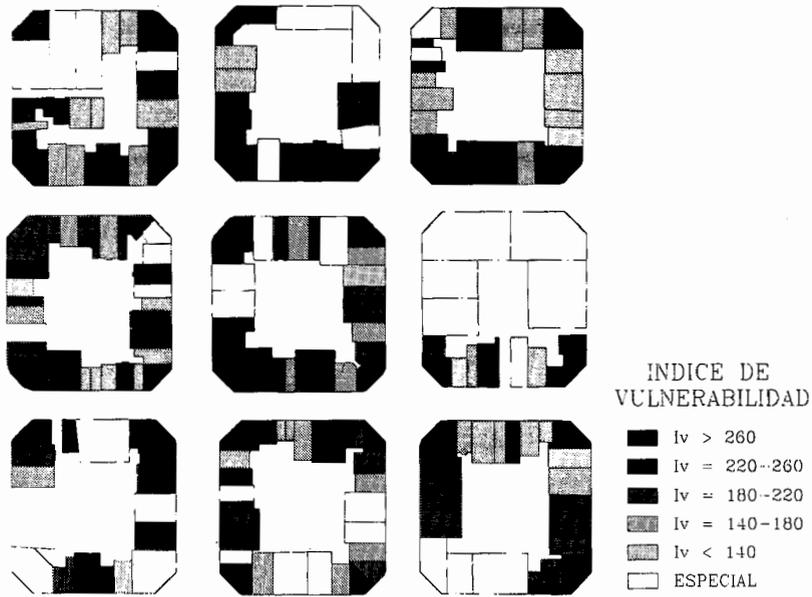


Figura 14. Mapa de vulnerabilidad del sector estudiado

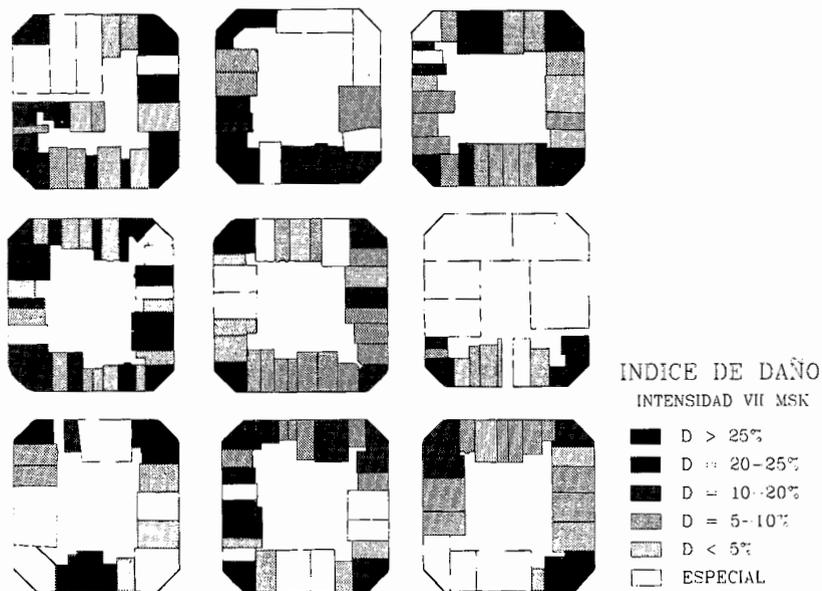


Figura 15. Escenario de daño para un sismo de intensidad VII MSK

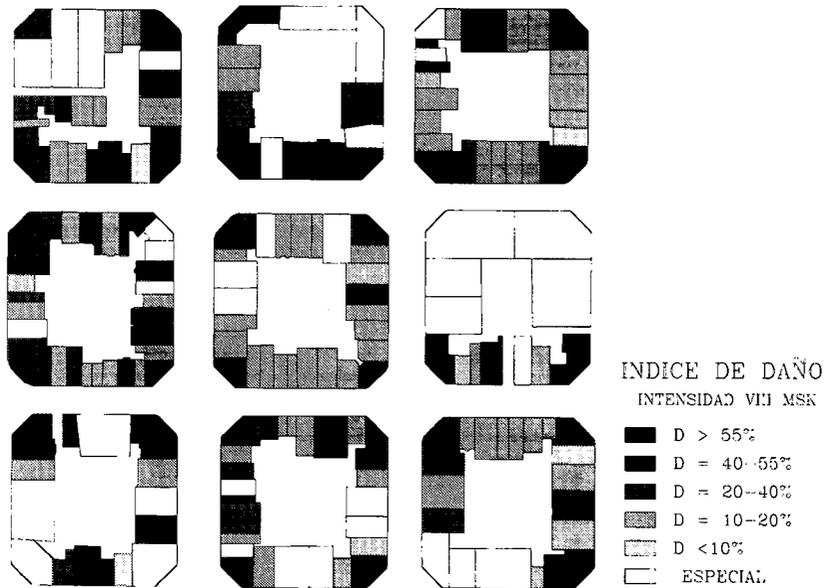


Figura 16. Escenario de daño para un sismo de intensidad VIII MSK

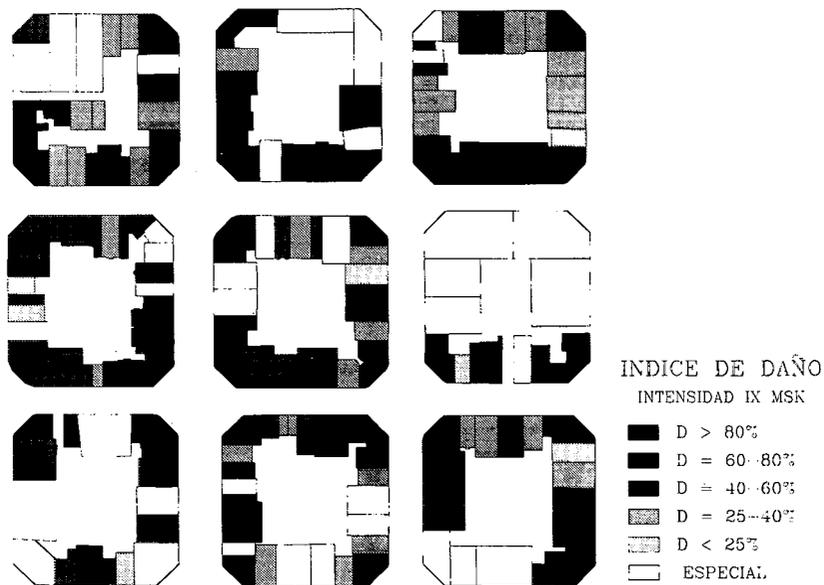


Figura 17. Escenario de daño para un sismo de intensidad IX MSK

En las Figuras 15, 16 y 17 se muestran tres posibles escenarios de daño, asumiendo diferentes intensidades del sismo. Se intentan representar cinco rangos básicos del índice de daño  $D$ , los cuales pueden interpretarse de acuerdo a la escala MSK como: daños ligeros ( $D \leq 20\%$ ), daños moderados ( $20\% < D \leq 40\%$ ), daños graves ( $40\% < D \leq 60\%$ ), destrucción ( $60\% < D \leq 80\%$ ) y colapso

( $D > 80\%$ ). Se observa claramente que el daño es mayor cuanto más grande es el grado de intensidad.

En la Figura 18 se muestra la distribución de frecuencias del índice de vulnerabilidad para la zona de estudio. Se observa que la tendencia del índice de vulnerabilidad es de valores medios a altos, con un promedio de 200. De la misma forma, en las Figuras 19, 20 y 21 se muestran las distribuciones de frecuencias del índice de daño, en las que se observa que a medida que la intensidad aumenta, la distribución del daño es más amplia y el promedio de los datos crece de forma desproporcional.

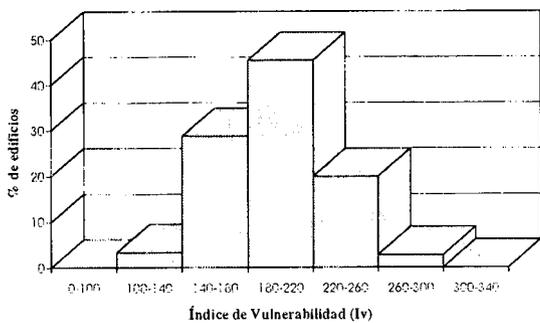


Figura 18. Histograma de frecuencias del índice de vulnerabilidad

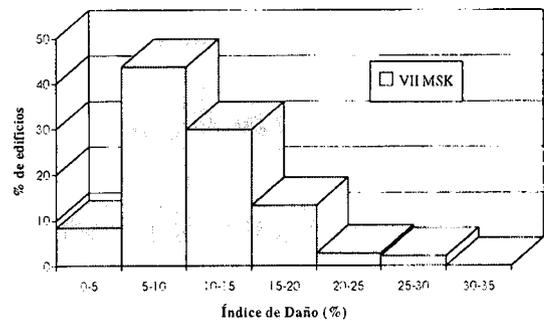


Figura 19. Histograma de frecuencias del índice de daño para I=VII

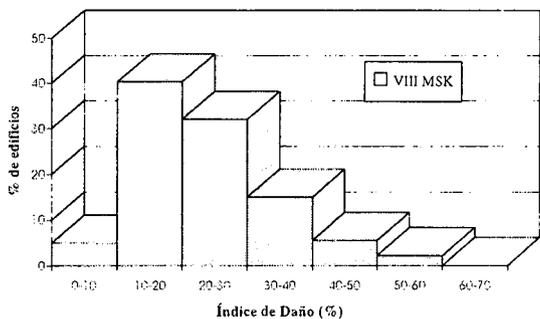


Figura 20. Histograma de frecuencias del índice de daño para I=VIII

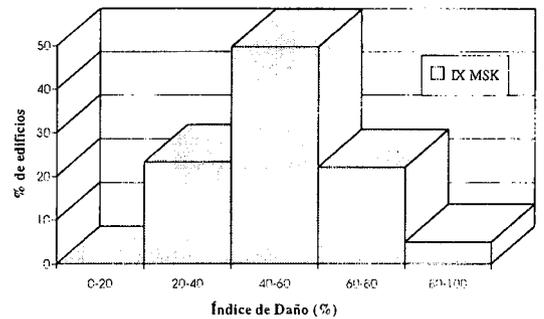


Figura 21. Histograma de frecuencias del índice de daño para I=IX

Para intensidad VII, se observa que la mayoría de los edificios sufren daños entre el 10 y el 20% y un 5% de ellos tendrían un daño entre el 20% y el 30%. Solamente el 8% de los edificios sufriría un daño muy leve o despreciable, es decir, de hasta un 5%. Para intensidad VIII, en cambio, se observan daños ya importantes, la mayoría de ellos entre 20% y 40%, con focos superiores al 40%. Para intensidad IX, el daño es muy grave, pues el 72% de los edificios muestran un daño superior al 40%, con predominancia entre el 50 y el 60%.

Finalmente, en la Figura 22 se muestran los parámetros que constituyen la vulnerabilidad de la muestra, separados por clases  $K_i$ . Esta figura es útil para identificar los parámetros que mayor influencia tienen sobre la vulnerabilidad de los edificios. De esta forma, se observa que los parámetros 3, 5, 6 y 8, correspondientes a la resistencia convencional, diafragmas horizontales, configuración en planta y distancia máxima entre muros, respectivamente, son los más importantes.

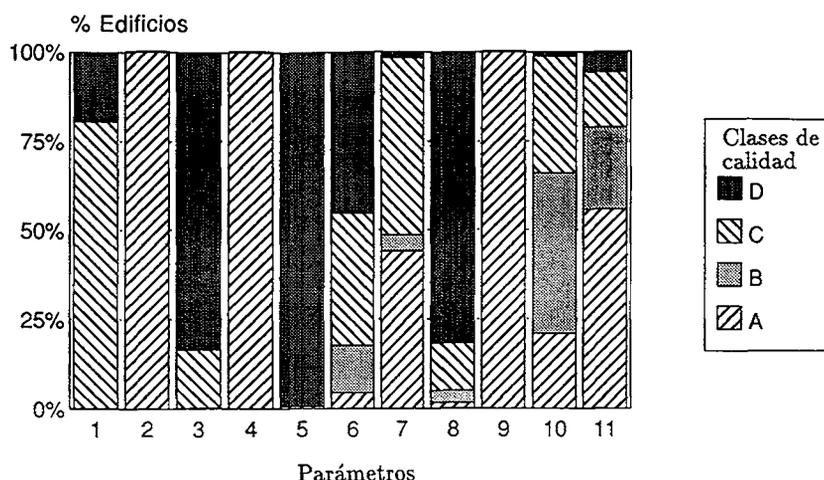


Figura 22. Parámetros que constituyen la vulnerabilidad de la muestra

## CONCLUSIONES

La simulación mediante ordenador del daño en edificios y su estudio probabilista constituyen los primeros trabajos de este tipo que se realizan en España. Los resultados obtenidos son de gran interés puesto que, además de ser capaces de expresar el daño esperado en un edificio debido a un terremoto de determinada intensidad con un cierto nivel de probabilidad, permite observar claramente cómo una intervención sobre las estructuras puede contribuir a la mitigación del riesgo. Por ejemplo, un reforzamiento en las estructuras con índices de vulnerabilidad en un rango determinado, puede hacer disminuir considerablemente su valor, obteniéndose una variación a la baja de la distribución del índice de vulnerabilidad y, por tanto, reduciéndose los niveles de daño o las probabilidades de obtención de rangos de daño altos, para la misma intensidad y para el mismo periodo de retorno asociado. De igual manera, el resultado obtenido puede fácilmente multiplicarse por el coste de la estructura en riesgo y obtener las pérdidas económicas posibles con su respectiva probabilidad. Este resultado puede también ser decisivo a la hora de

tomar decisiones acerca de la conveniencia de una inversión en el reforzamiento de la estructura y acerca del costo de reposición de las mismas.

Para la evaluación del riesgo sísmico específico de una zona se necesita obtener, tanto la distribución del índice de vulnerabilidad de los edificios de la zona como la distribución de intensidades. A partir de estos datos pueden ajustarse modelos probabilistas y comenzarse el proceso de cálculo, ya sea de convolución de las funciones de densidad de probabilidad o mediante operaciones más sencillas, realizando la discretización de las funciones de densidad de las distribuciones mencionadas. Para esta discretización se utilizan como valores de las funciones de densidad de daño condicionada y discretizada, los presentados en las Tablas IV, VII, VII y VIII, según el nivel de la intensidad del terremoto considerado. Esto proporcionará una matriz de probabilidad de daño en tres dimensiones: niveles de daño, rangos de vulnerabilidades e intensidades macrosísmicas. Si se dispone además de una base de información relativa al coste económico de las estructuras en riesgo, podrán obtenerse directamente los resultados completos del estudio de riesgo sísmico para la zona en cuestión.

La simulación por ordenador ha reemplazado parcialmente a la información que debiera obtenerse de los estudios post-terremoto. La simulación de miles de edificios hipotéticos ha sido posible gracias a la relativa sencillez del modelo utilizado para la mampostería no reforzada. Sin embargo, se debe anotar que siempre serán necesarios estudios post-terremoto, tanto para calibrar como para verificar la calibración que se realice en estudios de tipo analítico, como el desarrollado en este estudio. A pesar de que en la simulación se utilizan principios, fundamentos teóricos y modelos matemáticos respaldados por estudios experimentales, no dejan de ser modelos que contienen algunas hipótesis y simplificaciones, cuyos resultados necesitan ser calibrados con la realidad.

Finalmente, se ha demostrado la potencialidad de la metodología al aplicarla en una zona céntrica de la ciudad de Barcelona. Los resultados presentados como escenarios de daño permiten cuantificar el posible nivel de daño que ocasionaría un sismo de determinada intensidad en la zona, así como también, identificar las estructuras más vulnerables y las características estructurales de dichos edificios que hacen elevar su vulnerabilidad, características sobre las que se habría de actuar si se quisiese disminuir el riesgo sísmico de la zona. Con este estudio se dispone ahora de la herramienta necesaria para desarrollar un programa de mitigación del riesgo en la zona estudiada.

## AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este estudio ha sido posible gracias a la colaboración del Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya y en especial de sus directivos, los doctores Antoni Roca y Xavier Goula. El profesor Fructuos Mañá del Colegio de Arquitectos de Cataluña ha aportado información valiosa sobre las características arquitectónicas y estructurales de los edificios del "Ensanche" de Barcelona. Tanto el profesor Duilio Benedetti del Departamento de Estructuras del Politécnico de Milán, como el Prof. Gaetano Zonno del Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico CNR de Milán, han proporcionado gentilmente abundante bibliografía acerca del método del índice de vulnerabilidad. Finalmente se reconoce la colaboración prestada por el personal del Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos y en especial de su director, el Prof. Francisco Vidal.

## REFERENCIAS

1. C. Caicedo, J. A. Canas, A. Barbat, F. Yépez, A. Roca, X. Goula y F. Maña, "Seismic Vulnerability Assessment of Buildings in Barcelona", *Proceedings of the Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, Viena, 1994.
2. F. Yépez, A. H. Barbat y J. A. Canas, *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*, Monografía de Ingeniería Sísmica **IS-12**, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, Barcelona, 1994.
3. GNDT, "Instruzioni per la Compilazione della Scheda di Relivamento Esposizione e Vulnerabilità Sismica Degli Edifici", *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, Regione Emilia Romana, 1986.
4. D. Benedetti, G. Benzoni y M. Parisi, "Seismic Vulnerability and Risk Evaluation for Old Urban Nuclei", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. **16**, pp. 183-201, 1988.
5. X. Goula, C. Olivera, T. Susagna y F. Yépez, "Visita de Reconeixement a la Regió de Berja-Adra (Almería), afectada pels Sismes dels dies 23.12.1993 i 4.1.1994.", *Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Servei Geològic de la Generalitat de Catalunya*, **GS 042 94**, Barcelona, 1994.
6. P. Angeletti, A. Bellina, E. Grandori, A. Moretti y V. Petrini, "Comparison between Vulnerability Assessment and Damage Index, Some Results", *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. **7**, pp. 181-186, Tokyo, 1988.
7. G. Manfredi, S. Mazzolani y A. Masi, "Review of Existing in Experimental Testing of Masonry Structures Subjected to Horizontal Loads", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. **6**, pp. 3557-3562, Madrid, 1992.
8. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, "Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94)", *Boletín Oficial del Estado BOE*, Vol. **33**, pp. 3935-3980, Madrid, Febrero 1995.
9. D. P. Abrams, "Strenght and Behaviour of Unreinforced Masonry Elements", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. **7**, pp. 3475-3480, Madrid, 1992.

10. Y. J. Park, A. H-S. Ang y Y. K. Wen, "Seismic Damage Analysis and Damage-Limiting Design of R. C. Buildings", *Structural Research Series No. 516, Technical Report*, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 1984.
11. A. Hanganu, A. H. Barbat, S. Oller y E. Oñate, *Simulación del daño sísmico en edificios de hormigón armado*, Monografía de Ingeniería Sísmica **IS-4**, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, Barcelona, 1994.
12. A. M. Reinhorn, J. M. Bracci, J. B. Mander y S. K. Kunnath, "Normalized Damage Index for Evaluation of Buildings", *Proceedings of the Seventh ASCE Structures and Pacific Rim Engineering Congress*, 507-516, San Francisco, 1988.
13. C. Meyer, M. Roufaiel y S. G. Arzoumanidis, "Analysis of Damaged Concrete Frames for Cyclic Loads", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. **11**, pp. 207-228, 1983.
14. M. Roufaiel y C. Meyer, "Analytical Modeling of Hysteretic Behaviour of R/C Frames", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. **113** (3), pp. 429-443, 1987.
15. Y. S. Chung, C. Meyer y M. Shinozuka, "Automated Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings", *Technical Report No. NCEER-88-0024*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, 1988.
16. F. Yépez, A. H. Barbat y J. A. Canas, *Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico*, Monografía de Ingeniería Sísmica **IS-14**, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, Barcelona, 1995.
17. J. R. Benjamin y C. A. Cornell, *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.
18. Z. Karian y E. Dudewicz, *Modern Statistical Systems and GPSS Simulation*, Computed Science Press, New York, 1991.