

## EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO EN ZONAS URBANAS

ALEX H. BARBAT\*  
ULISES MENA\*

y  
FABRICIO YEPEZ MOYA\*\*

*\* E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Gran Capitán s/n, Edificio C1, 08034 Barcelona, España  
Tel.: + 34-93-401 6496, Fax: + 34-93-401 6517  
E-mail: barbat@etseccpb.upc.es*

*\*\* Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Nacional  
P.O. Box 17-17-144 Quito, Ecuador, E-mail: fyeppez@uio.satnet.net*

### RESUMEN

En el artículo se desarrolla, dentro de un marco probabilista, un método para la evaluación del riesgo sísmico de los edificios existentes en una zona urbana. El método utiliza un procedimiento de análisis del comportamiento sísmico no lineal de estructuras, métodos de muestreo optimizados y modelos probabilistas, con lo cual permite determinar la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de daño en las estructuras en riesgo, correspondientes a diferentes períodos de exposición. Desde un punto de vista económico, permite evaluar tasas mínimas de seguros de terremotos. El método propuesto se aplica a una zona central de la ciudad de Barcelona, España, en la cual los principales tipos de edificios son los de mampostería no reforzada y los de hormigón armado, porticados o con forjados reticulares. El método ha sido integrado en un Sistema de Información Geográfica con el objeto de desarrollar escenarios de riesgo sísmico.

### PROBABILISTIC EVALUATION OF SEISMIC RISK IN URBAN AREAS

#### SUMMARY

A methodology to evaluate the vulnerability and seismic risk of existing building structures in an urban area developed within a probabilistic scheme. It uses numerical procedures for the analysis of the non-linear seismic behaviour of structures and optimized sampling method and probabilistic models for the description of the obtained results. Occurrence probabilities for different damage levels of the structures in risk, corresponding to a given exposure period are thus obtained. From an economical point of view, annual losses and minimum earthquake insurance taxes are evaluated. The proposed method is applied to the assessment of the seismic risk of a complete urban area, located in the central part of Barcelona, Spain, in which mostly unreinforced masonry buildings and non-ductile reinforced concrete buildings are the most common building types. The method has been implemented in a modular format in a Geographical Information System, with the objective of obtaining seismic risk scenarios.

Recibido: Junio 1997

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las pérdidas debido a un terremoto se deben principalmente a un mal comportamiento sísmico de las estructuras existentes. A pesar de los avances de la investigación en ingeniería sísmica y de la mejora de las normativas sismo-resistentes siguen ocurriendo pérdidas catastróficas, incluso en países donde la investigación en el campo de la ingeniería sísmica es una actividad prioritaria. Es evidente que los nuevos desarrollos en el diseño sismo-resistente sólo pueden aplicarse a estructuras nuevas, las cuales constituyen un porcentaje muy pequeño con respecto a la totalidad de las estructuras existentes en una zona sísmica. Si se tiene en cuenta que la ocurrencia de los fenómenos sísmicos queda fuera del control de la ciencia, la única posibilidad de reducir las pérdidas debidas a terremotos es la mejora del comportamiento sísmico de las estructuras existentes.

El objetivo de los estudios de riesgo sísmico es predecir el daño esperado en las estructuras debido a un sismo específico. Una vez determinado dicho daño, es posible encontrar algunas soluciones para reducir sus efectos. Estas soluciones recaen en el coste de la estructura, el cual debe compararse con las pérdidas esperadas para decidir si su refuerzo es factible<sup>1</sup>. En uno de los estudios recientes acerca de la evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo en estructuras, los métodos disponibles se clasifican en los siguientes cuatro grupos: (a) *directos*, que predicen, de una manera sencilla, el daño causado en una estructura por un sismo; (b) *indirectos*, los cuales determinan primero un índice de vulnerabilidad de la estructura y después evalúa la relación entre la intensidad sísmica y el daño; (c) *convencionales*, que son esencialmente heurísticos, introduciendo un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción del daño y (d) *híbridos*, que combinan elementos de los métodos anteriores con el juicio de expertos. La selección del método a aplicar en los diferentes casos concretos depende de la información disponible, de los objetivos del estudio o de los resultados deseados.

En este artículo se utilizan las siguientes definiciones: 1) las *matrices de probabilidad de daño* expresan en forma discreta la probabilidad condicional  $P[D = j \mid i]$  de obtener un nivel de daño  $j$  debido a un terremoto de tamaño  $i$ ; 2) las *funciones de vulnerabilidad* son relaciones que expresan la vulnerabilidad en forma continua, como función de ciertos parámetros que describen el tamaño del terremoto<sup>6</sup>. Las funciones de fragilidad, matrices de probabilidad de daño y funciones de vulnerabilidad, evaluadas a partir de la observación del daño estructural producido por terremotos pasados, son herramientas fundamentales para los estudios de riesgo sísmico<sup>1,3,5</sup>.

Obviamente, sería preferible aplicar cualquier método utilizando datos de daño observado; desafortunadamente, esto sólo es posible en ciertas regiones de alta sismicidad, en donde los estudios de levantamiento posterremoto son aplicados correctamente. Sin embargo, en los países donde el número de dichos estudios es limitado, las matrices de probabilidad de daño y las funciones de vulnerabilidad se obtienen a partir de la poca información disponible y de la opinión de los expertos locales<sup>7</sup>. Finalmente, en países donde no existe una base de datos de estructuras dañadas, se aplica, en una forma directa<sup>8</sup> o en forma modificada la información obtenida en otros países, utilizando el juicio de expertos<sup>9</sup>. Este último tipo de estudios no son fiables, debido a las diferencias en las características tectónicas, sismológicas,

geotécnicas, estructurales, constructivas y de la situación económica de las diferentes zonas sísmicas del mundo. Algunos autores han utilizado métodos híbridos para evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios<sup>1</sup>, desarrollando curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para estimar la factibilidad de la rehabilitación de los edificios existentes.

El objetivo principal del artículo es el de desarrollar un método para evaluar el riesgo sísmico esperado en una zona urbana completa, utilizando procedimientos de simulación. Para ello, se parte de resultados obtenidos en estudios anteriores, consistiendo específicamente en funciones de vulnerabilidad sísmica<sup>4,6</sup>. Las funciones mencionadas fueron obtenidas mediante simulación y fueron calibradas a partir de daños reales sufridos por edificios de mampostería no reforzada, en la zona de Almería, durante los sismos de 1993-1994.

## MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El método del índice de vulnerabilidad se desarrolló para identificar los diferentes comportamientos de los edificios del mismo tipo estructural localizados en una zona sísmica específica<sup>3</sup>. Es extensamente aplicado en varias zonas sísmicas en Italia y está basado en una gran cantidad de datos de levantamiento de daños. El método realiza una calificación de los edificios mediante un *índice de vulnerabilidad*  $I_v$  que incorpora los parámetros más importantes que controlan el daño causado por la acción sísmica. Estos parámetros son calificados individualmente en una escala numérica y están afectados por pesos  $W_i$ , los cuales tratan de enfatizar la importancia relativa de los parámetros en la vulnerabilidad sísmica de los edificios. La Tabla I muestra una lista de los 11 parámetros considerados en la calificación de los edificios — tanto de mampostería no reforzada como de hormigón armado—, los valores de los coeficientes de calificación,  $K_i$ , que varían desde A (óptimo) hasta D (desfavorable) y los factores de peso  $W_i$  asignados a cada parámetro.

i	Tipo de estructura →	mampostería					hormigón		
		$K_i = A$	$K_i = B$	$K_i = C$	$K_i = D$	$W_i$	$K_i = A$	$K_i = B$	$K_i = C$
1	Parámetros de calificación	0	5	20	45	1.0	0.00	-1.00	-2.00
2	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.0	0.00	-1.00	-2.00
3	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25	0.00	-0.25	-0.50
4	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5	0.25	0.00	-0.25
5	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75	0.00	-0.25	-0.50
6	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1.0	0.00	-0.25	-0.50
7	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5	0.00	-0.25	-0.50
8	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0	0.00	-0.50	-1.50
9	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25	0.00	-0.25	-0.50
10	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0	0.00	-0.25	-0.50
11	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25	0.00	-0.25	-0.50
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0	0.00	-0.50	-1.00

Tabla I. Escala numérica del índice de vulnerabilidad ( $I_v$ )

Para mampostería no reforzada, el índice de vulnerabilidad global de cada edificio se evalúa mediante la fórmula

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

Este índice de vulnerabilidad ha sido normalizado para tomar valores entre 0 y 100. En el caso de edificios de hormigón armado,  $I_v$  se calcula de la siguiente manera<sup>10</sup>:

$$I_c = \sum_{i=1}^{11} K_i \quad (2a)$$

$$I_v = -10.07 \times (I_c - 0.25) \quad \text{if } I_c \geq -6.5 \quad (2b)$$

$$I_v = 67.972 - 1.731 \times (I_c + 6.5) \quad \text{if } I_c < -6.5 \quad (2c)$$

Utilizando las funciones de vulnerabilidad, es posible relacionar  $I_v$  con el índice de daño global  $D$  de los edificios, cuyos valores se expresan como un porcentaje del estado inicial de la estructura.

## COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO

Uno de los objetivos de este estudio fue determinar el riesgo sísmico de las estructuras localizadas en una zona central de la ciudad de Barcelona, España, denominada Eixample. En esta zona, la mayoría de los edificios son de mampostería no reforzada, para los cuales se ha realizado un estudio extensivo en la referencia (4). Sin embargo, existen también dos tipos de edificios de hormigón armado: estructuras porticadas no dúctiles y estructuras con forjados planos. Ambos tipos estructurales, construidos después de 1960, no son adecuados para áreas sísmicas. Además, aunque los edificios fueron aparentemente diseñados considerando en el análisis fuerzas sísmicas equivalentes de acuerdo con las normativas españolas correspondientes, los planos muestran la ausencia de detallamiento sísmico alguno. Por este motivo, en el análisis realizado, tuvieron que utilizarse modelos capaces de describir el comportamiento estructural no dúctil de los edificios de hormigón armado existentes en la zona del Eixample.

### **Análisis dinámico estructural no lineal**

Para el análisis dinámico estructural no lineal de los edificios de hormigón armado se utilizó como base el procedimiento de análisis propuesto por Kunnath *et al.* y el correspondiente programa IDARC<sup>11</sup>. El procedimiento considera las vigas y columnas como elementos a flexión no lineal, incluye el efecto de deformación por cortante y utiliza modelos elastoplásticos que describen el comportamiento estructural mediante diagramas momento-curvatura ( $M - \phi$ ). El modelo toma en cuenta los efectos geométricos no lineales, el acoplamiento de las deformaciones por flexión

con deformaciones producidas por cortante elástico e inelástico, efectos  $P - \delta$ , etc. Finalmente, el procedimiento utiliza el índice de daño de Park, definido para cada miembro estructural por medio de la ecuación

$$D_i = \frac{\phi_m - \phi_y}{\phi_u - \phi_y} + \beta \frac{\int dE}{M_y \phi_u} \quad (3)$$

donde  $D_i$  es el daño local,  $\phi_y$ ,  $\phi_m$  y  $\phi_u$  son la curvatura de fluencia, máxima y última respectivamente,  $M_y$  es el momento de fluencia,  $\int dE$  es la energía histerética acumulada y  $\beta$  es un factor proporcional a la energía disipada. En el método propuesto por Kunnath *et al.*<sup>11</sup> se sustituye en la ecuación (3) el índice de curvatura  $\phi$  por la rotación. Para obtener el índice de daño de un piso,  $D_k$ , el procedimiento utiliza una suma ponderada de los índices de daño locales, siendo los pesos la relación entre la energía absorbida por los miembros y la energía total absorbida por la estructura

$$D_k = \frac{\sum D_i \times E_i}{\sum E_i} \quad (4)$$

En esta ecuación  $D_i$  es el daño local del miembro  $i$  y  $E_i$  es la energía absorbida por el miembro  $i$ . El índice de daño total de la estructura,  $D$ , viene dado por

$$D = \sum_{i=1}^n \left( \frac{n+1-i}{n} \right) D_k \quad (5)$$

donde  $n$  es el número de pisos y  $D_k$  es el índice de daño global de cada piso. El índice de daño global está normalizado como un porcentaje del estado de la estructura no dañada.

Para la modelización de los edificios de hormigón armado de Barcelona ha sido necesario considerar algunos factores importantes cuya repercusión en el comportamiento sísmico del mismo es esencial como, por ejemplo, el fallo de las conexiones viga-pilar debido a un mal detallamiento sísmico. Este problema es típico de edificios diseñados para resistir únicamente cargas gravitacionales. Otro problema que ha sido necesario considerar, es la falta de adherencia entre el refuerzo positivo y la conexión por confinamiento insuficiente. Debido a esto, las armaduras pueden sufrir un deslizamiento gradual, produciéndose el efecto "pullout", con lo cual se puede llegar a un fallo prematuro debido a falta de resistencia por cortante. En estas condiciones, el deterioro de resistencia y la degradación son mayores y el modelo de análisis debe ser capaz de describir este comportamiento<sup>12,13</sup>.

En cuanto a los edificios de hormigón armado con forjados planos, se ha seguido un procedimiento similar al utilizado en el caso de los edificios de hormigón armado porticados, puesto que en el cálculo se consideró parte del forjado como una viga equivalente.

## Evaluación del daño económico

La relación entre la vulnerabilidad sísmica y el riesgo sísmico puede determinarse expresando el índice de daño en términos de pérdidas económicas y/o humanas. La estimación de esta relación es una de las tareas más difíciles en los estudios de riesgo sísmico. Generalmente, el índice de daño económico está definido mediante una relación entre el coste de reparación del daño y el coste de reposición, incluyendo tanto un coste derivado del daño sísmico directo como uno debido al daño indirecto. En este artículo, sólo se consideró el daño físico directo.

En el caso de los edificios de mampostería no reforzada, el índice de daño económico puede ser considerado igual al índice de daño estructural<sup>6</sup>. Al contrario, en los edificios de hormigón armado no es razonable considerar el índice de daño estructural total igual al índice de daño económico, puesto que los elementos no estructurales (arquitectónicos, equipos, instalaciones, etc.), los cuales no son parte del sistema resistente, generalmente generan una parte muy importante en las pérdidas económicas. La distribución típica del coste para las componentes de los edificios de hormigón armado en la zona de estudio, expresado como un porcentaje del coste total, se muestra en la Tabla II. Para

Componentes del edificio	% Coste total
Estructurales	27%
Arquitectónicos	30%
Equipos	28%
Varios	15%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

Tabla II. Distribución típica del coste de los componentes de edificios de hormigón armado en el área de estudio de Barcelona

el índice de daño económico de las estructuras se utilizó el método determinista propuesto por Gunturi<sup>14</sup>, que consiste en establecer funciones de daño por medio de entrevistas con expertos en la evaluación del daño económico. El resultado de la aplicación de dicho método puede verse en la Figura 1, para tres niveles de la calidad de diseño conceptual de los edificios (alto, medio y bajo).

El daño de los componentes arquitectónicos se produce debido a una deformación relativa de piso excesiva o a un nivel de aceleración de piso muy grande. En esta categoría de componentes se incluyen paredes no estructurales, paredes de separación interior y exterior, ventanas, material de recubrimiento, etc. A partir de estudios experimentales y posterremotos, Hasselman *et al.*<sup>15</sup> dan una recopilación de promedios de índices de daño económico para diferentes valores de deformación relativa de piso, de acuerdo con la calidad de materiales utilizados para los componentes, tal como puede verse en la Figura 2.

Hay una escasa información acerca de los datos de daño real o experimental para equipos e instalaciones. En esta categoría se incluyen componentes mecánicos, sistemas de bombeo, generadores, tanques, componentes eléctricos, sistemas de calefacción y aire acondicionado, sistemas de seguridad, sistemas de abastecimiento de agua y gas, sistemas de desagüe, etc. En este artículo, se aplican dos tipos de relaciones empíricas para evaluar el daño económico de las instalaciones: la primera expresa el valor del

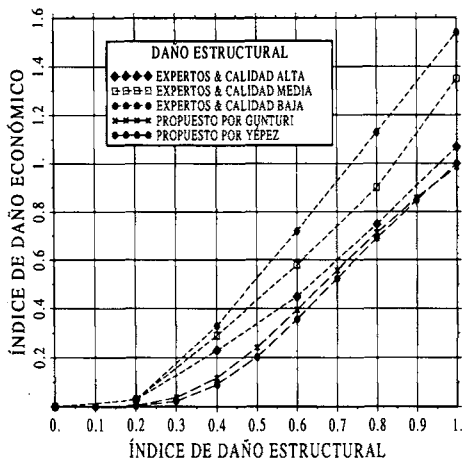


Figura 1. Relaciones entre el índice del daño estructural y el índice de daño económico<sup>6,14</sup>

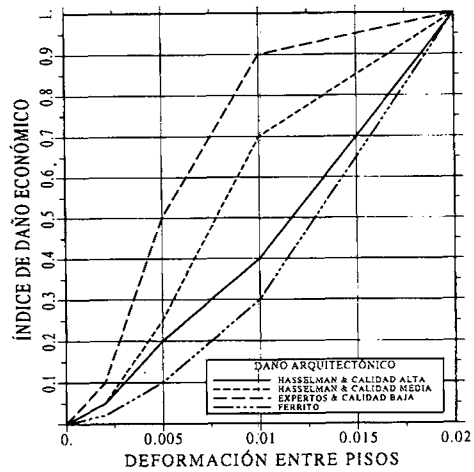


Figura 2. Relaciones entre la deformación entre pisos y el índice de daño económico para las componentes arquitectónicas<sup>15</sup>

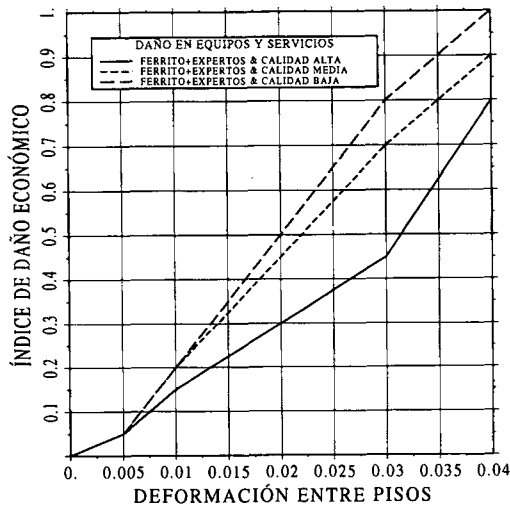


Figura 3. Relación entre la deformación entre pisos y el índice de daño económico promedio para equipos<sup>14</sup>

daño promedio propuesto por Ferrito<sup>16</sup> y por los expertos entrevistados por Gunturi<sup>14</sup>, utilizando la deformación relativa de piso como un parámetro de daño y variando las funciones con la calidad del equipo (Figura 3); la segunda es una relación promedio simple, obtenida por los mismos autores de las referencias (14) y (16), pero usando la aceleración máxima del piso como un parámetro de daño y los resultados pueden ser vistos en la Tabla III. En todos los casos, el criterio aplicado fue el más desfavorable,

de acuerdo al parámetro de daño físico obtenido de la respuesta máxima del edificio considerado.

Aceleraciones de piso máxima (g)	0.0	0.8	1.0	1.20	1.30
Índice de daño económico	0.0	0.6	0.8	0.9	1.0

Tabla III. Valores del índice de daño económico promedio para el equipo, utilizando diferentes aceleraciones de piso máximas

### Índice de daño económico total del edificio

Para cada componente estructural de los edificios de hormigón armado, se puede obtener un índice de daño económico partiendo del índice de daño estructural calculado mediante un análisis estructural no lineal. Por lo tanto, es posible evaluar un índice de daño económico para cada piso  $D_{ec,k}$  utilizando la ecuación

$$D_{ec,k} = \frac{\sum D_{ec,i} \times w_i}{\sum w_i} \quad (6)$$

donde  $D_{ec,i}$  es el índice de daño económico estructural para cada elemento del nivel  $k$  y  $w_i$  representa el coste de reposición de cada elemento, el cual es diferente para las vigas y los pilares. Por lo tanto, el índice de daño económico de la estructura entera puede ser obtenido como promedio de todos los índices correspondientes a los pisos estructurales.

En los análisis no lineales también pueden evaluarse las deformaciones y aceleraciones máximas en cada piso, así como el índice de daño económico para los elementos arquitectónicos y equipos del piso. Un promedio de estos valores permite determinar el índice de daño no estructural de los edificios. Finalmente, el índice de daño económico total de los edificios puede obtenerse como un promedio ponderado de los índices de daño económico estructural y no estructural, utilizando los porcentajes de la Tabla II como factores de peso. A nivel de piso, es necesario considerar la posibilidad de fallo debido a un mecanismo de piso blando, el cual podría producir un colapso del piso o inclusive del edificio. En este artículo, si en el análisis no lineal de los edificios se formaron articulaciones plásticas en todas las columnas de uno o varios niveles y/o el índice de daño económico del piso fue igual o superior a 1, el edificio se consideró irreparable y el índice de daño económico total se fijó igual a 1.

## TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS EDIFICIOS DE UNA ZONA URBANA

### Muestreo

En la simulación que se realizó se tomaron en cuenta todas las propiedades de los edificios existentes en la zona de estudio. Dichas propiedades incluyen la forma estructural, las dimensiones en elevación y planta, el tamaño de los elementos estructurales, las propiedades de los materiales, la cantidad y distribución del refuerzo, etc. Definiendo los límites y las distribuciones de probabilidad correspondientes a



estas propiedades, fue simulado aleatoriamente un número considerable de edificios, considerando todas las posibles combinaciones de las propiedades estructurales. Una vez realizada esta simulación, se calcularon los índices de vulnerabilidad de todos los edificios generados y posteriormente se les aplicaron diferentes niveles de acciones sísmicas esperadas en la región. El principal resultado del proceso de cálculo ha consistido en índices de daño correspondientes a cada edificio y se efectuó un estudio estadístico de los mismos. A partir de los histogramas de los resultados se ajustaron modelos probabilistas. Obviamente, en un análisis estadístico de este tipo es necesario el uso de un contraste de significancia, tal como la prueba  $\chi^2$  o la de Kolmogorov-Smirnov. Para aplicar tales pruebas, se debe definir un nivel de significancia cuyos valores típicos están en el rango de 0.01 y 0.05. Sin embargo, dependiendo del análisis que se esté realizando, también se podría considerar adecuado un valor igual a 0.10. El proceso de análisis aquí descrito es típico de simulación por Monte Carlo.

Los límites superior e inferior de las propiedades estructurales y las relaciones entre ellos se obtuvieron a partir de un estudio muy detallado de una muestra de edificios existentes en el área urbana considerada, utilizando los planos estructurales disponibles y realizando levantamientos. Se ajustó para los datos una función de distribución de probabilidad para cada propiedad estructural, considerada como variable aleatoria. Los resultados obtenidos han sido corroborados y completados con resultados publicados en otros estudios. Por ejemplo, Mirza y MacGregor<sup>16</sup>, Udoeyo y Ugbem<sup>18</sup> y otros establecieron que la dispersión promedio de las dimensiones de los elementos de hormigón armado tiene una distribución normal. Otros estudios han mostrado que los valores de la resistencia a compresión y del módulo elástico para el hormigón pueden ser modelizados utilizando una distribución normal con un coeficiente de variación entre 15-20%. Mirza y MacGregor encontraron que la resistencia a fluencia del refuerzo tiene una distribución log-normal con 11% de variación y que el módulo de Young para el acero puede considerarse constante.

Debido al gran número de variables aleatorias consideradas en los correspondientes análisis de ordenador que se tuvieron que realizar, se aplicó el método de muestreo "Updated Latin Hypercube" propuesto por Florian<sup>19</sup> para reducir el número de edificios que se debe generar aleatoriamente y someter a un análisis no lineal.

### **Definición de la acción sísmica**

Para poder realizar análisis no lineales, la acción sísmica se definió por medio de acelerogramas. La falta de registros sísmicos reales en el área y el uso de un esquema probabilista requirió la generación de registros sintéticos utilizando procesos estocásticos. De esta manera se generaron acelerogramas compatibles con el espectro de diseño de la norma sismorresistente española<sup>20</sup>. En el mencionado proceso de generación de acelerogramas artificiales, se aplicó la función de modulación propuesta en la referencia (21). Dicha función, normalizada por la duración del movimiento severo del suelo, utiliza el concepto de energía normalizada acumulada esperada, la cual es una función de la variación en el tiempo de la aceleración. Utilizando relaciones que definen la duración efectiva, la intensidad de Arias, la aceleración máxima, etc., se determinó la función de modulación y se generaron acelerogramas sintéticos a nivel de la roca para la zona de estudio.

Para tomar en cuenta los efectos locales, los acelerogramas generados fueron filtrados en el dominio de la frecuencia, utilizando la función de transferencia disponible para la caracterización del subsuelo del área estudiada, tal como se propone en la referencia (22). Se eligieron los niveles de intensidad correspondientes a la escala Europea MSK, utilizada también en la normativa española<sup>20</sup>, como parámetros básicos en la simulación. Se generó una familia de 10 acelerogramas sintéticos para cada aceleración relacionada a las intensidades consideradas (VI-IX MSK). En el estudio de peligrosidad sísmica de la referencia (23) se habían propuesto diferentes mapas de intensidad iso-probables para Cataluña. De estos resultados se obtuvo, para Barcelona, la probabilidad esperada correspondiente a los diferentes niveles de intensidad sísmica. Los resultados se muestran en la curva de peligrosidad sísmica de la Figura 4.

### Resultados de la simulación

La escala del índice de vulnerabilidad (0-100) se dividió en 10 rangos. En el caso de edificios de mampostería no reforzada, se generaron alrededor de 2000 edificios hipotéticos y se sometieron a terremotos simulados de intensidad VI, VII, VIII y IX en la escala MSK. El principal resultado de estos cálculos fueron los índices de daño de cada edificio. Como también se evaluaron los correspondientes índices de vulnerabilidad, se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad sísmica de la Figura 5. Se menciona que en este proceso de análisis, la curva correspondiente al grado de intensidad VII, ha sido previamente calibrada a partir de los daños sufridos por los edificios en la región de Almería, España, durante los terremotos de 1993-1994<sup>4</sup>.

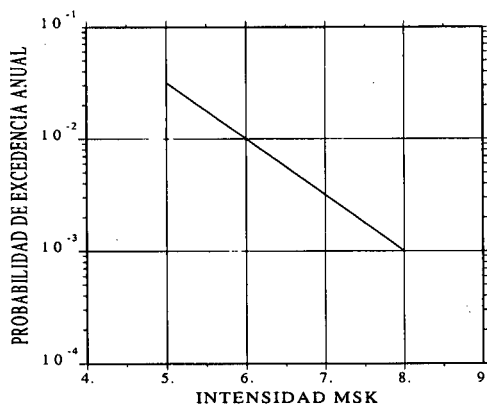


Figura 4. Curva de riesgo sísmico para Barcelona<sup>23</sup>

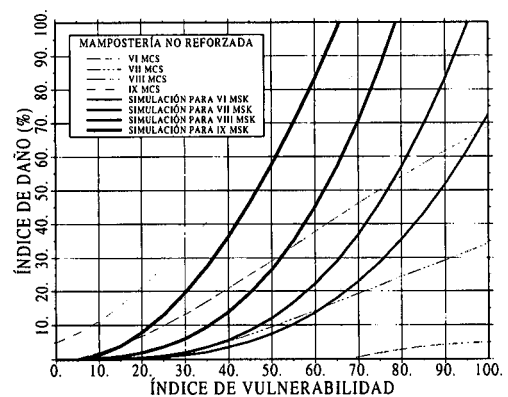


Figura 5. Funciones de vulnerabilidad para edificios de mampostería no reforzada<sup>4</sup>

Para edificios de hormigón armado se generaron 10 edificios 3D aleatorios para cada índice de vulnerabilidad. Cada edificio se discretizó en pórticos 2D exterior e interior en las direcciones principales. Se obtuvo para cada pórtico la respuesta sísmica no lineal utilizando la familia de 10 acelerogramas artificiales, una familia para cada nivel de intensidad esperada en el área. Por lo tanto, el trabajo de cálculo fue equivalente

al análisis estructural no lineal de más de 30,000 pórticos sometidos a cargas sísmicas, para los cuales se obtuvo el índice de daño.

Los resultados de la simulación para los edificios de hormigón armado estudiados se muestran en las Figuras 6 y 7, y consisten en las funciones de vulnerabilidad para los dos tipos estructurales bajo consideración. En el caso de los edificios de hormigón armado porticados, los valores para la intensidad VI MSK no se incluyen en la figura, puesto que los índices de daño económico fueron inferiores al 5% para todos los  $I_v$ . En el caso de los edificios de hormigón armado con forjados planos, los valores para la intensidad IX MSK no se muestran, debido al hecho de que todas las estructuras colapsarían. La vulnerabilidad alta y el índice de daño se pueden explicar tanto por el tipo inadecuado de estructuración adoptado durante el proceso del diseño conceptual como por el detallamiento estructural incorrecto durante el proceso de diseño.

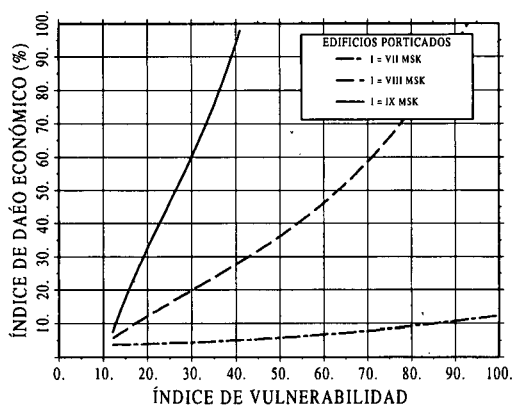


Figura 6. Funciones de vulnerabilidad para edificios porticados de hormigón armado

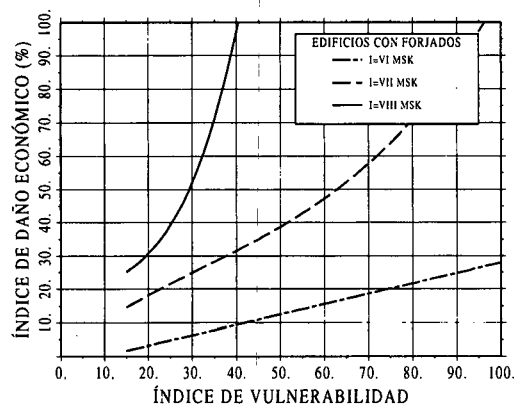


Figura 7. Funciones de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado con forjados planos

## APLICACIÓN AL EIXAMPLE, BARCELONA

El riesgo sísmico específico representa la probabilidad de que las estructuras en riesgo incurran dentro de uno o más niveles de daño debido a un sismo, durante un tiempo de exposición dado. El riesgo sísmico está definido como el grado de pérdidas esperadas sufridas por las estructuras durante un tiempo de exposición. Consecuentemente, el riesgo sísmico específico depende de la vulnerabilidad de las estructuras en riesgo y de la peligrosidad sísmica, mientras que el riesgo sísmico depende del riesgo específico y del valor económico de las estructuras. El objetivo de esta sección es el de evaluar el riesgo sísmico de un distrito histórico de Barcelona, España, llamado Eixample. Esta zona contiene manzanas casi simétricas con dimensiones de  $113 \times 113$  m y cubre una superficie de 750 hectáreas de la ciudad. El número promedio de niveles para la zona estudiada es de 6, la altura promedio es de 19 m y la superficie promedio de las plantas de los edificios es de  $281 \text{ m}^2$ .

La mayoría de los edificios existentes son de mampostería no reforzada, están diseñados solamente a cargas verticales y han sido construidos entre 1860 y 1940. El

resto de los edificios son de hormigón armado, construidos después de la demolición de algunos edificios antiguos de mampostería, la mayoría de ellos durante los años 1960-1970. Las estructuras de hormigón armado del Eixample son porticadas con vigas planas y pórticos con forjados planos. En su cálculo se tomaron en cuenta fuerzas sísmicas horizontales, de acuerdo a los requerimientos del código de ese momento.

### Resultados para el área de prueba

Se seleccionó, en forma aleatoria, una muestra de edificios del área del Eixample y se le aplicó el método para la evaluación del riesgo sísmico. El procedimiento para realizar el estudio del área de prueba, se aplicó en los siguientes pasos:

1. Recopilación de la información necesaria. De un mapa digital del área en estudio se obtuvo la información siguiente: área en planta, altura, número de niveles, altimetría y dirección postal de los edificios. De los planos estructurales, que se encuentran en los archivos de la ciudad, se obtuvieron las características estructurales de los edificios.
2. Utilizando estos datos, se calcularon los parámetros requeridos por el método del índice de vulnerabilidad. Esta información se verificó y completó mediante inspección de los edificios. A partir de estos parámetros se calculó el índice de vulnerabilidad de todos los edificios de la zona.
3. Los edificios se organizaron de una manera aleatoria, en manzanas similares a las reales.
4. Se determinó el índice de daño probable para cada nivel de sismo considerado, utilizando las funciones de vulnerabilidad sintéticas obtenidas previamente. Estas funciones proporcionan un valor de daño promedio de una manera determinista. Por lo tanto, la probabilidad asociada a los escenarios de daño deriva de la probabilidad asociada a los estudios de peligrosidad sísmica como una probabilidad anual de excedencia o un período de retorno.
5. El método se implementó en un Sistema de Información Geográfica (GIS), para realizar el manejo de los datos, los cálculos necesarios y la representación gráfica de los resultados.

Aplicando el método del índice de vulnerabilidad, se puede establecer una expresión probabilista para la evaluación del riesgo sísmico específico, tal como puede verse en la referencia (24)

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{v\max}} \int_0^{I_{\max}} f(d | I_v, I) f(I_v) f(I) dI dI_v dd \quad (7)$$

$$S = F(d_{\max}) \quad (8)$$

donde  $F(\bar{d})$  es el modelo probabilista ajustado a los datos, representado por una función de distribución acumulada del daño para  $d = \bar{d}$ ,  $f(d|I_v, I)$  es la función de densidad condicional del daño, definida sobre el índice de vulnerabilidad  $I_v$  y la intensidad  $I$ , mientras que  $f(I_v)$  y  $f(I)$  son las funciones de densidad de  $I_v$  e  $I$ . El riesgo sísmico específico  $S$  está expresado por el valor máximo de la función de distribución acumulada

de la ecuación (8). Posteriormente, discretizando la ecuación (7) para rangos específicos de  $\Delta I$  y  $\Delta I_v$ , es posible obtener la probabilidad condicional de daño  $P[d | \Delta I_v, \Delta I]$ , generalmente denominada matriz de probabilidad de daño. Además, incluyendo el índice de vulnerabilidad  $I_v$  como un parámetro, se obtiene en la siguiente matriz tridimensional:

$$P[d_i < d < d_{i+1}] = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m P[d_i < d < d_{i+1} | I_{v_j} < I_v < I_{v_{j+1}}, I_k < I < I_{k+1}] \times P[I_{v_j} < I_v < I_{v_{j+1}}] \times P[I_k < I < I_{k+1}] \tag{9}$$

donde  $P[d_i < d < d_{i+1}]$  es la probabilidad de que un nivel de daño se encuentra dentro del intervalo  $d_i$  y  $d_{i+1}$ ;  $m$  y  $n$  son los números de los incrementos de  $\Delta I_v$  y  $\Delta I$  considerados. Por lo tanto, usando la ecuación (9), el riesgo específico puede ser expresado como

$$S = \sum_i P[d_i < d < d_{i+1}] \tag{10}$$

Puesto que es posible obtener modelos probabilistas para los histogramas de frecuencias de los índices de vulnerabilidad normalizados de los edificios del Eixample, discretizando estos modelos se obtienen también los valores  $P[I_{v_j} < I_v < I_{v_{j+1}}]$ .

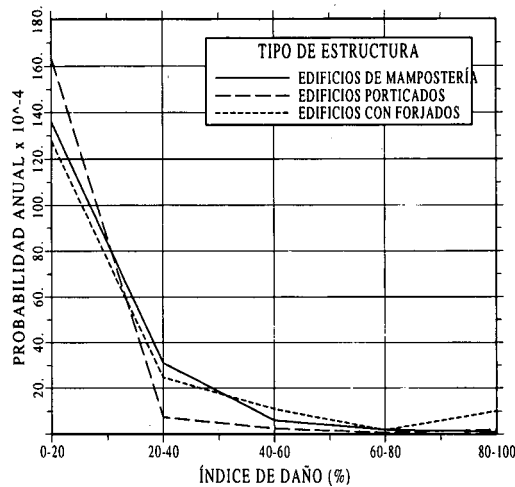


Figura 8. Curvas de riesgo sísmico para el área del Eixample, para diferentes tipos y rangos de daño estructural

Aplicando la ecuación (9) con toda esta información, se obtuvo la probabilidad anual esperada de pérdidas, para cada tipo de estructura estudiada, utilizando los rangos de daño, que se se muestran en la Figura 8. Para realizar un análisis comparativo, la ecuación (9) se evaluó sin la componente de distribución del índice de vulnerabilidad, para obtener las curvas de riesgo sísmico correspondientes a los dos tipos de estructuras de hormigón armado considerados y para los diferentes rangos de

índice de vulnerabilidad normalizados. Estos resultados se muestran en las Figuras 9 y 10, en las cuales se incluyeron también los resultados de la Figura 8 al calcularse la curva para la región completa.

Se puede observar que la probabilidad anual de los niveles de daño altos se incrementa de la misma manera que se incrementa el índice de vulnerabilidad y viceversa. Los edificios de hormigón armado porticados muestran un menor riesgo que los otros. Los edificios que sufrirían mayores pérdidas durante un sismo son los estructurados con forjados planos.

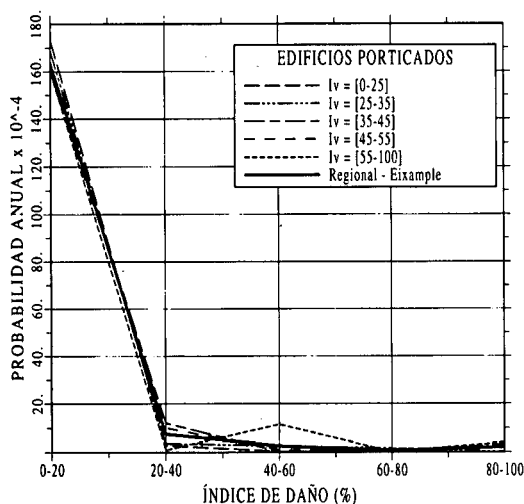


Figura 9. Curvas de riesgo sísmico para edificios de hormigón armado porticados existentes en el Eixample, por rangos de índices de vulnerabilidad e índices de daño

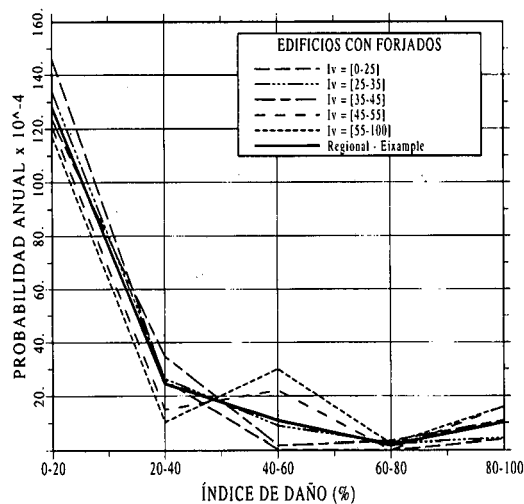


Figura 10. Curvas de riesgo sísmico para edificios de hormigón armado con forjados planos existentes en el Eixample, por rangos de índices de vulnerabilidad e índices de daño

Cuando se tienen que evaluar las pérdidas económicas, es útil determinar la pérdida promedio anual. Esto se puede realizar aplicando la ecuación

$$RISK = \sum_i P[d_i < d < d_{i+1}] \times C_i \quad (11)$$

donde  $C_i$  es el factor de coste para cada nivel de daño  $i$ , expresado como un porcentaje del coste total del edificio. Puesto que en el estudio se utilizó directamente el índice de daño económico, se supone que los valores de  $C_i$  serán los valores promedio de cada intervalo del índice de vulnerabilidad. Por lo tanto, aplicando la ecuación (11), la pérdida regional promedio anual sufrida por los edificios del Eixample es la siguiente:

- Para edificios de mampostería no reforzada: 0.26%.
- Para edificios de hormigón armado porticados: 0.22%.
- Para edificios de hormigón armado con forjados planos: 0.37%.

Estos valores pueden multiplicarse directamente por el coste de los edificios, para obtener el promedio anual de las pérdidas económicas, esto es, el riesgo sísmico total. Las pérdidas anuales pueden considerarse como una tasa mínima de seguro contra terremotos. A pesar de la vulnerabilidad alta de las estructuras existentes en el área estudiada, el riesgo regional para el Eixample no es tan alto, debido a la peligrosidad sísmica moderada de la zona. Esto lleva a valores de riesgo bajos en comparación con los obtenidos en otras regiones de Europa, con una sismicidad mayor<sup>6</sup>.

### Resultados para el distrito completo

Se realizó una simulación preliminar de un mapa de vulnerabilidad y de escenarios de daño para el distrito completo del Eixample, utilizando el sistema de información geográfica ARC/INFO. Recientemente, el uso de los sistemas de información geográfica creció de una manera importante, por su capacidad de manejo de bases de datos muy grandes, junto con su capacidad de tratamiento de datos geográficos. Esto hizo posible procesar la información disponible en el Ayuntamiento de la ciudad de Barcelona y relacionarla con los resultados obtenidos por medio de cálculos. Cuatro de los parámetros del índice de vulnerabilidad de la Tabla I se pueden obtener directamente utilizando la información disponible en la base de datos proporcionada por el Ayuntamiento de Barcelona. Otros cuatro parámetros se obtuvieron a partir de la información proporcionada por estudios anteriores o se pudieron deducir a partir de la información disponible. El resto de los parámetros se obtuvo mediante generación aleatoria. Los cuatro parámetros necesarios en el cálculo del índice de vulnerabilidad, que se obtuvieron de la base de datos del Ayuntamiento son: resistencia convencional (3), posición de los edificios y de la cimentación (4), forma en planta (6) y forma en elevación (7) (ver Tabla I). Esta información se encuentra en un formato digital, en archivos de AUTOCAD. El parámetro de la distancia máxima entre muros (8), requerido en la evaluación del índice de vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada, se obtuvo utilizando funciones deducidas a partir del análisis de una muestra de edificios del área de estudio. Un grupo de parámetros puede ser obtenido relacionándolo con la edad de los edificios, la cual es disponible para toda la ciudad. Este es el caso del sistema resistente (1), de la calidad del sistema resistente (2) y del estado de preservación (11). Finalmente, el sistema de forjados (5), tipo de azotea (9) y los elementos no estructurales (10) se simularon utilizando estadísticas obtenidas de la inspección de las estructuras incluidas en la muestra.

Generalmente, los edificios estudiados en el distrito del Eixample tienen una forma regular desde el punto de vista de su geometría, por lo que el cálculo de los parámetros fue relativamente sencillo. El uso de ARC/INFO hizo posible obtener y procesar los datos necesarios para la evaluación del índice de vulnerabilidad. Una vez que el índice de vulnerabilidad se evaluó, se aplicaron las funciones de vulnerabilidad obtenidas previamente para los diferentes tipos de estructuras para obtener los escenarios de daño.

Los resultados finales obtenidos para el área estudiada fueron representados gráficamente en forma de mapas. En la Figura 11, se muestra el índice de vulnerabilidad para cada edificio del distrito del Eixample con diferentes rangos de valores: ( $I_v \leq 10\%$ ), ( $11\% < I_v \leq 20\%$ ), ( $21\% < I_v \leq 35\%$ ), ( $36\% < I_v \leq 50\%$ ), ( $51\% < I_v \leq 65\%$ ),

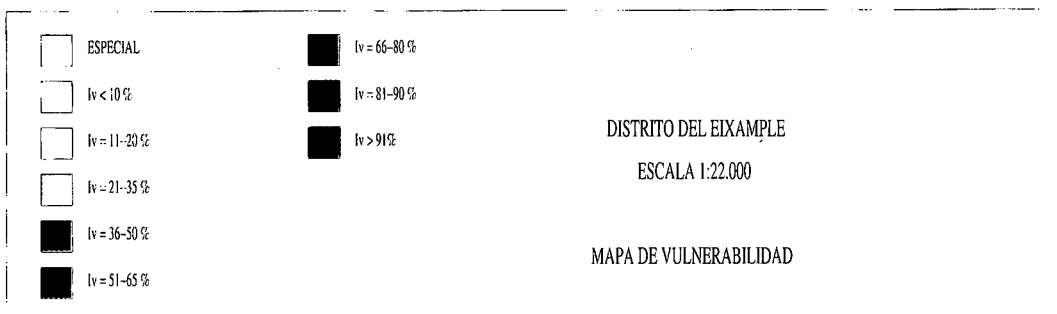
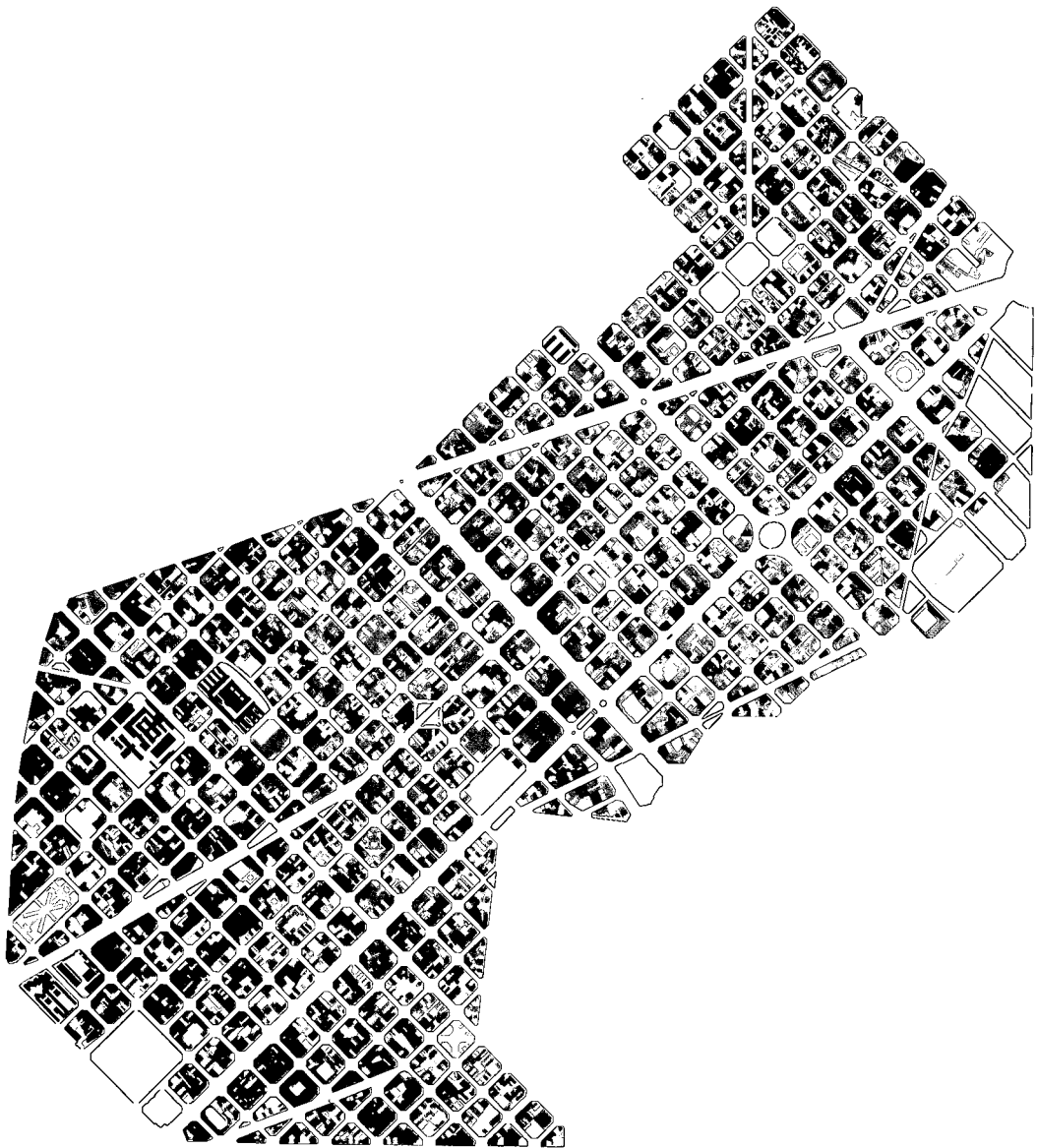


Figura 11. Mapa de vulnerabilidad para el distrito del Eixample



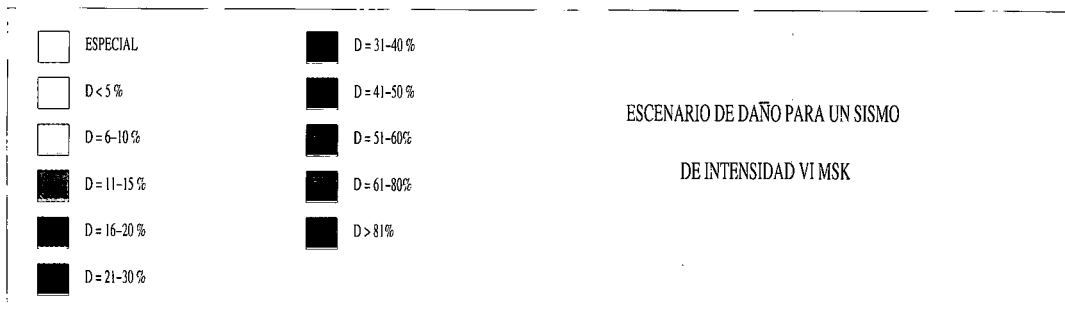


Figura 12. Escenario de daño para el distrito del Eixample para un sismo de intensidad de VI MSK

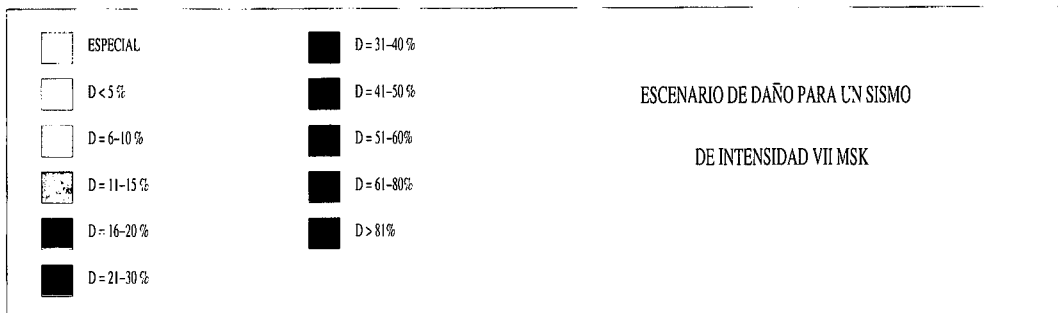


Figura 13. Escenario de daño para el disitrito del Eixample para un sismo de intensidad de VII MSK

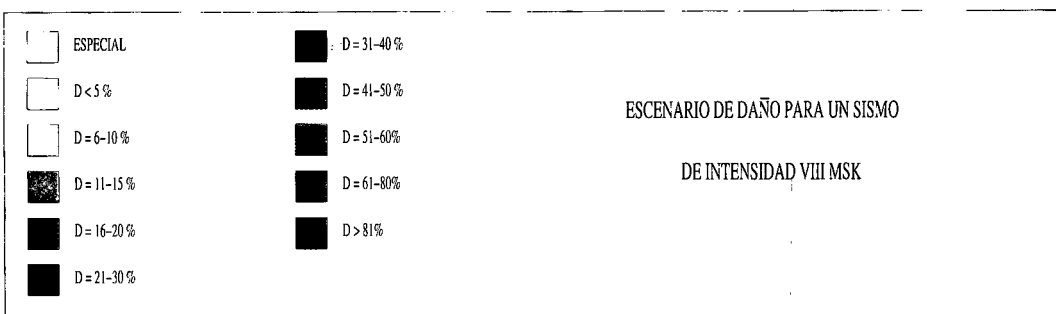
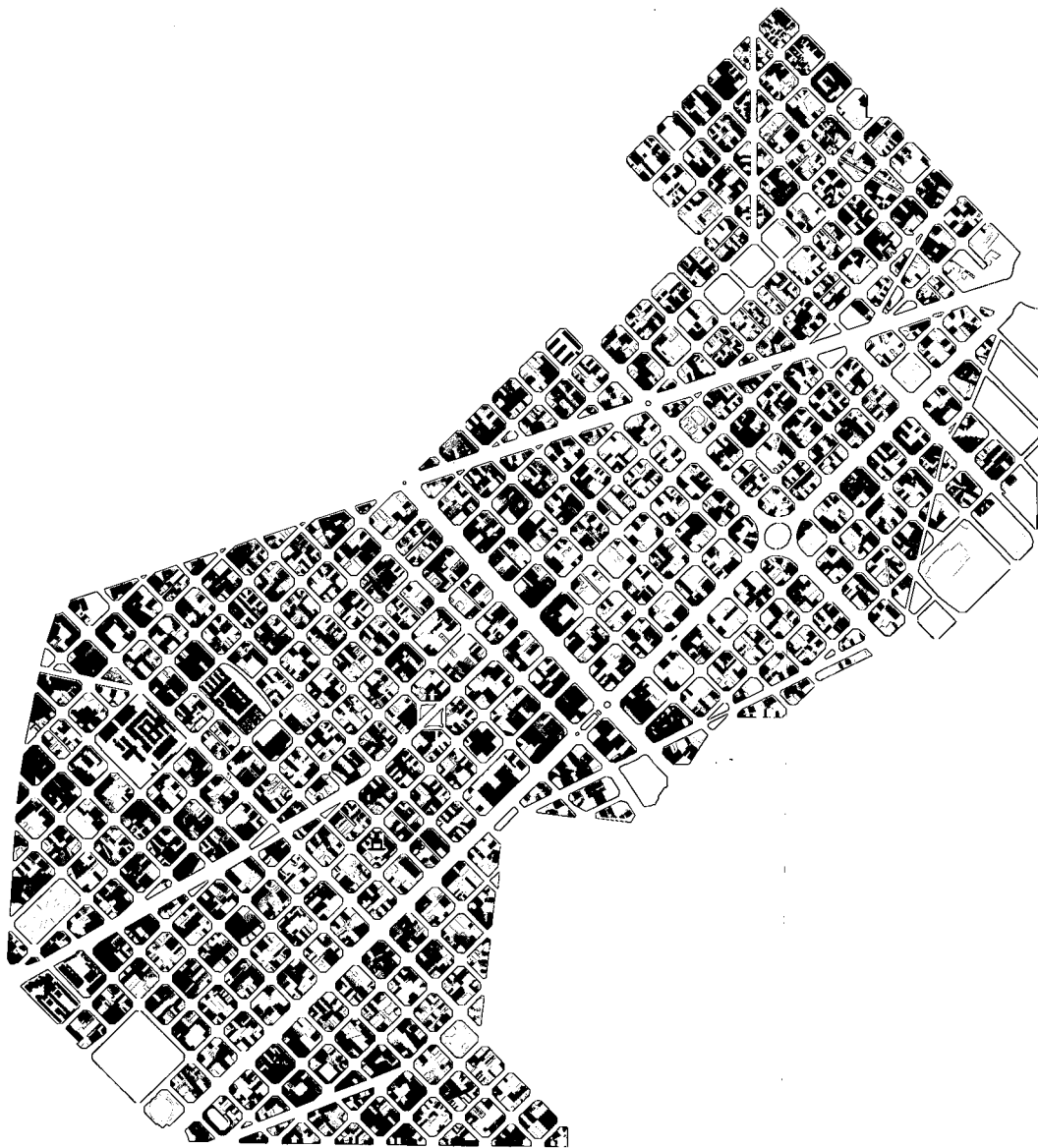


Figura 14. Escenario de daño para el distrito del Eixample para un sismo de intensidad de VIII MSK

( $66\% < I_v \leq 80\%$ ), ( $81\% < I_v \leq 90\%$ ) y ( $I_v > 91\%$ ). La importancia de este mapa dentro del marco de la escala definida es que permite identificar los edificios con mayor vulnerabilidad. Además, se puede observar que el 24% de los edificios tienen valores de vulnerabilidad altos o muy altos ( $I_v > 50\%$ ).

Las Figuras 12, 13 y 14 muestran posibles escenarios de daño para tres diferentes intensidades de sismo. En estas figuras, se identifican 10 rangos de índices de daño medio  $D$ : ( $D \leq 5\%$ ), ( $6\% < D \leq 10\%$ ), ( $11\% < D \leq 15\%$ ), ( $16\% < D \leq 20\%$ ), ( $21\% < D \leq 30\%$ ), ( $31\% < D \leq 40\%$ ), ( $41\% < D \leq 50\%$ ), ( $51\% < D \leq 60\%$ ), ( $61\% < D \leq 80\%$ ) y ( $D > 81\%$ ). Para un nivel de intensidad VII en la escala MSK, la mayoría de los edificios tendrían daños menores del 20%, mientras que el 9% tendrían un índice de daño entre un 20% y 30%. Únicamente el 3% de los edificios tendrían daños serios (mayores del 40%). Para intensidad de VIII en la escala MSK, el daño se incrementaría entre un 20% y 40% y, en algunos casos, excedería un 50%.

## CONCLUSIONES

El artículo presenta un método completo y general para la obtención sintética de escenarios de riesgo sísmico. El método es especialmente útil en el caso de zonas sísmicas de baja sismicidad, puesto que permite evitar la necesidad de hacer uso de información obtenida en otras áreas sísmicas. Además, la utilización del método del índice de vulnerabilidad hace posible discriminar entre los diferentes comportamientos de estructuras de un mismo tipo; este es un aspecto importante y útil, generalmente no permitido por otros métodos de estudio del riesgo sísmico. En la simulación se utilizó un modelo no lineal para describir el comportamiento de las estructuras sin detallamiento sísmico existentes en la zona urbana estudiada (el distrito del Eixample de Barcelona), tales como edificios de hormigón armado porticados o con forjados planos. Otra diferencia con respecto a otros métodos de evaluación existentes, en los cuales solo se analizan estructuras representativas, es que el uso de procedimientos de simulación, los cuales incluyen en el análisis todas las características de los edificios y de la acción sísmica de manera aleatoria, permite evaluar también los resultados del análisis de una manera más eficiente y en forma probabilista.

El método es una alternativa eficiente para realizar estudios de riesgo sísmico en regiones con sismicidad moderada, donde los datos de daño real son limitados o inclusive no disponibles. Su efectividad ha sido demostrada simulando el daño medio, la vulnerabilidad y los escenarios de riesgo sísmico en el distrito del Eixample. La evaluación de las pérdidas anuales probables proporciona otra información útil que puede utilizarse para desarrollar soluciones de mitigación del riesgo sísmico en la zona mencionada.

## AGRADECIMIENTO

El trabajo fue parcialmente financiado por la Comisión de la Comunidad Europea a través del programa ENVIRONMENT & CLIMATE, proyecto ENV4-CT96-0279 SERGISAI.

## REFERENCIAS

- 1 A. Kappos, K. Pitilakis, K. Stylianidis y K. Morfidis, "Cost-benefit analysis for the seismic rehabilitation of buildings in Thessaloniki, based on a hybrid method of vulnerability assessment", *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation*, Nice, Vol. 1, pp. 406-413, (1995).
- 2 M. Dolce, A. Kappos, G. Zuccaro y A.W. Coburn, "Report of the EAEE Working Group 3: Vulnerability and risk analysis", *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Vol. 4, pp. 3049-3077, (1994).
- 3 D. Benedetti y V. Petrini, "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione", *L'industria delle Costruzioni*, **149**, pp. 66-74, (1984).
- 4 A.H. Barbat, F. Yépez Moya y J.A. Canas, "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones", *Earthquake Spectra*, **12**, No.3, pp. 371-394, (1996).
- 5 F. Yépez Moya, A.H. Barbat y J.A. Canas, "Simulación de escenarios de daño sísmico en zonas urbanas", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* Vol. **12**, No.3, pp. 331-358, (1996).
- 6 F. Yépez Moya, *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, (1996).
- 7 T. Anagnos, C. Rojahn y A. Kiremidjian, *NCEER-ATC Joint Study on Fragility of Buildings*, Vol. **NCEER-95-0003**, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, (1995).
- 8 M. Chavez y L. García-Rubio, "Seismic vulnerability of the metropolitan zone of Guadalajara, México", *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation*, Nice, Vol. 1, pp. 33-40, (1995).
- 9 G. Bustamante, J.L. Chatelain, J. Fernández, J. Valverde, H. Yepes, B. Tucker, C. Villacis, T. Yamada y F. Kaneko, "An example in Quito, Ecuador, of the use of seismic microzoning for risk reduction in developing countries", *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation*, Nice, Vol. 1, pp. 683-690, (1995).
- 10 CNR, *Determinazione del rischio sismico a fini urbanistici in Lombardia, Comune di Toscolano Maderno (BS)*, Istituto di Ricerca Sul Rischio Sismico, Milan, (1993).
- 11 S.K. Kunnath, A.M. Reinhorn y R. F. Lobo, *IDARC Version 3.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures*, **NCEER-92-0022**, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, (1992).
- 12 S.K. Kunnath, G. Hoffmann, A.M. Reinhorn y J.B. Mander, "Gravity-load-designed reinforced concrete buildings, Part I: Seismic evaluation of existing construction", *ACI Structural Journal*, Vol. **92**, No.3, pp. 343-354, (1995).
- 13 S.K. Kunnath, G. Hoffmann, A.M. Reinhorn y J.B. Mander, "Gravity-load-designed reinforced concrete buildings, Part II: Evaluation of detailing enhancements", *ACI Structural Journal*, Vol. **92**, No.4, pp. 471-478, (1995).

- 14 S.K.V. Gunturi, *Building-Specific Earthquake Damage Estimation*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Stanford University, (1993).
- 15 T. Hasselman, R. Eguchi y J. Wiggins, *Assessment of Damageability for Existing Buildings in a Natural Hazards Environment*, Report 80-1332-1, J.H. Wiggins Company, California, (1980).
- 16 J.M. Ferrito, "Economics of seismic design for new buildings", *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 110, pp. 2925-2938, (1984).
- 17 S.A. Mirza y J.G. MacGregor, "Variation in dimensions of reinforced concrete members", *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 105, No.4, pp. 751-765, (1979).
- 18 F.F. Udoeyo y P.I. Ugbem, "Dimensional variations in reinforced-concrete members", *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 121, No.12, pp. 1865-1867, (1995).
- 19 A. Florian, "An efficient sampling scheme: Updated latin hypercube sampling", *Probability Engineering Mechanical*, Vol. 7, pp. 123-130, (1992).
- 20 Real Decreto 2543/1994, *Norma Sismoresistente NCSE-1994*, Boletín Oficial del Estado, No.33, Madrid, Diciembre, (1994).
- 21 A.T.Y. Tung, J.N. Wang, A.S. Kiremidjian y E. Kavazanjian, "Statistical parameters of AM and PSD function for the generation of site-specific strong ground-motions", *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Vol. 2, pp. 867-872, (1992).
- 22 S. Figueras, V. Schmidt, T. Susagna, J. Fleta, X. Goula y A. Roca, "Preliminary study on microzonation of Barcelona (Spain)", *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation*, Niza, Vol. 1, pp. 731-738, (1995).
- 23 J.J. Egozcue, A. Barbat, J.A. Canas, J. Miquel y E. Banda, "A method to estimate intensity occurrence probabilities in low seismic activity regions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 20, pp. 43-60, (1991).
- 24 D. Benedetti, G. Benzoni y M.A. Parisi, "Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, pp. 183-201, (1988)