

# *Simulación de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño para estudios de riesgo sísmico*

Fabricio YÉPEZ, Alex H. BARBAT y Josep A. CANAS  
ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.  
C/. Gran Capitán, s/n, Campus Nord UPC, 08034 Barcelona.

## **RESUMEN**

Se desarrollan los conceptos fundamentales de Vulnerabilidad Sísmica observada y calculada de edificios como componente básica para un estudio de Riesgo Sísmico. Se desarrollan metodologías para la evaluación de cada uno de los dos tipos mencionados de vulnerabilidad, adecuadas a edificios de mampostería no reforzada. La primera de ellas permite obtener y procesar la información proveniente del levantamiento de daños en edificios ocasionados por un terremoto en una región. La segunda metodología está fundamentada en la simulación del daño en edificios utilizando modelos estructurales implementados en un ordenador. El soporte de las metodologías presentadas es el método italiano del índice de vulnerabilidad. Los resultados de cada estudio se presentan en forma de funciones de vulnerabilidad y de matrices de probabilidad de daño, constituyéndose en las primeras obtenidas en España. Finalmente se comparan las metodologías y se deducen sus posibles aplicaciones inmediatas a programas de prevención de desastres en zonas urbanas.

**Palabras clave:** Vulnerabilidad sísmica, matrices de daño, funciones de vulnerabilidad, escenarios de daño, simulación por ordenador, índice de vulnerabilidad, mitigación del riesgo, levantamiento post-terremoto, terremotos en Almería, índice de daño, mampostería no reforzada, comportamiento sísmico de edificios.

## **ABSTRACT**

The fundamental concepts of observed and calculated seismic vulnerability are described as basic components of a seismic risk study. Two methodologies for the evaluation of both types of vulnerabilities are developed for non-reinforced masonry buildings. The first methodology allows to obtain and process the information from a survey of damaged buildings due to an earthquake in a site. The second one is based on the damage simulation of buildings using structural models implemented in a compu-

ter. The basis of both methodologies is the vulnerability index method. The results are presented as vulnerability functions and damage probability matrices, the first obtained in Spain. Finally, the methodologies are compared in order to derive possible applications relative to prevention disaster programs in urban areas.

**Key words:** Seismic vulnerability, damage matrices, vulnerability functions, damage scenarios, computer simulation, vulnerability index, risk mitigation, post-earthquake survey, Almería earthquakes, damage index, non-reinforced masonry, building seismic behaviour.

## 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las pérdidas, tanto de vidas como económicas, ocasionadas por terremotos han sido causadas por un deficiente comportamiento sísmico de las estructuras, llegándose muchas veces a colapsos parciales y totales. Sin embargo, a pesar de que las normativas de construcción antisísmica existentes mejoran día a día, enriquecidas con la información obtenida de nuevas investigaciones, todavía continúan ocurriendo catastróficas pérdidas en muchos países del mundo, incluso en aquellos en los que los estudios en el campo de la Ingeniería Sísmica constituyen una de sus actividades prioritarias.

Es evidente que los nuevos logros que se alcanzan en el campo del diseño de estructuras pueden aplicarse únicamente a las nuevas construcciones, cuyo número es un ínfimo porcentaje del número de estructuras existentes. Por otra parte, si la ocurrencia de los fenómenos sísmicos está aún fuera del control de la ciencia, sin lugar a dudas es necesario mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras existentes, para así mitigar las pérdidas que los terremotos están produciendo en el mundo. De esta necesidad nacen los estudios de *vulnerabilidad sísmica* de estructuras, los cuales merecen una atención prioritaria hoy en día, con miras a cualquier plan de mitigación de futuros desastres por sismos.

El objetivo de los estudios de vulnerabilidad es determinar el daño esperado en una estructura, en un grupo de estructuras o en toda una zona urbana, suponiendo que llegue a ocurrir un sismo de determinadas características. Una vez conocido el daño esperado, se pueden buscar soluciones para reducirlo, con lo cual se lograría disminuir en gran medida las pérdidas que ocasionase un futuro terremoto. Tales soluciones repercutirán en un coste económico, el cual se podrá contrastar con los costes de las pérdidas esperadas, para así decidir si es justificable realizar inversiones de mejora y reforzamiento de dichas estructuras. Por este motivo, los estudios de vulnerabilidad sísmica constituyen, conjuntamente con los estudios de *peligrosidad*, uno de los factores determinantes del *riesgo sísmico específico*, el cual representa la probabilidad total de que una estructura sufra varios niveles de daño durante un período específico de tiempo. El riesgo específico para un período de tiempo dado se determina mediante la convolución de las probabilidades de ocurrencia de todas las intensidades

posibles del movimiento del terreno durante el mencionado período, es decir, de la peligrosidad sísmica, con las probabilidades de daño en la estructura para cada una de dichas intensidades, que constituye la vulnerabilidad sísmica (Caicedo *et al.*, 1994).

En el presente trabajo se presentan dos metodologías que convergen en un solo procedimiento para estudiar la vulnerabilidad de estructuras de edificación de mamposería. Es importante notar, la casi inexistente bibliografía sobre trabajos realizados en el campo de la vulnerabilidad sísmica en España y los escasos trabajos realizados en otros países, lo cual resalta la necesidad del presente estudio. Más importante aún resulta ser el hecho de que, debido a los importantes movimientos sísmicos ocurridos en los últimos años, es una necesidad imperiosa mitigar los efectos de estos fenómenos, lo cual hace posible que los estudios sobre vulnerabilidad sísmica ocupen uno de los primeros lugares de atención de los investigadores en todo el mundo.

La evaluación de la vulnerabilidad puede efectuarse: 1) utilizando procedimientos de simulación numérica del daño sísmico en estructuras mediante modelos dinámicos y matemáticos; 2) a partir de la inspección post-terremoto de edificios existentes o 3) mediante ensayos dinámicos en el laboratorio. Por este motivo, se hace necesario distinguir entre la *vulnerabilidad observada*, que significa la vulnerabilidad que ha sido derivada del levantamiento de los daños posteriores a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo definido de estructura y la *vulnerabilidad calculada*, que es la vulnerabilidad que ha sido derivada de un análisis numérico mediante un modelo estructural y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilistas. Generalmente, los ensayos de laboratorio se utilizan para estudiar el comportamiento de elementos estructurales aislados y facilitar de esta manera la formulación de modelos mecánicos sencillos, que son incorporados posteriormente al modelo global de la estructura.

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 dinámicas. Una vez que se ha calculado la respuesta de la estructura, estos métodos la relacionan con el daño ocurrido en los elementos estructurales o en la estructura misma, mediante parámetros que se conocen con el nombre de 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 otra parte, 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 el estudio de estructuras tratadas de manera individual. Por estas razones, en tales casos es preferible emplear métodos alternativos que permitan un análisis rápido de la vulnerabilidad, como por ejemplo, los métodos basados en la vulnerabilidad observada.

En teoría, los estudios de vulnerabilidad observada no han sido desarrollados para efectuar una evaluación precisa de la vulnerabilidad de edificios, sino más bien para obtener una idea general sobre el comportamiento sísmico que se puede esperar en una zona urbana y como una herramienta más en la prevención de desastres. Una de las características más importantes de estos métodos es la de utilizar la opinión de expertos y datos empíricos como fuente de conocimiento para la evaluación de la vulnerabilidad. Es ampliamente reconocido, que la experiencia acumulada durante la observación de daños en estructuras luego de ocurridos los terremotos, tiene un valor incalculable en el momento de la evaluación sísmica de edificios existentes. Los métodos basados en la vulnerabilidad observada recopilan esta información por medio de *matrices de probabilidad de daño* o de *funciones de vulnerabilidad*. Las primeras expresan la probabilidad discreta de la distribución del daño para un tipo de estructura y una intensidad sísmica dada, por lo que simplifican enormemente la operación de convolución requerida en cálculo del riesgo sísmico específico. Las segundas constituyen relaciones matemáticas que expresan el daño global que experimenta una estructura específica cuando es sometida a un movimiento sísmico y, al contrario de las anteriores, no tienen una forma estándar reconocida (Yépez *et al.*, 1994). En este segundo caso, el daño global de la estructura suele estar representado como un índice o porcentaje, mientras que el movimiento sísmico puede describirse mediante la magnitud, intensidad máxima, aceleración máxima, o cualquier otro parámetro que lo cuantifique.

## 2. MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El análisis del comportamiento de edificios durante los terremotos ocurridos desde el año 1976 en diferentes regiones de Italia, ha permitido determinar algunos de los parámetros más importantes que controlan el daño en las estructuras. Estos parámetros han sido recopilados en un formulario de levantamiento que se viene utilizando en Italia desde el año 1982, con el propósito de determinar de una forma rápida y sencilla la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes. La identificación de los mencionados parámetros y su combinación en un único valor numérico denominado *índice de vulnerabilidad*, el cual describe de alguna forma la capacidad sísmica de una estructura, es lo que se conoce como el método del índice de vulnerabilidad. Este método ha sido ampliamente utilizado en Italia durante los últimos diez años y su gran aceptación ha quedado demostrado cuando el Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti (GNdT), ente gubernamental italiano, lo ha adoptado para sus planes de mitigación de desastres. Esto ha permitido que el método evolucione como resultado de su utilización y experimentación durante todos estos años y de la creación de una extensa base de datos sobre daño y vulnerabilidad (Benedetti *et al.*, 1988).

De acuerdo con la escala de vulnerabilidad propuesta por Benedetti y Petrini (1984), el índice de vulnerabilidad de cada edificio se obtiene mediante una suma ponderada de los valores numéricos que expresan la calidad sísmica de cada uno de aquellos parámetros, tanto estructurales como no estructurales, que se consideran de gran importancia en el comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería. Cada parámetro se enmarca, durante las investigaciones de campo, dentro de una de cuatro clases A, B, C, o D, siguiendo una serie de instrucciones detalladas con el propósito de minimizar las diferencias de apreciación entre los diferentes observadores. A cada una de estas clases se le ha hecho corresponder un valor numérico  $K_i$  que varía entre 0 y 45, tal como se observa en la Tabla 1. Así, por ejemplo, si el parámetro número cuatro, que es la posición del edificio y de la cimentación, corresponde a una configuración insegura desde el punto de vista sísmico, se le asigna la clase D y el valor numérico  $K_4 = 45$ .

**TABLA 1**  
Escala numérica del índice de vulnerabilidad adaptada de Benedetti y Petrini (1984)

Núm.	Parámetro	$K_i$ (A)	$K_i$ (B)	$K_i$ (C)	$K_i$ (D)	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	Tipos de cubierta	0	15	25	45	1.0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estados de conservación	0	5	25	45	1.0

Por otra parte, cada parámetro viene afectado por un factor de peso  $W_i$  que, en los estudios de Benedetti y Petrini (1984), varía entre 0,25 y 1,5. Este coeficiente refleja la importancia de cada uno de los parámetros dentro del sistema resistente del edificio. De esta forma, el índice de vulnerabilidad  $I_v$  se define como

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \tag{1}$$

Aunque de por sí, el índice de vulnerabilidad resulta un parámetro que ayuda a identificar los edificios sísmicamente peligrosos, permite también definir

funciones de vulnerabilidad que relacionan el propio índice de vulnerabilidad  $I_v$ , con el índice de daño del edificio  $D$  condicionado por la intensidad macrosísmica  $I$ . La observación del daño en estructuras después de ocurrido un terremoto (vulnerabilidad observada), así como la simulación del daño utilizando modelos matemáticos (vulnerabilidad calculada) 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 (como se describe más adelante). El resultado final es un índice de daño  $D$  cuyo valor, expresado en porcentaje, está comprendido entre 0 y 100.

### 3. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD OBSERVADA OBTENIDAS A PARTIR DE ESTUDIOS POST-TERREMOTO

Para obtener funciones de vulnerabilidad observada del tipo definido anteriormente, es decir, utilizando el método del índice de vulnerabilidad, es necesario realizar evaluaciones de los daños ocasionados por los terremotos en edificios. El procedimiento se inicia con un levantamiento de los datos de cada edificio estudiado; a la vez que se examina su vulnerabilidad, se realiza una evaluación del daño que sufrieron dichas edificaciones. 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. Un ejemplo de clasificación del tipo de daño, específico para estudiar el sistema resistente vertical de edificios de mampostería, puede apreciarse en la Figura 1, donde cada número representa

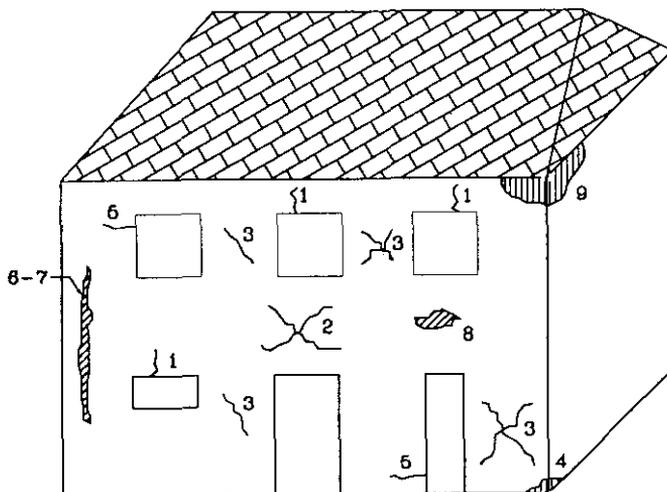


Fig. 1. Tipos de agrietamiento en paneles verticales de mampostería.

un tipo de fallo de determinadas características que está asociado a un grado de daño predeterminado; cada grado de daño recibe una calificación desde A –ningún daño o daño despreciable–, hasta F –destrucción–. De esta manera puede tenerse una idea del nivel o grado de daño global que se ha alcanzado en dichos elementos.

Una vez obtenido el grado de daño en cada elemento, puede 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. Sin embargo, dicha relación no es evidente ni sencilla. Del análisis de diversos estudios realizados en el mundo se ha observado que la relación no es lineal y que depende fuertemente del subjetivismo y la experiencia de los que evalúan las pérdidas. Un ejemplo de relación entre grado e índice de daño global para estructuras de mampostería no reforzada, puede encontrarse en la Tabla 2, propuesta por Braga *et al.* (1986).

**TABLA 2**  
**Relación adoptada entre grado de daño e índice de daño global de la estructura**

Grado de Daño	Índice de Daño Global Adoptado
A	0%
B	10%
C	25%
D	50%
E	75%
F	100%

Una vez que se dispone de los índices de vulnerabilidad y de daño de cada edificio, se obtienen finalmente, mediante un análisis estadístico, las funciones de vulnerabilidad correspondientes al nivel de intensidad del terremoto ocurrido en el lugar. De la repetición de todo el proceso para diferentes intensidades sentidas en otros lugares, se dispondrá de un conjunto de funciones que podrán ser aplicadas en futuros estudios de vulnerabilidad en la zona. Un ejemplo del resultado de este tipo de estudios son las funciones de vulnerabilidad propuestas por Angeletti *et al.*, (1988) y presentadas en la Figura 2, las cuales han sido elaboradas a partir de la información obtenida correspondiente a los terremotos que afectaron las poblaciones de Venzone y Barrea en Italia. Estas funciones se definen mediante la expresión

$$D = 100 \left[ \frac{\rho + k I_v + \frac{(I_v)^2}{(I_v)^2 + A^2}}{\rho + k I_v + \frac{(I_v)^2}{(I_v)^2 + A^2}} \right] \quad (2)$$

donde los coeficientes de regresión  $\rho$ ,  $k$  y  $A$  dependen de la intensidad sísmica medida en la escala de Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS). Los coefi-

cientes de regresión para los grados VI, VIII y X en el escala MCS, los cuales no fueron sentidos en estos dos sitios, han sido extrapolados a partir de los datos reales por medio de un procedimiento que se describe en la mencionada referencia.

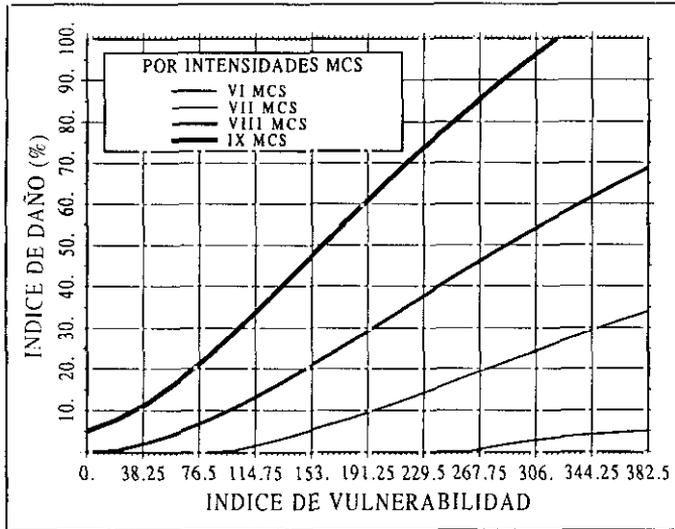


Fig. 2. Funciones de vulnerabilidad propuestas por Angeletti *et al.* (1988).

Los autores del presente trabajo no disponen de información acerca de funciones de este tipo, que hayan sido obtenidas o aplicadas en otros países distintos de Italia. Sin embargo, diversos estudios de vulnerabilidad sísmica basados en otros métodos de evaluación y realizados en varios lugares del mundo, permiten concluir que no es del todo fiable la utilización de funciones de vulnerabilidad obtenidas para otros países. Por lo tanto, es importante la obtención de funciones de vulnerabilidad en los sitios en los que se realiza el estudio, o a su vez, la calibración de funciones existentes, a fin de tener en cuenta las diferencias locales, la utilización de tecnologías constructivas diferentes, mano de obra de distintas características, etc. (Yépez *et al.*, 1994). Esto únicamente es posible, utilizando y procesando la información que pueda obtenerse de un estudio post-terremoto que se realice en la región de interés. Por todo ello, y dada la inexistencia de cualquier tipo de funciones de vulnerabilidad en España, se hace imprescindible su obtención utilizando métodos apropiados basados en estudios post-terremoto, uno de los cuales se presenta en este trabajo. La solución al problema planteado consiste en recopilar información, tanto de la vulnerabilidad de las estructuras existentes como de su índice global de daño, una vez ocurrido el fenómeno sísmico en la zona, para

luego analizar los datos obtenidos y obtener funciones de vulnerabilidad similares a las italianas.

En los días 23 de diciembre de 1993 y 4 de enero de 1994 ocurrieron dos terremotos sentidos en una amplia zona del sur de España, que comprende las provincias de Almería, Granada, Málaga, Albacete, Jaén y Murcia; incluso se llegó a sentir, aunque muy levemente, en edificios altos de la ciudad de Madrid. Los epicentros de ambos 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. Estos terremotos han afectado principalmente las localidades de Berja, Adra, Baños, Almerimar, Balerna, La Alquería, Balanegra, El Ejido, Guardias Viejas y El Cortijo, cercanas a los epicentros. La intensidad máxima evaluada en los sitios más críticos alcanza el grado VII en la escala Medvedey-Sponheuer-Kárník (MSK). No existieron daños con categoría de destrucción sin embargo, resultaron seriamente afectadas ciertas estructuras, tanto de mampostería como de hormigón armado y se reportaron algunos deslizamientos de taludes de carreteras.

El material de construcción utilizado en las edificaciones de mampostería de la región difiere de acuerdo con su localización. En poblados pequeños tales como Guardias Viejas, Baños, La Alquería, Balanegra, Balerna y San Roque, se utiliza adobe y ladrillo de baja calidad e incluso una combinación de ellos; las cubiertas son de madera o de mampostería, los forjados son muy flexibles y sus conexiones con los muros se encuentran en mal estado, las cimentaciones son superficiales consistiendo en simples cadenas de piedra a lo largo de los muros y, en general, presentan un mal estado de conservación.

Por el contrario, en localidades más pobladas tales como Berja, El Ejido, Adra y Turón, la calidad del material de construcción es bastante mejor, pues consiste en ladrillos de buena calidad, piedra bien o regularmente tallada, con relativamente buen material de ligazón. En estas localidades no se observa una tendencia a la mezcla de materiales, con algunas excepciones, e incluso existe una mejor calidad constructiva. Las cubiertas de los edificios son de teja sobre una firme subestructura de madera y en ocasiones de acero, mientras que sus forjados presentan mucho mayor rigidez en el plano que las anteriores, mejorando también su conexión con los muros portantes. El estado de conservación es mejor que en las construcciones de las localidades menos pobladas.

Primeramente se procedió a realizar una evaluación de la vulnerabilidad de los edificios de mampostería no reforzada. A la vez que se estudió su vulnerabilidad se estimó el grado de daño ocasionado. Para agilizar y optimizar el levantamiento y la recopilación de la información, se elaboró el modelo de formulario que se presenta en la Figura 3.

Para poder asociar el grado de daño que presentan las estructuras estudiadas con el índice global de daño, se utiliza la relación de la Tabla 2.



Conforme se realizaron los levantamientos, se fotografió cada uno de los edificios estudiados para su posterior re-estudio, a fin de asignar un valor adecuado a su grado de daño. Con toda la información recopilada se procedió a la confirmación de los índices de vulnerabilidad y de daño. Posteriormente se buscó, mediante un análisis de regresión con técnicas de mínimos cuadrados, el tipo de función matemática que mejor se ajustaba a los datos de vulnerabilidad observada correspondiente a los más de 40 edificios estudiados. La función obtenida de esta manera consiste en un polinomio de tercer orden, que proporciona un coeficiente de correlación del 89,7%. La Figura 4 muestra los datos de los levantamientos en forma de puntos, la curva de regresión polinomial de tercer orden en línea continua y, a manera de comparación, en línea entrecortada se representan las curvas italianas propuestas por Angeletti *et al.* (1988), para intensidades VI, VII y VIII en la escala MCS. Cabe anotar que, debido a la homogeneidad entre las construcciones de la zona, muchas de ellas tienen un índice de vulnerabilidad similar, mostrando un índice de daño también similar. Por ello algunos de los puntos de la Figura 4 pueden corresponder a varios edificios estudiados, aspecto que tiene gran influencia en el análisis regresional.

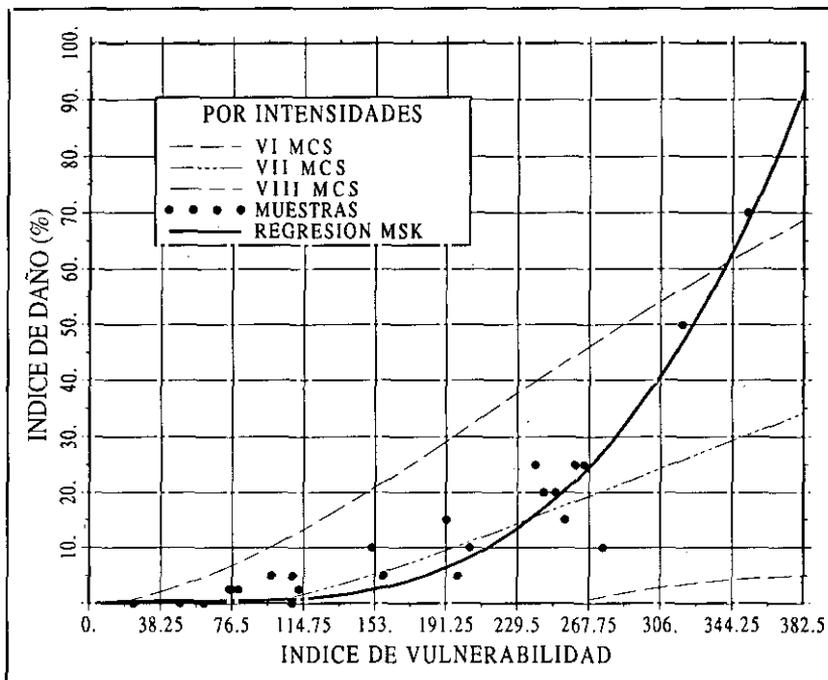


Fig. 4. Función de vulnerabilidad observada en España para un nivel de intensidad VII MSK. En trazos entrecortados se representan las funciones propuestas por Angeletti *et al.* (1988).

La curva encontrada constituye la primera función de vulnerabilidad observada obtenida a partir de un estudio post-terremoto en España. Dicha función corresponde al grado VII de intensidad macrosísmica en la escala MSK, que ha sido la intensidad evaluada en los lugares estudiados de la provincia de Almería.

El estudio realizado requiere hacer algunas consideraciones importantes. Dado el escaso número de funciones de vulnerabilidad del tipo utilizado en este trabajo, obtenidas todas ellas en Italia, la función aquí obtenida no puede ser comparada de manera adecuada y eficaz con otras. Sin embargo, en la Figura 4 se ha superpuesto esta función con las últimas funciones conocidas y publicadas en dicho país. De su análisis puede observarse que la función obtenida en España para el nivel de intensidad VII MSK y la función italiana para el nivel de intensidad VII MCS, son similares para un rango del índice de vulnerabilidad comprendido entre 0 y 270 aproximadamente, es decir, en casi el 70% del rango de valores posibles. Para valores superiores de dicho índice, la curva italiana se separa bastante, mostrando índices de daño inferiores. Las discrepancias en el rango de vulnerabilidades altas puede responder al «factor país», ya que existen diferencias entre las construcciones de ambas regiones, tanto en el comportamiento y la calidad y técnica constructiva. Otro aspecto a resaltar es la pendiente de las curvas, totalmente creciente y positiva en el caso de la función observada en España y decreciente positiva en el último tramo de las curvas italianas. Sin embargo, es necesario poseer mayor información para emitir juicios a este respecto.

Por último, se debe tener en cuenta que éste es el primer estudio de este tipo que se realiza en España y que la asignación de índices de daño y de calificaciones a los parámetros que definen el índice de vulnerabilidad responde al subjetivismo del observador. Adicionalmente, el número de edificios estudiados, sin dejar de ser representativos, debería ser aumentado en futuros estudios post terremoto. La calidad de los datos es muy importante en estudios de tipo estadístico como éstos y su validez y fiabilidad es mayor, cuanto mayor es la cantidad de información que se posea. Lo ideal es crear un banco de datos e ir actualizándolo, realizando todos los estudios post-terremoto que sean necesarios utilizando esta misma metodología, conforme ocurran sismos en el futuro y disponer de esta forma, de una fuente de conocimiento óptima.

#### **4. PROCESO DE SIMULACIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD**

Como se manifestó en el anterior apartado, la utilización del método del índice de vulnerabilidad es mucho más fiable cuando se utilizan funciones de vulnerabilidad propias del lugar de estudio, a fin de evaluar el índice de daño de las edificaciones. Sin embargo, para obtener funciones de vulnerabilidad mediante estudios post-terremoto, como el realizado en Almería, es imprescindible la ocurrencia de terremotos, lo que, especialmente para regiones del mundo con sismos destructores asociados a períodos de retorno grandes, resulta ser

un gran inconveniente. Si agregamos el hecho de que, para validar las funciones obtenidas se requiere comprobarlas utilizando la información del daño provocado por varios terremotos, el problema se vuelve más complejo aún.

Parte de estos inconvenientes pueden ser evitados utilizando los avances de la Ingeniería Sísmica y de la Dinámica de Estructuras en la simulación por ordenador del comportamiento estructural. Dicha simulación es posible gracias al desarrollo de modelos matemáticos y de laboratorio fiables, que hacen posible la predicción del comportamiento de las estructuras frente a cargas provenientes de terremotos. La aplicación de dichos modelos ha dado lugar a los estudios de vulnerabilidad calculada, como el que se describirá a continuación, no siendo necesario esperar la ocurrencia de terremotos para adquirir la información requerida. El objetivo es entonces, utilizar modelos numéricos que permitan simular edificios ficticios sometidos a acciones sísmicas; evaluar en el ordenador el daño que se produce en ellos y generar funciones de vulnerabilidad similares a las obtenidas de los estudios post-terremoto.

La mampostería es un material no homogéneo y anisótropo, debido a que está compuesta de distintos materiales con características y propiedades diferentes y este aspecto, junto con la diversidad de tipos de material y tipologías constructivas (las cuales son muy variadas dependiendo del lugar y de la mano de obra utilizada), hacen muy difícil una modelación exacta de las estructuras. La anisotropía del material en sí no representa un grave problema para modelar este tipo de estructuras, siempre y cuando los elementos de mampostería sean bastante regulares en toda la extensión del muro. En caso contrario, su 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 (Manfredi *et al.*, 1992).

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 totalmente aleatorias. Por este motivo, es necesario utilizar un modelo más sencillo pero que refleje adecuadamente el comportamiento inelástico observado en los estudios experimentales. De entre los pocos métodos de evaluación del daño para elementos de mampostería que existen en la literatura, se ha escogido el propuesto por Abrams (1992), el cual se aplicará a las estructuras discretizadas como edificios de cortante –en el caso de forjados rígidos–, o modeladas globalmente como un panel de cortante –en el caso de forjados más flexibles–. Este modelo, cuyos principios son similares a los propuestos por Romano *et al.* (1993) y Hendry (1990), ha sido comprobado experimentalmente con numerosos ensayos realizados a escala natural en los laboratorios de la Universidad de Illinois en Urbana-Campaign.

El modelo de Abrams 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 suponen las normativas sismo-resistentes. Dicho modelo incluye en el análisis los tipos de fallo que gobiernan el comportamiento del panel, tanto a flexocompresión como a cortante actuando simultáneamente. Finalmente evalúa la capacidad máxima del muro de resistir cargas sísmicas, permitiendo evaluar un índice de daño de la estructura por piso mediante la relación entre la sollicitación y los estados inicial y de máxima fisuración, previo al colapso de los paneles de mampostería. Sin embargo, al requerirse la determinación del índice global de daño de toda la estructura se utilizará la sugerencia propuesta por Chung y Shinozuka (1988), la cual establece que el índice de daño global puede definirse como una suma ponderada de los índices de daño de cada piso individual, donde los pesos son mayores si los pisos son más bajos, proponiendo que

$$D = \sum_{i=1}^n \left( \frac{n+1-i}{n} \right) DP_i \quad (3)$$

donde  $n$  es el número de pisos y  $DP_i$  es el índice de daño global de cada piso.

En cuanto al tipo de definición de la acción sísmica a considerar, se debe tomar en cuenta la falta de resolución característica de los estudios de peligrosidad sísmica, los cuales definen comúnmente la acción del terremoto mediante un solo parámetro, como puede ser la intensidad macrosísmica o la aceleración máxima esperada, lo que no permite utilizar modelos de definición complejos. Debido a este aspecto y añadiendo el hecho de que en el modelo de Abrams no se necesita evaluar el comportamiento del edificio durante todo el tiempo que está sometido a las cargas sísmicas, sino únicamente el valor de la máxima respuesta, se realizará un análisis dinámico utilizando espectros de respuesta. Se ha optado por definir la acción mediante el espectro de respuesta de la Normativa Sismo-Resistente Española.

Se elaboró un programa que genera de manera aleatoria edificios hipotéticos, a partir de datos que responden a una ley de distribución uniforme de probabilidades y, según dichos datos, califica cada uno de los parámetros requeridos por la metodología italiana para cada edificio generado. Esto permite calcular los índices de vulnerabilidad y crear un archivo de datos con toda la información necesaria de cada edificio para continuar la siguiente etapa de cálculo. La interpretación desde el punto de vista probabilista se discutirá más tarde.

Una vez generados los edificios hipotéticos con todos sus datos, se utiliza otro programa que, a partir de dichos datos, realiza, 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 de Abrams. Como resultado final se obtiene

el índice de daño global del edificio, para cada nivel de intensidad macrosísmica en la escala MSK.

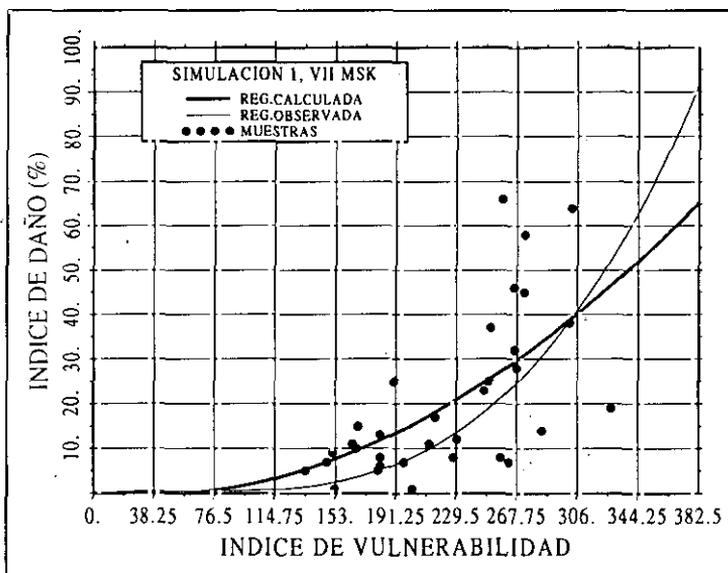


Fig. 5. Primera simulación de edificios para intensidad VII y comparación con la función observada.

Considerando que se dispone de la función de vulnerabilidad observada para la intensidad VII, descrita en el apartado anterior y representada en la Figura 4, resulta interesante realizar primero la simulación para dicha intensidad. Para ello, se ha generado la información de 60 edificios hipotéticos y se ha calculado el índice de vulnerabilidad  $I_v$  correspondiente. Posteriormente, se ha evaluado el índice de daño  $D$  de tales edificios para ese nivel de intensidad mediante el procedimiento descrito anteriormente. Con los puntos obtenidos, los cuales pueden observarse en la Figura 5, se realiza un análisis regresional, del mismo orden que el utilizado en el apartado anterior, con el fin de obtener la curva de vulnerabilidad calculada. La función resultante está representada también en la Figura 5 junto con la función de vulnerabilidad observada, con el propósito de compararlas. Nótese también 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.

## 5. PROCESO DE CALIBRACIÓN DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD CALCULADA

Como puede observarse en la Figura 5, el ajuste obtenido mediante la simulación es bastante similar a la curva observada para los rangos del índice de

vulnerabilidad menores que 100; sin embargo, para valores mayores la curva simulada alcanza valores más altos o más bajos que la observada. Aquí deben considerarse dos aspectos. El primero de ellos es que la validez de la curva observada está avalada por datos reales, por lo que se debe considerar que la simulada mediante el modelo matemático es la que no se ajusta adecuadamente a la «real». El segundo es que, tal como se describió anteriormente, la evaluación del índice de vulnerabilidad utiliza los pesos  $W_i$  en la ecuación (1); dichos pesos han sido propuestos por Benedetti y Petrini (1984) (Tabla 1), en base a la experiencia de estos autores en daños ocasionados por sismos en edificios italianos.

Tomando en cuenta todos estos aspectos, en este estudio se presenta un método de calibración de la función de vulnerabilidad calculada a partir de la función de vulnerabilidad observada. Toda esta fase se esquematiza como parte de la figura 20, que se presenta más adelante. Lo que se propone es variar los pesos  $W_i$ , pero manteniendo la relación de proporción entre ellos puesto que, en este aspecto es donde el método italiano jerarquiza los parámetros que tienen mayor influencia en el daño esperado en un edificio y dicha jerarquización proviene directamente de la experiencia de los autores del método (Benedetti *et al.*, 1988). La calibración propuesta puede realizarse «llevando» la curva simulada hacia la observada mediante el siguiente proceso (Yépez *et al.*, 1995):

- Considerando como datos los valores del índice de daño  $D$  de todos los edificios generados, se calcula el índice de vulnerabilidad que cada uno de ellos debería tener para ubicarse sobre la función observada. Esto se puede lograr realizando una búsqueda, para cada edificio, de las raíces del polinomio de tercer orden que describe la curva de vulnerabilidad observada obtenida anteriormente. La función matemática de la curva de vulnerabilidad observada puede expresarse en la forma

$$2.76 \times 10^{-6} I_v^3 - 5.0335 \times 10^{-4} I_v^2 + 0.02959505 I_v - (D + 0.08823776) = 0 \quad (4)$$

Nótese que el número de decimales es necesario debido los altos valores que alcanza el índice de vulnerabilidad  $I_v$ . 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 y haciendo uso de la expresión (1)

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (5)$$

se aplica un proceso matemático de inversión generalizada condicionada. Para ello se utiliza el sistema de ecuaciones lineales generado por la ecuación (1), una para cada edificio, en las cuales se conocen los valores de  $I_v$  y  $K_i$ . Se consideran además 10 ecuaciones de restricción cuyo papel es mantener las proporciones originales entre los pesos  $W_i$  de la escala propuesta por Benedetti y Petrini (1984), de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 W_1 = W_5 \quad W_5 = W_7 \quad W_7 = W_9 \quad W_9 = W_{11} \quad W_2 = W_8 \\
 W_2 = W_{10} \quad W_3 = 2W_4 \quad W_5 = 2W_6 \quad W_6 = 2W_8 \quad W_3 = 3W_6
 \end{aligned}$$

- Como resultado de la inversión generalizada se obtienen nuevos valores de  $W_i$ , que son introducidos como datos en el primer programa que genera aleatoriamente las características de los edificios, con el cual se vuelven a generar otros 60 edificios y a calcular sus índices de vulnerabilidad. Mediante el segundo programa se calculan los nuevos valores del índice de daño  $D$  con los que, mediante un ajuste regresional del mismo orden que el anterior, se obtiene una nueva curva simulada; dicha curva es comparada con la observada en la Figura 6.

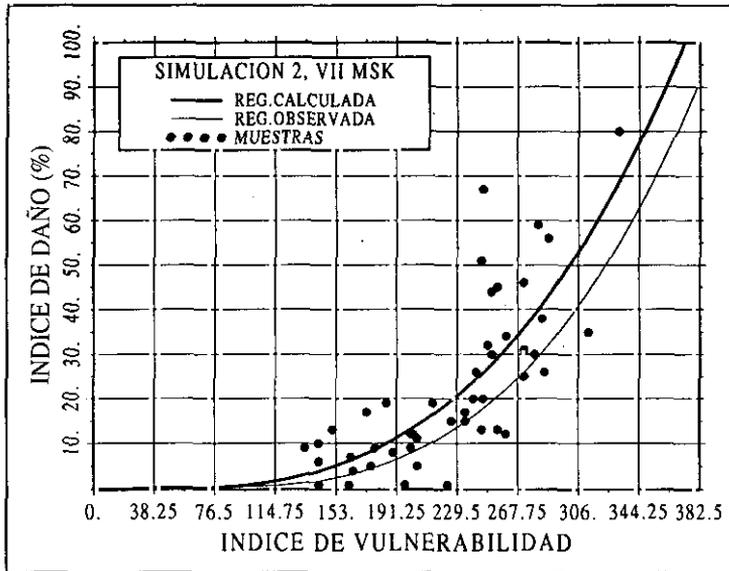


Fig. 6. Segunda simulación de edificios para intensidad VII y comparación con la función observada.

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

mios de tercer orden, inversión generalizada condicional y análisis polinomial regresional. De esta nueva iteración se obtienen otros valores  $W_i$ , los cuales se presentan en la Tabla 3, junto a los de la primera iteración y a los originales propuestos por Benedetti y Petrini (1984).

TABLA 3

Relación adoptada entre grado de daño e índice de daño global de la estructura

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

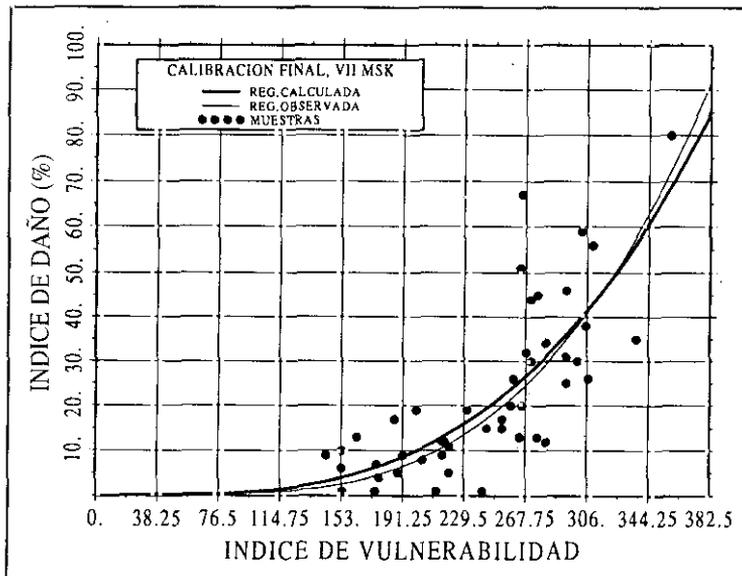


Fig. 7. Simulación final de edificios para intensidad VII y comparación con la función observada.

- 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 7. 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 anterior apartado.

Se puede observar 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 difieren solamente a partir de la cuarta cifra decimal con relación a la segunda iteración. Se considera entonces que el procedimiento ha convergido, finalizando de esta manera la calibración y entrándose a continuación en la etapa del análisis probabilista del proceso.

## 6. ESTUDIO PROBABILISTA DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez calibrados los pesos  $W_i$  del método italiano de acuerdo con la realidad de las construcciones en España, se procede a realizar una simulación más formal y de mayor envergadura. La generación previa de únicamente 60 valores se realizó con el objeto de simplificar el desarrollo de los análisis polinomiales regresionales y las inversiones generalizadas necesarias para la calibración, ya que, al aumentar el número de simulaciones, se aumenta de manera no proporcional la cantidad de cálculos estructurales, el orden de la matriz que entra en el proceso de inversión, el orden de los análisis regresionales, etc., con el consiguiente aumento considerable del tiempo de computación necesario, indicándose además que dicho aumento no es lineal respecto al número de edificios simulados. Por ello, una vez calibrado eficazmente el proceso, se entra en la fase formal de simulación, en la que se genera la información completa de unos 2000 edificios hipotéticos. En la Figura 8 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  $I_v$  y similar índice de daño  $D$ . El índice de correlación, aunque baje hasta alrededor del 80%, se considera adecuado. Piénsese que las correlaciones obtenidas por algunos autores como Braga *et al.* (1986), Angeletti *et al.* (1988), etc., en estudios realizados a partir de datos observados, los coeficientes obtenidos fluctúan entre el 60 y el 85%. A manera de comprobación se efectuó el proceso de inversión generalizada condicionada, utilizando los puntos de la Figura 8; los pesos  $W_i$  variaron únicamente en un 5% respecto a los de la última columna de la Tabla 3.

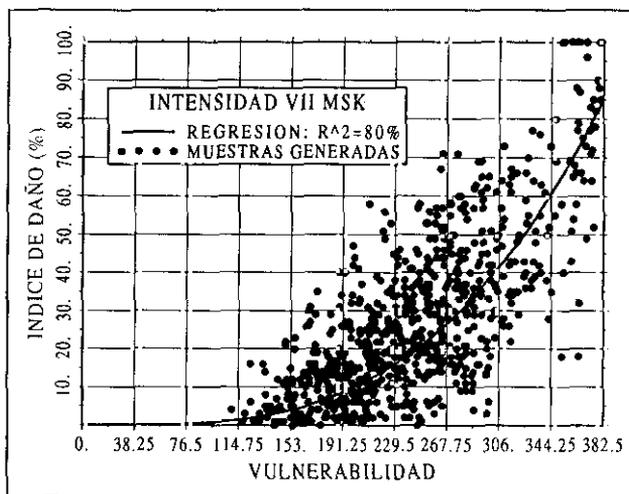


Fig. 8. Simulación final de edificios y regresión polinómica para intensidad VII MSK.

La primera fase del proceso de simulación realizado consistió 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 puede observarse en la Figura 9, en la que se ha superpuesto la gráfica de la distribución normal. La Figura 10 muestra el diagrama de frecuencias acumuladas de los datos de la figura anterior, así como la función de distribución normal superpuesta, mientras que la Figura 11 es una representación en escala probabilista de la Figura 10.

Como puede apreciarse, los datos se aproximan muy bien a la distribución normal. Ésto no es una coincidencia, pues lo que se ha cumplido es el *teorema central del límite*, uno de los resultados más importantes de la Teoría de las Probabilidades. El significado de dicho teorema es que, si tenemos  $n$  variables aleatorias independientes, en este caso los parámetros del método italiano, de modo de sus distribuciones de probabilidad coincidan, la suma de esas variables tiende a la distribución normal. Muchos autores consideran que el teorema es válido en situaciones mucho más generales, en donde los sumandos pueden incluso no ser independientes, pero sí es necesario que cada sumando no influya considerablemente en el total, que es exactamente lo que ocurre en este caso.

El teorema anterior está inmerso dentro de lo que se conoce como el *método de Montecarlo o método de las pruebas estadísticas*, que en realidad es el

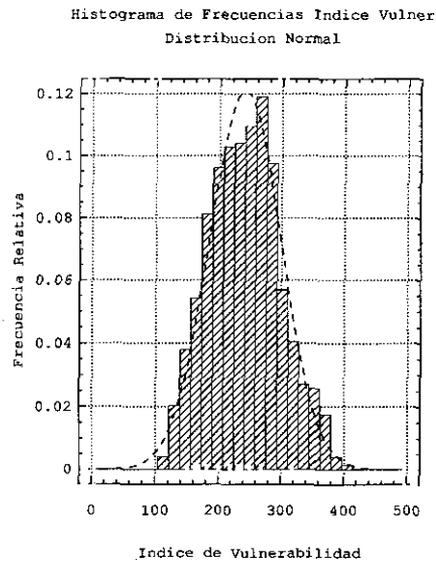


Fig. 9. Histograma de frecuencias y ajuste a una distribución normal para el índice de vulnerabilidad.

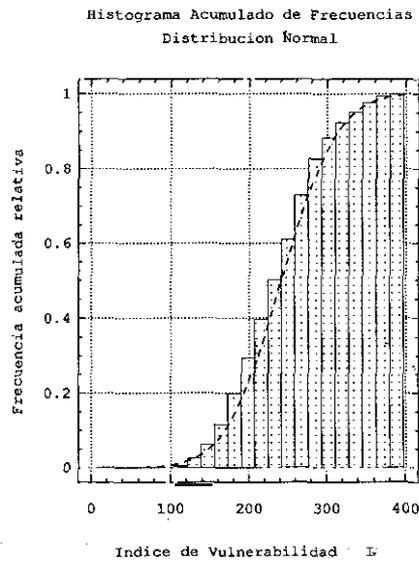


Fig. 10. Frecuencias acumuladas y ajuste a una función de distribución normal para el índice de vulnerabilidad.

método que se está empleando para realizar la simulación. Simular mediante un proceso determinista los resultados de muchos experimentos repetitivos a partir de datos de entrada obtenidos de manera probabilista, construir el histograma de dichos resultados y buscar la ley de distribución de probabilidad que se le ajusta y por tanto lo representa es, en pocas palabras, la técnica de simulación por Montecarlo (Benjamín y Cornell, 1970).

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

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{v\max}} \int_0^{I_{\max}} f(d | I_v, I) f(I_v) f(I) dI dI_v dd \quad (6)$$

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 por el índice de vulnerabilidad y la intensidad del sismo, mientras que las funciones  $f(I_v)$  y  $f(I)$  son las funciones de densidad del  $I_v$  y de la intensidad del terremoto  $I$ .

Las figuras anteriores no hacen sino expresar el término  $f(I_v)$ , aunque no matemáticamente, pues a pesar de que a simple vista el histograma de frecuencias del índice de vulnerabilidad es muy parecido a la distribución normal (Figura 9), lo que es más evidente al examinar el diagrama de frecuencias acumuladas (Figura 10) y el diagrama en escala probabilista (Figura 11), aún no se ha

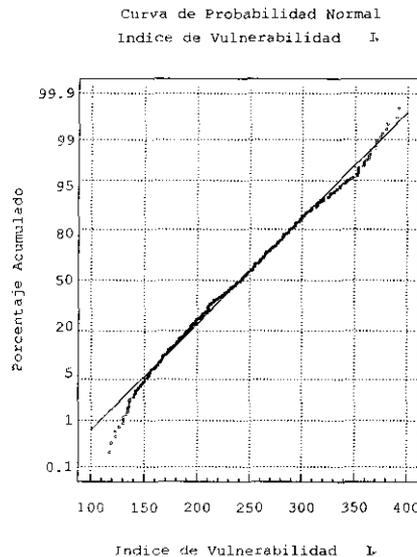


Fig. 11. Frecuencias acumuladas y función de distribución normal para el índice de vulnerabilidad, en escala probabilista.

establecido matemáticamente que dicha distribución sea o no aceptada como un modelo satisfactorio que se ajuste a los datos disponibles. Para demostrarlo se necesita realizar alguna prueba de bondad del ajuste que verifique el modelo a utilizar.

Para realizar tal prueba se utilizarán los que en la teoría de probabilidades se denominan *contrastes de significancia*, que permiten determinar si los datos se desvían una cantidad estadísticamente significativa respecto al modelo de predicción. En otras palabras, dichos contrastes permiten descartar modelos, pero no permiten determinar el mejor de los modelos aceptables. El estudiar cual es la bondad del ajuste de un modelo a los datos, parte de la hipótesis de que dicho modelo se ajusta a ellos. Se determina entonces un parámetro (estadígrafo) como medida de la desviación del modelo hacia los datos y se establece un valor  $c$  tal que, de ser verdadera la hipótesis, una desviación del estadígrafo mayor que  $c$  tendrá una pequeña probabilidad de ocurrir (nivel de significancia). De esta manera, si se produce una desviación mayor que  $c$ , se dudará de que la hipótesis sea cierta, rechazándose el modelo; por el contrario, si la desviación no excede el valor de  $c$ , no se descarta dicho modelo.

De los contrastes más usuales, el *test ji cuadrado* ( $x^2$ ) de Pearson y el *test de Kolmogorov-Smirnov* son los que se considerarán. Ambos utilizan un estadígrafo que relaciona las desviaciones del histograma de datos respecto a los valores de la distribución matemática (test  $x^2$ ) o respecto a las desviaciones entre el histograma de frecuencia acumulado de datos y la función de densidad del modelo matemático (Kolmogorov-Smirnov). Para evaluar la probabilidad con que el estadígrafo difiere o no del valor de  $c$ , se utiliza la función de densidad de probabilidad de la distribución ji-cuadrado (test  $x^2$ ) dada por la ecuación

$$f(x) = \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} x^{(n/2)-1} e^{-x/2}, 0 \leq x < \infty$$

$$f(x) = 0, x > 0$$
(7)

o mediante la función de densidad de probabilidad de la distribución dada por

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(D_n \leq x \sqrt{(n)}) = 1 - 2 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{(i-1)} e^{-(2i^2 x^2)}, x > 0$$
(8)

para el test de Kolmogorov-Smirnov. En las dos ecuaciones anteriores,  $n$  es el número de datos y  $x$  la variable, mientras que en la ecuación (7),  $\Gamma$  es la función gamma y en la (8)  $D_n$  es el estadígrafo analizado.

Para utilizar estas pruebas, es necesario definir el nivel de significancia  $\alpha$ , cuyo valor típico está entre 0.01 y 0.05, aunque suele también considerarse suficiente 0.10, dependiendo del problema analizado (Karian y Dudewicz,

1991). Comúnmente, el valor de  $\alpha$  suele representarse como porcentaje, es decir, sus valores típicos serán 1, 5 o 10%. Una vez definido el nivel de significancia se obtiene inmediatamente el valor límite  $c$ . Posteriormente se evalúa el estadígrafo de desviación y se compara con  $c$ ; si resulta ser mayor, el modelo debe ser rechazado; por el contrario, si es menor, no debe descartarse dicho modelo.

El contraste de significancia de Kolmogorov-Smirnov presenta varias ventajas sobre el contraste  $\chi^2$ , ya que el primero no agrupa los datos para luego comparar intervalos discretos, sino que compara todos los datos directamente sin alterarlos. Así mismo, el estadígrafo del test de Kolmogorov-Smirnov es más sencillo de evaluar pero, por otro lado, es estrictamente válido para distribuciones continuas; a pesar de ello se lo utiliza frecuentemente para distribuciones discretas (Benjamin y Cornell 1970).

Así pues, se han aplicado ambos test a la distribución del índice de vulnerabilidad, observándose que la distribución normal se ajusta para un nivel de significancia del 5%. Los estudios realizados mediante evaluaciones post-terremoto, como los realizados por Benedetti *et. al.*, (1988), obtienen también este mismo resultado. Se ha definido de esta manera el parámetro  $f(I_v)$  necesario para la evaluación de la ecuación (6) del riesgo sísmico.

En cuanto al parámetro  $f(I)$ , dicha función de densidad se obtiene a partir de los 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 períodos de retorno. En todo caso, se supondrá que  $f(I)$  es un elemento conocido para la ecuación (6). 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  $I$ .

Benedetti *et. al.* (1988) 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 (6). Esto permite la obtención de la probabilidad condicional de daño  $P[d | \Delta I_v, \Delta I]$ , a la manera que lo hacen las matrices de probabilidad de daño con la salvedad de que, debido a la inclusión del parámetro  $I_v$ , resultará un arreglo en tres dimensiones, concluyendo que la ecuación (6) puede discretizarse de la siguiente manera:

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

$$\times P[I_{v_i} < I_v < I_{v_{i+1}}] \times P[I_k < I < I_{k+1}] \quad (9)$$

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.

Por ahora, solo se considerará la simulación realizada para la intensidad VII, es decir que los valores de  $k$  y  $n$  de la ecuación (9) 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 encuentran 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 aprueven los contrastes de significancia anteriormente discutidos, con un nivel de significancia  $\alpha$  del 5% y para casos muy extremos con  $\alpha = 10\%$ . Las gráficas de dichos histogramas con los modelos que pueden ajustarlos, se presentan en las Figuras 12 a 16 inclusives.

Histograma de Frecuencias- I, (100-150)  
Distribucion Normal

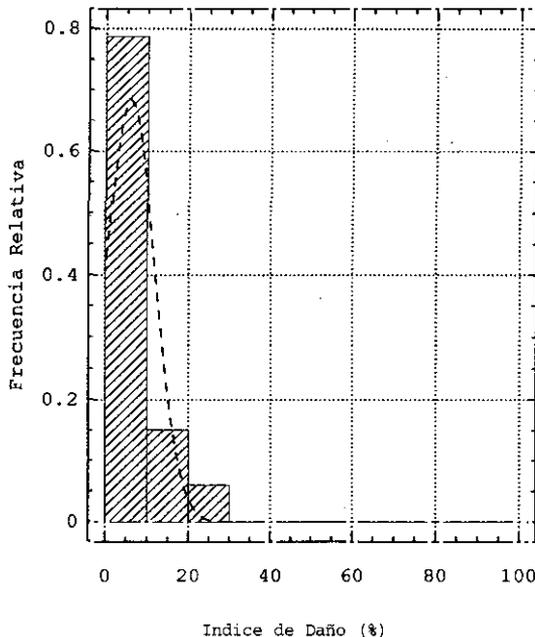


Fig. 12. Histograma de frecuencia y distribución normal del daño para valores de vulnerabilidades entre [100, 150], I = VII MSK.

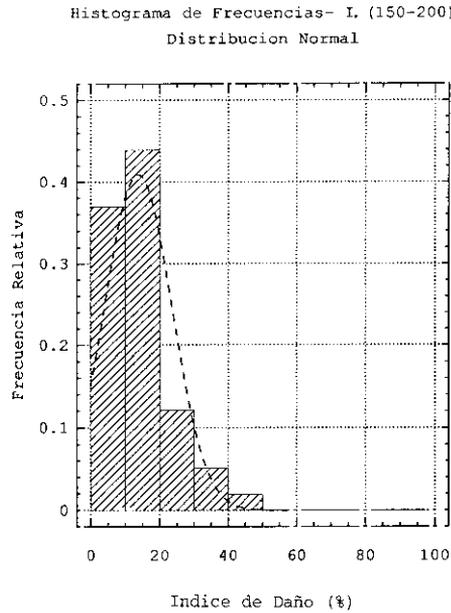


Fig. 13. Histograma de frecuencias y distribución normal del daño para valores de vulnerabilidades entre [150, 200], I = VII MSK.

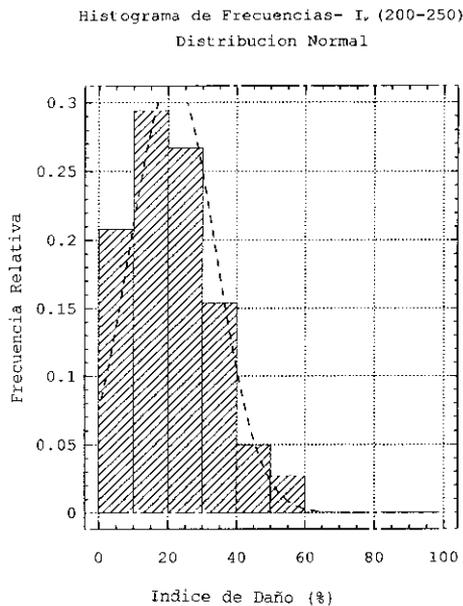


Fig. 14. Histograma de frecuencias y distribución normal del daño para valores de vulnerabilidades entre [200, 250], I = VII MSK.

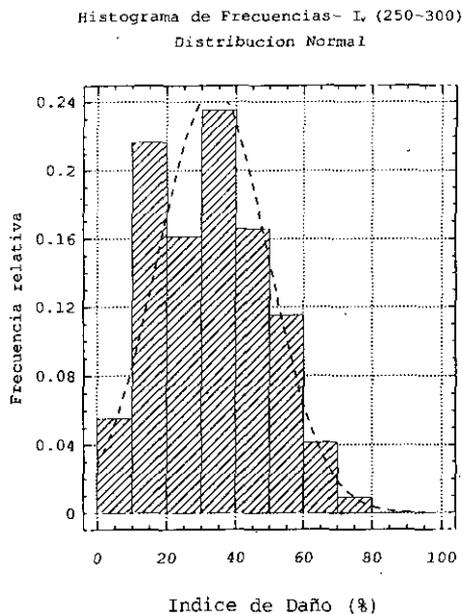


Fig. 15. Histograma de frecuencias y distribución normal del daño para valores de vulnerabilidades entre [250, 300], I = VII MSK.

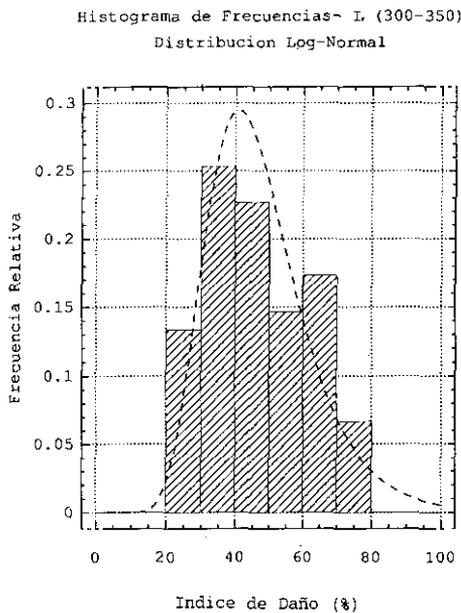


Fig. 16. Histograma de frecuencias y distribución log-normal del daño para valores de vulnerabilidades entre [300, 350], I = VII MSK.

En los edificios cuyos valores del índice de vulnerabilidad se encuentran entre 0 y 100, y superiores a 350, se dan dos casos particulares que deben estudiarse por separado:

- a) Para el rango entre 0 y 100, los valores del índice de daño que se obtienen para la intensidad VII MSK son de aproximadamente 1% y tienen dispersiones muy pequeñas. Esto responde a la idea de que estos edificios tienen la mejor calidad y presentarán el mejor comportamiento ante la sollicitación sísmica, de tal forma que el daño que pueda producirse es despreciable. Esta idea ha llevado a la definición del «*umbral del daño*» (Petrovski y Milutinovic, 1986), que es el límite del índice de daño bajo el cual este mismo índice es despreciable. Su definición ha sido necesaria debido a la dificultad de poder expresar con exactitud su valor.
- b) Para el rango superior a 350 los valores corresponden a los extremos del índice de vulnerabilidad, que indican las peores estructuras con prácticamente todos los problemas sísmicos que se pudieran presentar en un edificio y por ello, llegan fácilmente a valores del 100% del índice de daño. También aquí se produce una dispersión muy pequeña, lo que dificulta un ajuste adecuado. Este aspecto lo han enfatizado algunos estudios (Dowrick, 1991), por lo que se sugiere no estudiarlo probabilísticamente.

Como se observará más adelante, la solución de la problemática de estas dos bandas de valores se resuelve fácilmente, con tan solo la observación de los resultados que se obtienen para el resto de bandas.

Del análisis de las figuras anteriores puede verse que la distribución normal se ajusta de manera muy adecuada a todos los casos, excepto uno, en el cual no pudo cumplirse el contraste  $\chi^2$ , pero sí el Kolmogorov-Smirnov, por lo que se prefirió adoptar la distribución lognormal que sí los cumplía. Con ello se comprueba una vez más lo que diversos investigadores como Benedetti *et al.*, (1988), Dowrick (1991), Dowrick y Rhoades (1993), etc., han observado en casos reales de evaluaciones post-terremoto a gran escala.

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 (6) 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 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 (9) y con ello obtener matrices de probabilidad para rangos discretizados, mediante la evaluación de las respectivas funciones de densidad de los modelos; de esta ma-

nera 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 obtendrán los valores que se encuentran en la Tabla 4;

**TABLA 4**

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

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

- discretizando la función de densidad de los modelos que ajustan los datos del índice de daño, se obtendrá la matriz de la Tabla 5. En el eje horizontal se encuentran los rangos de discretización del índice de daño en bandas de 20% y en el vertical los rangos del índice de vulnerabilidad considerados.

**TABLA 5**

Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, del modelo ajustado a los datos simulados  
I = VII 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	0.838	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

En la Tabla 5 se ha recurrido al análisis probabilista del rango de valores de  $I_v > 350$  para los valores de la última fila, sin embargo para la primera ( $I_v < 100$ ) estudiando la lógica de los valores de la siguiente fila. Claramente, el valor de la función de densidad tiende a 1 para índices de daño de hasta el 20% y los restantes serán cero, pues no existen valores que sobrepasan dicho valor sea cual fuere la distribución que teóricamente se ajuste.

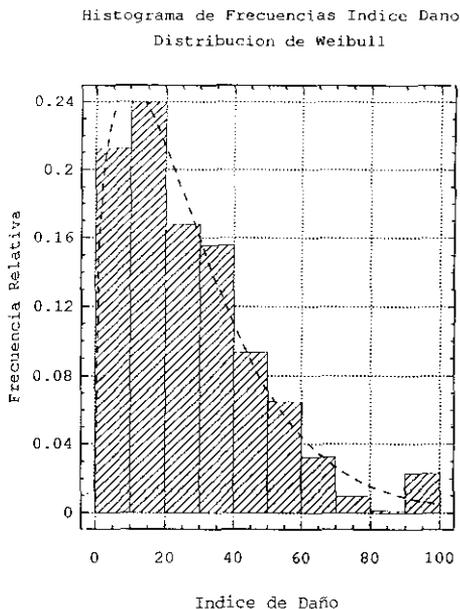


Fig. 17. Histograma de frecuencias y distribución de Weibull del daño para todos los valores del índice de vulnerabilidad,  $I = VII$  MSK.

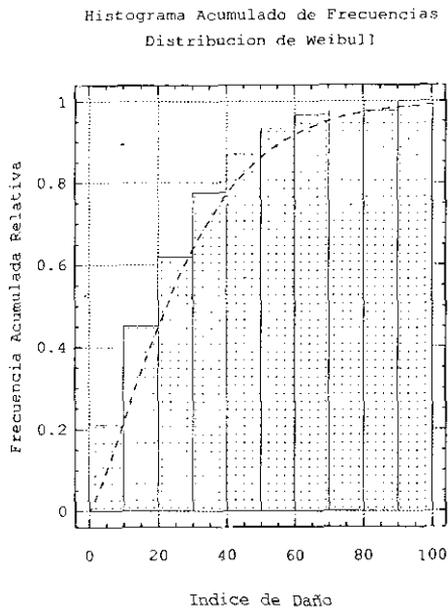


Fig. 18. Histograma de frecuencias acumuladas y función de densidad de la distribución Weibull del daño para todos los valores del índice de vulnerabilidad,  $I = VII$  MSK.

Otro resultado interesante puede surgir si se realiza un histograma genérico con la totalidad de los datos simulados, sin importar su índice de vulnerabilidad. El resultado puede observarse en las Figuras 17 y 18, donde se aprecia que el modelo que mejor se ajusta a los datos es el de la distribución Weibull. Mediante la evaluación de la función de densidad de dicha distribución matemática se obtienen las probabilidades de alcanzar rangos de daño promedio, de las estructuras de mampostería en general, para un nivel de intensidad VII MSK. Para observar mejor que dicha distribución resultar ser una media de todas las distribuciones halladas para los diferentes rangos, se grafican superpuestas en forma de funciones de densidad acumulada, tal como se muestra en la Figura 19. Este tipo de curvas se denominan *curvas de fragilidad*.

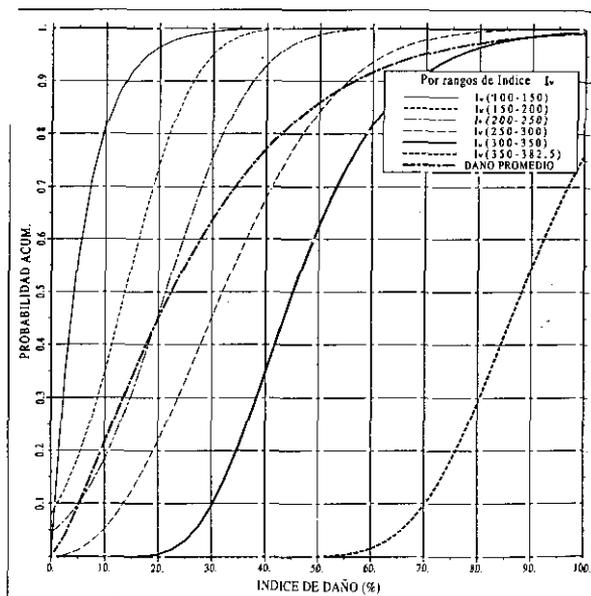


Fig. 19. Funciones de densidad de las distribuciones utilizadas para diversos rangos de vulnerabilidades y función de distribución promedio para todos los valores del índice de vulnerabilidad,  $I = VII$  MSK.

Una vez realizado todo el proceso de simulación por ordenador correspondiente al apartado anterior, 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. Un esquema gráfico que resume todo el proceso realizado hasta ahora, se presenta en la Figura 20. Dicho esquema puede ser utilizado para futuras simulaciones en cualquier lugar en el que se necesite un estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

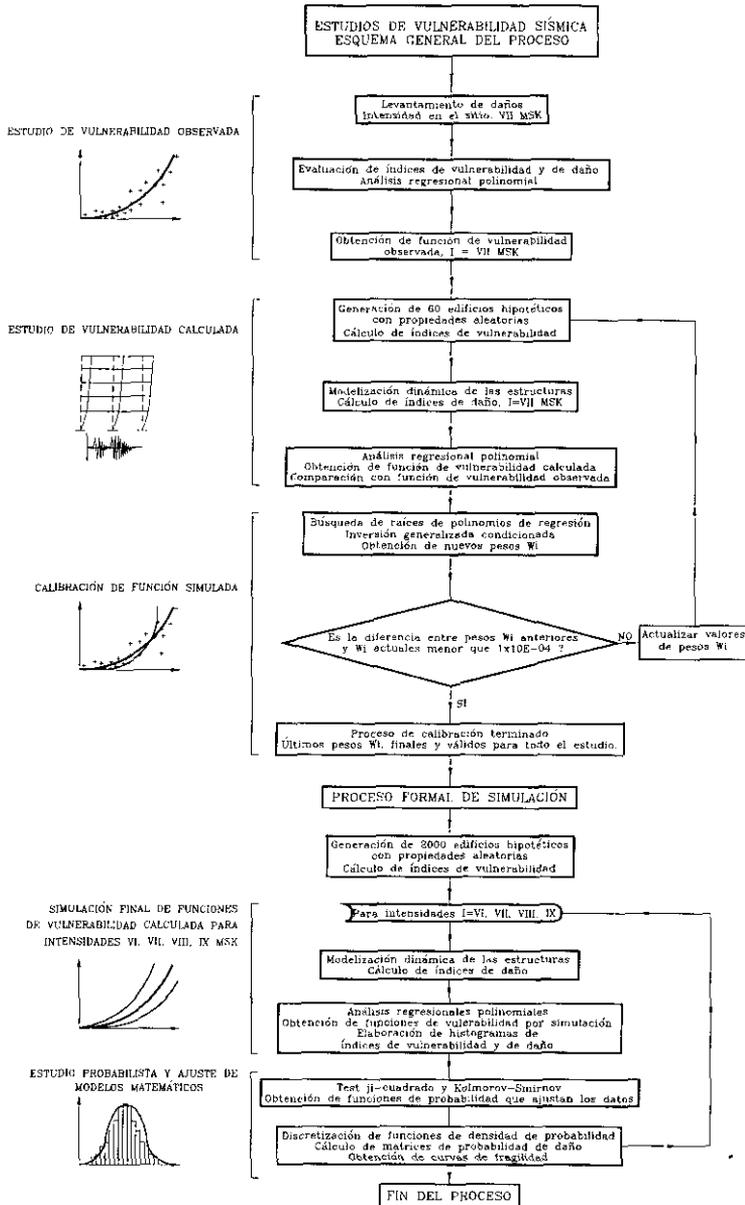


Fig. 20. Esquema completo de los estudios de vulnerabilidad observada y calculada realizados.

**TABLA 6**  
**Valores de los coeficientes de las regresiones polinómicas utilizadas e índice de correlación alcanzado**

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%

Para las restantes intensidades se han generado otros dos mil edificios hipotéticos, se ha determinado el índice de daño que sufren para cada nivel de intensidad y se han obtenido las curvas de vulnerabilidad correspondientes a la metodología italiana. Se ha procedido luego al análisis estadístico, es decir a elaborar histogramas de frecuencias, ajustes de modelos matemáticos y comprobaciones mediante los contrastes de significancia, adoptándose los mejores modelos, para luego realizar la evaluación de las funciones de densidad de probabilidad y, finalmente, obtener los valores de la función de densidad del daño condicionada por el índice de vulnerabilidad y la intensidad del sismo. Los resultados que se presentan en la figura 21 incluyen las funciones de vulnerabilidad simuladas, todas ellas representando regresiones polinómicas de la forma (Yépez *et al.*, 1995):

$$D(\%) = a_1 + a_2 I_v + a_3 I_v^2 + a_4 I_v^3 \quad (10)$$

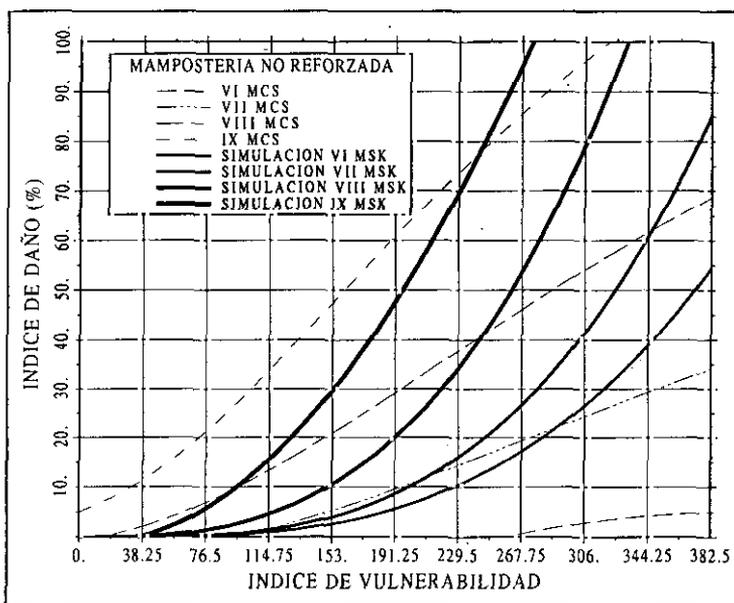


Fig. 21. Funciones de vulnerabilidad obtenidas por simulación para mampostería no reforzada y diferentes escalas de intensidad MSK. En línea entrecortada se encuentran las curvas italianas propuestas por Angelètti *et al.* (1988).

En dicha gráfica se superponen también, en líneas discontinuas, las funciones propuestas por Angeletti *et al.* (1988). En la Tabla 6 se presentan los valores de los coeficientes de las regresiones, así como los índices de correlación obtenidos. Cabe anotar la necesidad de incluir un número bastante grande de decimales, debido a los elevados valores que puede alcanzar el índice de vulnerabilidad.

Por otro lado, en las Tablas 7, 8 y 9 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 la Tabla 5), para los mismos rangos de valores considerados.

**TABLA 7**  
Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, del modelo ajustado 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	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 8**  
Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, del modelo ajustado a los datos simulados  
I = VIII 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 9**  
Valores de  $f(d | I_v, I)$  discretizados, del modelo ajustado a los datos simulados  
I = IX 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	0.445	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

Finalmente, puede también realizarse un estudio del daño promedio, similar al realizado para construir las Figuras 16 y 17, pero ahora para cada grado de intensidad macrosísmica. Si se evalúan las funciones de densidad del daño de los modelos que se ajusten a los histogramas, discretizadas para diferentes rangos del índice de daño y para cada intensidad de terremoto, pueden expresarse los resultados como matrices de probabilidad de daño, las cuales se presentan en la Tabla 10. En dicha tabla se muestran los valores de probabilidad mencionados, para los mismos rangos del índice de daño que se han estado empleando hasta ahora. Con propósitos comparativos, se presentan también en la Tabla 11 los resultados del estudio realizado por Gülkan *et al.*, (1992), a partir de los levantamientos del daño de más de 30.000 edificios ocasionados por terremotos ocurridos en los últimos 30 años en Turquía.

## 7. CONSIDERACIONES FINALES

Cada casillero de la Tabla 4 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 5 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 y para varios periodos de retorno, la solución completa de la ecuación (9) se podría obtener como una serie de productos acumulados, pudiéndose expresar un resultado como por ejemplo: «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 llega a producir un terremoto que en el sitio de emplazamiento de dicha estructura supere la intensidad VI pero que no sea mayor que VII MSK, para un período de retorno de 50 años». El mismo tipo de resultado se obtendrá para otras intensidades, considerando los valores de las Tablas de la 7 a la 9.

Dependiendo de los rangos considerados para la discretización, puede también hablarse de una probabilidad acumulada. Un ejemplo del resultado podría tener esta forma: «existe una probabilidad del 80% de que se produzcan índices de daño 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 encuentran en el rango de valores entre 200 y 300, si se produce un sismo que supere la intensidad VIII pero que no sea mayor que IX MSK, para un período de retorno de 500 años».

El resultado anterior es de extraordinaria importancia puesto que, además de expresar el daño esperado para un nivel de probabilidad, permite observar cla-

ramente cómo una intervención en 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 este valor, obtener una diferente distribución del  $I_v$  que tienda hacia valores más bajos y, por lo tanto, los niveles de daño, o las probabilidades de obtener rangos de daños altos se reducen, para la misma intensidad y con el mismo período de retorno asociado. Así mismo, dicho resultado 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.

En conclusión, para la evaluación del riesgo sísmico específico de una zona se necesita obtener, tanto la distribución del índice de vulnerabilidad de los edificios de dicha zona, que será característica propia de la misma, como la distribución de intensidades. A partir de estos datos pueden ajustarse modelos probabilistas y entrar en 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 5, 7, 8 y 9, según el nivel de la intensidad del terremoto considerado. Esto proporcionará una matriz de probabilidad de daño en tres dimensiones, con los niveles de daño, los rangos de vulnerabilidades y las 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.

Otro mecanismo para la evaluación del riesgo sísmico es el utilizar los denominados escenarios de daño, que no son más que esquemas gráficos del proceso de convolución, los cuales muestran todos los niveles de daño medio alcanzables según los valores de la intensidad considerada, haciendo uso de las funciones de vulnerabilidad obtenidas en este estudio (Figura 21); la probabilidad de desarrollar dichos escenarios vendrá proporcionada por el período de retorno del terremoto cuya intensidad se considere.

Sobre las funciones de vulnerabilidad obtenidas mediante la simulación en el ordenador (Figura 21), puede observarse que proporcionan valores del índice de daño más alto que las propuestas por Angeletti *et al.* (1988) para niveles de intensidad VI y VII, mientras que, para niveles más altos (VIII y IX) los valores del índice de daño proporcionado por unas u otras depende del rango de valores del índice de vulnerabilidad considerado. Sin embargo, es interesante también notar que todas las curvas, tanto las simuladas como las italianas, están dentro de una cierta zona común del plano cartesiano, lo que indica que, al menos no existe una abrumadora discrepancia entre ellas. Otra

característica importante es, que las curvas simuladas tienen siempre pendiente creciente positiva, mientras que las italianas presentan una pendiente creciente positiva tan sólo en su primera fase, observándose más tarde un punto de inflexión y luego un cambio hacia una pendiente decreciente positiva. La razón de este punto de inflexión y la tendencia posterior de las curvas italianas no es muy comprensible, más bien, podría pensarse que mientras peor sea la calidad de los edificios, es decir, mientras aumente el valor del índice de vulnerabilidad de los mismos, su comportamiento ante cargas laterales debe empeorar, no linealmente, sino de una manera más drástica, como en efecto sucede en los resultados conseguidos mediante el modelo utilizado para la simulación.

Si se analiza el distanciamiento entre las curvas italianas pertenecientes a distinta intensidad, puede apreciarse una relativa separación constante entre unas y otras, característica que no ocurre en el caso de las curvas simuladas. Lo que se observa es que, conforme aumenta la intensidad del terremoto, aumenta también la distancia entre dichas curvas. Este fenómeno podría explicarse, debido a la no linealidad de los grados de la escala de intensidad. Sin embargo, se debe destacar que las funciones italianas se han obtenido a partir del estudio estadístico de casos reales para intensidades VII y IX MCS, mientras que para el resto de niveles, las curvas han sido interpoladas.

Un último aspecto que hay que mencionar sobre las curvas italianas es que no parten del origen de coordenadas, es decir que, en teoría, existe un valor del índice de daño distinto de cero (como en el caso de la curva de intensidad IX), para una estructura con un hipotético índice de vulnerabilidad nulo. Este hecho físicamente no es posible, por lo que se debió tomar en cuenta en las regresiones realizadas por los investigadores italianos.

**TABLA 10**

**Matriz de probabilidad de daño obtenida del modelo ajustado a la totalidad de los datos, para varias intensidades**

$P(d   I)$	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
VIMSK	0.75	0.21	0.01	0.00	0.00
VIIIMSK	0.45	0.32	0.14	0.06	0.02
VIIIMSK	0.15	0.25	0.33	0.20	0.07
IXMSK	0.00	0.05	0.10	0.42	0.43

Finalmente, estudiando el análisis global efectuado en las Figuras 17 y 18, puede observarse que el resultado representa un valor promedio del índice de daño que se puede alcanzar una vez ocurrido un sismo, lo cual se comprueba al graficar las curvas de fragilidad (Figura 19); dicho valor promedio no depende entonces, del índice de vulnerabilidad. El valor promedio así obtenido puede ser muy útil a la hora de las primeras y rápidas evaluaciones que se necesitan inmediatamente después de ocurrido el terremoto, permitiendo una rá-

pida estimación del tamaño promedio de las pérdidas de toda una zona. Así mismo, discretizando la función de densidad del modelo que se ajusta, pueden obtenerse matrices de probabilidad de daño, como la de la Tabla 10, similares a las que se obtienen mediante otros métodos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras. Si se comparan estos resultados con los obtenidos por Gülkan *et al.* (1992) (Tabla 11), puede observarse una relativa similitud entre los valores, especialmente para las intensidades VI, VII y VIII no así para la intensidad IX. Las diferencias entre todos los valores se deben básicamente a la diferente distribución de vulnerabilidades de los edificios, puesto que la distribución aquí utilizada proviene de valores de parámetros aleatorios, mientras que los edificios de Turquía no tienen por qué responder a la misma distribución obtenida y ajustada mediante la simulación. A pesar de que Gülkan *et al.* (1992), no utilizaron el método del índice de vulnerabilidad, sino que utilizaron otro tipo de método, clasificando los edificios en diferentes tipologías y para los cuales realizaron un estudio estadístico de los valores del daño observado, la relativa similitud entre ciertos valores de las matrices de probabilidad de daño es indicativo de que los otros métodos pueden tratarse como un caso particular de la metodología italiana. Puede, por consiguiente, plantearse que el método del índice de vulnerabilidad es mucho más general y más eficiente para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios comparado con otros métodos.

TABLA 11

Matriz de probabilidad de daño para edificios de mampostería de ladrillo propuesta por Gülkan *et al.* (1992)

$P(d   I)$	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 100
VIMSK	0.80	0.15	0.05	0.00
VIIIMSK	0.40	0.35	0.23	0.02
VIIIMSK	0.20	0.30	0.40	0.10
IXMSK	0.05	0.15	0.50	0.30

Como se ha podido observar, 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 de comportamiento utilizado para la mampostería no reforzada. Los resultados obtenidos son bastante lógicos y dentro de lo que se esperaba; sin embargo, cabe 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 que se ha desarrollado aquí. 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.

## AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este estudio ha sido financiada parcialmente por el Servicio Geológico de la Generalitat de Catalunya. Las discusiones técnicas con los Doctores Antoni Roca y Xavier Goula han sido muy clarificadoras. El apoyo prestado por el personal del Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, en especial de su director el Dr. Francisco Vidal y de todas las autoridades de Defensa Civil y Municipales de Adra y Berja ha sido muy importante para el desarrollo del trabajo relativo a la provincia de Almería.

## REFERENCIAS

- ABRAMS, D. (1992): «Strength and behaviour of unreinforced masonry elements», *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, 10WCEE, 7, 3475-3480, Madrid.
- ANGELETTI, P.; BELLINA, A.; GRANDORI, E.; MORETTI, A., y PETRINI, V. (1988): «Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results», *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, 9WCEE, 7, 181-186, Tokyo.
- BENEDETTI, D.; BENZONI, G. M., y PARISI, M. A. (1988): «Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 186-201.
- BENEDETTI, D., y PETRINI, V. (1984): «Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione», *L'industria delle Costruzioni*, 149, 66-74.
- BENJAMÍN, J. R., y CORNELL, C. A. (1970): «Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers», McGraw-Hill Book Company, New York.
- BRAGA, F.; DOLCE, M.; FABRIZI, C., y LIBERATORE, D. (1986): «Evaluation of a conventionally defined vulnerability of buildings based on surveyed damage data», *Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering*, 8ECEE, 1, 2.3/33-2.3/40, Lisbon.
- CAICEDO, C.; CANAS, J. A.; BARBAT, A. H.; YÉPEZ, F.; GOULA, X., ROCA, A., y MAÑA, F. (1994): «Seismic vulnerability assessment of buildings in Barcelona», *Proceedings of Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, Viena.
- CHUNG, Y. S., y SHINOZUKA, M. (1988): «Automatic Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings», *National Center for Earthquake Engineering Research Center*, Technical Report NCEER-88-0024, State University of New York at Buffalo.
- DOWRICK, D. (1991): «Damage cost for houses and farms as a function of intensity in The 1987 Edgcomb Earthquake», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 455-469.
- DOWRICK, D., y RHOADES, D. (1993): «Damage cost for commercial and industrial property as a function of intensity in The 1987 Edgcomb Earthquake», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 869-884.
- GÜLKAN, P.; SUCUOĞLU, H., y ERGÜNAY, O. (1992): «Earthquake vulnerability, loss and risk assessment in Turkey», *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, 10WCEE, 1, 539-543, Madrid.
- HENDRY, W. A. (1990): *Structural Masonry*, MacMillan Education Ltd., Londres.
- KARIAN, Z., y DUDEWICZ, E. (1991): *Modern Statistical Systems and GPSS Simulation*, computer Science Press, New York.
- MANFREDI, G.; MAZZOLANI, S., y MASI, A. (1992): «Review of existing in experimental testing of masonry structures subjected to horizontal loads», *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, 10WCEE, 6, 3557-3562, Madrid.
- PETROVSKI, J., y MILUTINOVIC, Z. (1986): «Earthquake vulnerability and loss assesment for physical and urban planning», *Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Enginerring*, 8ECEE, 1, 2.3/9-2.3/16, Lisbon.

- ROMANO, F.; GANDUSCIO, S., y ZINGONE, G. (1993): «Cracked non-linear masonry stability under vertical and lateral loads», *Journal of Structural Divison, ASCE*, 119, 69-87.
- YÉPEZ, F.; BARBAT, A. H., y CANAS, J. A. (1994): *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*, Monografía de Ingeniería Sísmica IS-12, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, Barcelona.
- YÉPEZ, F.; BARBAT, A. H., y CANAS, J. A. (1995): *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.