

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA BASADO EN LA OPINIÓN DE EXPERTOS*

SEISMIC VULNERABILITY RATE IN MASONRY BUILDINGS BASED ON EXPERTS' OPINION

*Esperanza Maldonado Rondón***

*Gustavo Chio Cho****

*Iván Gómez Araujo*****

Resumen: en este trabajo se presenta un modelo rápido y sencillo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería a escala regional. El modelo fue construido de forma que puede ser aplicado especialmente a zonas donde no se cuenta con información de daños sísmicos reales. El método se basa en la identificación de las características más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá una edificación de mampostería bajo la acción de un sismo. La valoración de estas características se realizó mediante la determinación de once parámetros, a los cuales se les asignó un grado de vulnerabilidad y un valor de importancia relativa con base en la opinión de expertos. Debido a las imprecisiones y subjetividad de las opiniones, éstas fueron proce-

* *Fecha de recepción: 1 de marzo de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 16 de junio de 2007. Este artículo es derivado del proyecto de investigación Zonificación del riesgo sísmico en centros urbanos utilizando funciones de vulnerabilidad calculadas. El escenario de estudio fue Bucaramanga, Colombia y fue financiado por Colciencias, 2006.*

** *Ingeniera civil y especialista en Docencia Universitaria, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Master en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Colombia. Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, España. Profesora titular, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: emaldona@uis.edu.co*

*** *Ingeniero civil y especialista en Docencia Universitaria, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, España. Profesor asociado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: gchioch@uis.edu.co*

**** *Ingeniero civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Joven investigador, Grupo de Investigación INME, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: igomez19@hotmail.com*

sadas mediante técnicas difusas. Una vez calificados cada uno de los parámetros, se procedió a relacionar sus calificaciones con su valor de importancia por medio de un promedio ponderado difuso. El resultado de esta relación a partir de técnicas basadas en conjuntos difusos corresponde al índice de vulnerabilidad de la edificación de mampostería.

Palabras clave: vulnerabilidad sísmica, conjuntos difusos, mampostería.

Abstract: The aim of this paper is to develop a simple model to assess seismic vulnerability of masonry buildings to regional scale. This model was especially made for areas where current reports of seismic damages of masonry buildings do not exist. The method is based on the identification of the most influential characteristics associated with the damage in a masonry building under the action of an earthquake. The evaluation of these characteristics was carried out by means of the determination of eleven parameters. A vulnerability degree and an importance value based on the opinion of experts was assigned to each of the 11 parameters. Due to the imprecision and subjectivity of the opinions, these data were processed by using fuzzy techniques. Once each one of the parameters was qualified, the qualifications of the parameters were related to their value of importance by means of a fuzzy weight average. The result of this relationship, according to techniques based on fuzzy set, is the masonry building vulnerability index.

Key words: Seismic vulnerability, fuzzy set, masonry.

INTRODUCCIÓN

Al ser las edificaciones de mampostería una de las tipologías más frecuentes en las ciudades colombianas, surge la necesidad de realizar estudios conducentes a valorar su vulnerabilidad sísmica. Además, no se debe pasar por alto que una buena cantidad de estas edificaciones han sido diseñadas y construidas sin considerar los lineamientos sismorresistentes necesarios para su buen desempeño durante la ocurrencia de un sismo.

Los estudios de vulnerabilidad son recientes, y debido a su importancia se han convertido hoy en día en uno de los principales frentes de investigación en ingeniería sísmica. La mayoría de los estudios de vulnerabilidad de edificaciones de mampostería están basados en datos obtenidos a partir de inventarios actualizados de las estructuras y de daños registrados ante efectos sísmicos; sin embargo, estos estudios sólo son aplicables a las zonas de donde provienen los datos obtenidos. Por esta razón es importante proponer una metodología adaptable a regiones donde no se cuente con suficiente información sobre daños de estructuras.

El objetivo principal de esta investigación es presentar una metodología para estimar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de un área determinada. El modelo se basa en definir las características más relevantes de una estructura de mampostería que pueden influir en su vulnerabilidad sísmica. Las características citadas se han determinado mediante la elección de once parámetros, obtenidos de metodologías existentes, estudios de

comportamiento de edificaciones de mampostería de entornos nacionales y de la opinión de expertos. Los parámetros se clasificaron de acuerdo con tres o cuatro condiciones de calidad, a las que se les asignó un grado de vulnerabilidad determinado y, a su vez, para cada parámetro se definió su valor de importancia. Estos grados de vulnerabilidad y valores de peso se identificaron a partir de opiniones de expertos.

Dado que el modelo propuesto involucra opiniones de expertos y su posterior aplicación se basa en la respuesta de un formulario donde se califica cada parámetro, se decidió utilizar técnicas basadas en conjuntos difusos. Dentro de éstos se utilizó el *peso promedio difuso* como medio para el cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica. Este índice es la relación entre el grado de vulnerabilidad de cada parámetro y su valor de importancia.

1. PARÁMETROS DEL MODELO

Para establecer los parámetros que tienen mayor influencia en la vulnerabilidad sísmica de una estructura de mampostería se llevaron a cabo cuatro etapas: (1) identificación de los parámetros de mayor relevancia en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería, propuestas internacionalmente por otras metodologías; (2) estudio del comportamiento sísmico de algunas configuraciones de estructuras de mampostería; (3) establecimiento de las clasificaciones o las condiciones de calidad de cada parámetro, y (4) evaluación de la importancia de cada uno de los parámetros, al igual que las clasificaciones a partir de las opiniones de expertos (Maldonado, Chio y Gómez, 2007).

1.1 METODOLOGÍAS EXISTENTES DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

Hoy en día existen numerosas metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica a gran escala que se aplican a edificaciones de mampostería. Entre ellas se encuentran: FEMA-154 (1988), EMS-98 (European Seismological Commission, 1998), índice de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini (1984), Cardona y Hurtado (1990), AIS (AIS y FOREC, 2001) y la ATC-13 (Applied Technology Council, 1985). Éstas se basan en parámetros asociados con características geométricas, constructivas, estructurales, de cimentación, de suelos y de pendiente de las edificaciones. A partir del análisis de los parámetros que cada una de las metodologías incorporan se identificaron los más relevantes, como son el tipo y la capacidad del sistema estructural, la irregularidad en planta y la elevación y el tipo de suelo.

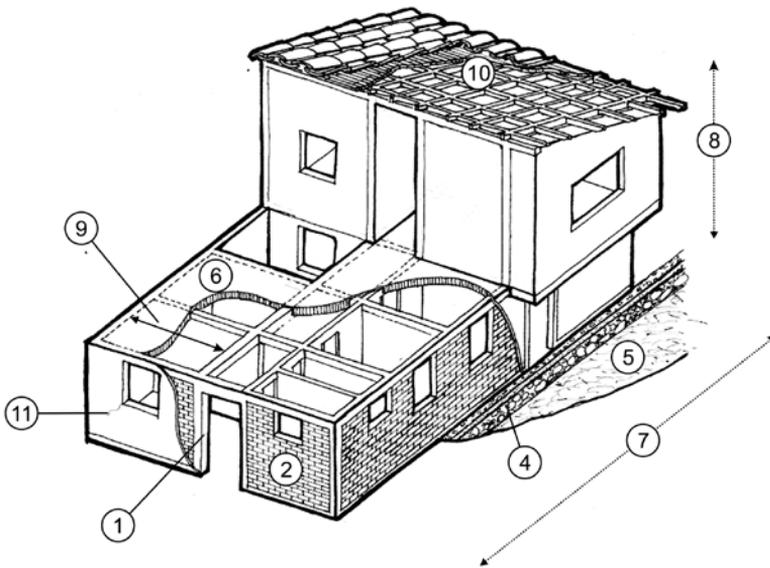
1.2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA

Identificados los parámetros relevantes en los modelos existentes de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mam-

postería, se realizaron estudios de caracterización dinámica y de respuesta ante la acción del sismo, de manera que se identificara la influencia de los parámetros hasta el momento identificados (Abreo y Arguello, 2003; Carreño y Rodríguez, 2003; Ardila y Méndez, 2003; Castellanos y García, 2003), con el objetivo de analizar la influencia de los parámetros en su comportamiento ante la acción de un sismo. Este análisis fue realizado a una muestra de edificaciones de sistemas estructurales de mampostería confinada y no confinada de la ciudad de Bucaramanga, que corresponde al sistema presente en varias de las ciudades colombianas.

De los resultados obtenidos se observó la gran influencia que tienen el confinamiento o refuerzo de la mampostería, la distribución de los muros en las dos direcciones, el sistema de apoyo de las edificaciones en ladera y la irregularidad tanto en planta como en elevación. De esta manera, se identificaron inicialmente once parámetros como los de mayor influencia en la valoración de la vulnerabilidad sísmica (Figura 1).

Figura 1. Parámetros del modelo de vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería



- | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| (1) Sistema estructural | (7) Configuración en planta |
| (2) Calidad del sistema resistente | (8) Configuración en elevación |
| (3) Resistencia estructural | (9) Distancia máxima entre los muros |
| (4) Posición de la cimentación | (10) Tipo de cubierta |
| (5) Suelo y pendiente del terreno | (11) Estado de conservación |
| (6) Diafragmas horizontales | |

Fuente: presentación propia de los autores.

La definición de los parámetros se complementó finalmente con el estudio del comportamiento estructural de la mampostería y las opi-

niones de expertos. De esta manera los once parámetros seleccionados inicialmente fueron ratificados.

1.3 DETERMINACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES DE CADA PARÁMETRO

Una vez seleccionados los once parámetros del modelo, a cada uno de ellos se le dividió en tres o cuatro condiciones de calidad (A, B, C y D) (Maldonado, Chio y Gómez, 2007). Así, por ejemplo, según el análisis efectuado para los diferentes sistemas estructurales planteados se estimaron los siguientes grados de vulnerabilidad para el parámetro 1, que considera el sistema estructural:

- A. Edificación en mampostería reforzada o confinada en todas las plantas.
- B. Edificación en mampostería que no posee vigas de confinamiento en alguna de las plantas o no posee columnas de confinamiento en los pisos superiores.
- C. Edificación en mampostería que no posee columnas de confinamiento en ninguna de las plantas o el piso inferior.
- D. Edificación en mampostería que no posee vigas y columnas de confinamiento en ninguna de las plantas.

1.4 OPINIÓN DE EXPERTOS

Después de realizadas las clasificaciones de los once parámetros se determinó el grado de vulnerabilidad de cada una de las clasificaciones dentro del parámetro y, a su vez, se valoró la importancia de los parámetros dentro de la estimación de la vulnerabilidad total de una edificación. Para tal fin se acudió a la experiencia y opinión de expertos en el tema (Maldonado, Chio y Gómez, 2007).

Las opiniones de los diferentes expertos fueron recopiladas mediante encuestas a expertos de la región, de Colombia y de otros países (como México, Chile, Argentina, Puerto Rico, Estados Unidos, Italia, Perú y Venezuela), quienes cuentan con un buen conocimiento del tema y una adecuada experiencia en el campo de trabajo. La muestra total estuvo integrada por 85 expertos, con una tasa de respuesta del 26%. Sus opiniones fueron recopiladas mediante dos encuestas: una cuyo objetivo era comparar el grado de vulnerabilidad (*nada, poco, medianamente, muy y absolutamente* vulnerable) de cada una de las clasificaciones (A, B, C y D) para un determinado parámetro (K_j) y otra, que tenía como propósito conocer la importancia relativa que existe entre los diferentes parámetros. Dado que no se puede pasar por alto el grado de subjetividad de las opiniones, se utilizó la teoría de los conjuntos difusos para su procesamiento (Terano, Asai y Sugeno, 1992; Zadeh, 1965).

2. MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

El modelo propuesto se construye a partir de una representación íntegra de la información necesaria para obtener una cuantificación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería llamado *índice de vulnerabilidad*. Su cálculo está basado en la relación del grado de vulnerabilidad de los diferentes parámetros y su respectivo valor de importancia.

La aritmética difusa (Bandemer y Gottwald, 1996) se utilizó para relacionar las calificaciones de cada parámetro con su respectivo valor de importancia. El método tradicional para combinar información difusa con diferentes pesos o importancia es el llamado *promedio ponderado difuso*, utilizado en este modelo para calcular el índice de vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería, que se expresa como:

$$IV = \frac{\sum_{i=1}^{11} K_i W_i}{\sum_{i=1}^{11} W_i} \quad (1)$$

Donde:

IV : índice de vulnerabilidad sísmica de la edificación de mampostería.

K_i : medida del grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro i .

W_i : medida de la importancia asociada con el parámetro i con respecto a los demás parámetros.

2.1 ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El cálculo del peso promedio difuso para la evaluación del índice de vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería se realizó de la siguiente manera:

- Se trasladaron a conjuntos difusos las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los once parámetros, mediante la definición de las correspondientes funciones de pertenencia. Estas funciones se construyeron a partir de las opiniones de los expertos (Maldonado, Chío y Gómez, 2007).
- Se convirtieron a conjuntos difusos las variables de importancia de cada parámetro, mediante las funciones de pertenencia. De igual manera que en el punto anterior, estas funciones de pertenencia se elaboraron con base en la opinión de expertos.
- Se combinaron las variables de calificación y las variables de importancia difusas para obtener un conjunto difuso que represente el sistema completo, mediante la Ecuación 1. Esta combinación da como resultado un conjunto difuso llamado *índice de vulnerabilidad*.
- Se transformó el índice de vulnerabilidad resultante en una expresión lingüística como *nada*, *poco*, *medianamente*, *muy* y *absolutamente* vulnerable. La transformación de un conjunto difuso en una

expresión lingüística natural es un proceso relativamente simple, que involucra la determinación de la distancia del conjunto difuso resultante a cada uno de los conjuntos difusos que representan las expresiones lingüísticas citadas. La mínima distancia entre el conjunto difuso resultante y los conjuntos difusos que representan las variables lingüísticas es la expresión lingüística a la que se le asocia el índice de vulnerabilidad.

- Se asoció la variable lingüística con el índice de vulnerabilidad calculado de un valor numérico no difuso. Esto se realizó escogiendo como valor numérico el centro de gravedad de la función de pertenencia resultante del cálculo del peso promedio difuso.

2.2 VARIABLES LINGÜÍSTICAS UTILIZADAS

En la realización de las encuestas a los expertos y en el cálculo del índice de vulnerabilidad fue necesario definir adecuadamente las variables lingüísticas para describir los diferentes grados de vulnerabilidad. Éstas se usaron para calificar las condiciones de calidad impuestas a cada parámetro. Así, las seleccionadas para calificar los grados de vulnerabilidad fueron *nada*, *poco*, *medianamente*, *muy* y *absolutamente* vulnerable. Cada una de estas variables requirió la asignación de un valor numérico, escogido arbitrariamente en una escala comprendida entre 0 y 10. Los valores numéricos asignados a cada variable para recopilar la información de los expertos fueron:

- 0 Nada vulnerable
- 3 Poco vulnerable
- 5 Medianamente vulnerable
- 7 Muy vulnerable
- 10 Absolutamente vulnerable

En esta investigación, los conjuntos difusos que representan las variables relativas al grado de vulnerabilidad se asumieron como:

- Nada = {1 | 0, 0 | 3}
- Poco = {0 | 0, 1 | 3, 0 | 5}
- Medianamente = {0 | 3, 1 | 5, 0 | 7}
- Muy = {0 | 5, 1 | 7, 0 | 10}
- Absolutamente = {0 | 7, 1 | 10}

De la forma:

$$y = \{\mu(x) \mid x\} \tag{2}$$

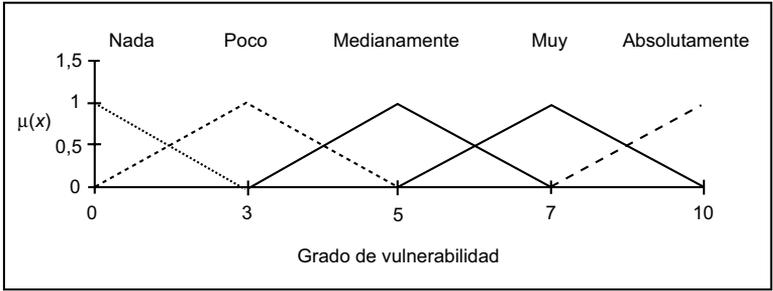
Donde:

$\mu(x)$: grado de pertenencia de x .

x : universo de la vulnerabilidad de la edificación en los conjuntos difusos.

La representación gráfica de las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas utilizadas en este estudio se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Funciones de pertenencia de las variables lingüísticas nada, poco, medianamente, muy y absolutamente vulnerable

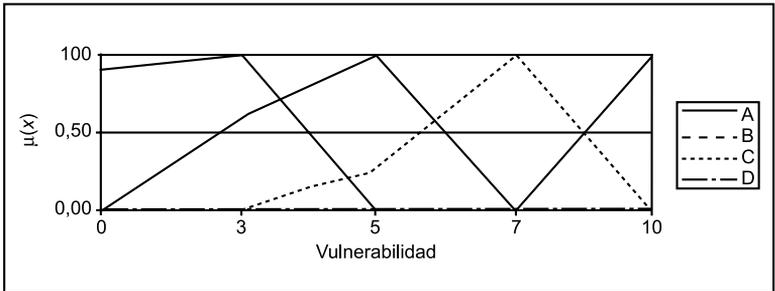


Fuente: presentación propia de los autores.

2.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA

Para construir las funciones de pertenencia se aprovechó la información obtenida de las encuestas hechas a los expertos. Los valores de pertenencia se calcularon a partir del número de respuestas favorables de cada clasificación particular (Maldonado, Chío y Gómez, 2007). En la Figura 3 se presentan las funciones correspondientes a los grados de vulnerabilidad de las clasificaciones correspondientes al parámetro 11, el cual considera el estado de conservación de las edificaciones.

Figura 3. Funciones de pertenencia para las clasificaciones A, B, C y D del parámetro 11



A: muros en buena condición, sin fisuras visibles.

B: muros con fisuras no extendidas.

C: muros con fisuras entre 2 y 3 mm de ancho o un estado mediocre de conservación de la mampostería.

D: muros con fisuras con más de 3 mm de ancho o con un fuerte deterioro en sus materiales constituyentes.

Fuente: presentación propia de los autores.

Una vez construidas las funciones de pertenencia de los parámetros, se incorporaron dentro del algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería.

3. FORMA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO

Para aplicar el modelo es necesario realizar el inventario de las edificaciones de mampostería que se desean evaluar. Este inventario se lleva a cabo mediante un formulario (Figura 4) que contiene todas las características para evaluar los once parámetros necesarios para determinar el índice de vulnerabilidad de la edificación respectiva.

Figura 4. Formulario de levantamiento de la información de las edificaciones

Nombre del encuestador:		Código	
Fecha:		Hora de inicio	Hora de terminación

Zona	Barrio (Cód.)	Manzana (Cód.)	Hoja	de
------	---------------	----------------	------	----

Mampostería

I. Organización del sistema resistente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Presentar vigas y columnas de confinamiento en todas las plantas																
- Vigas o confinamiento sin columnas; o																
- Columnas sin vigas de confinamiento; o																
- Posee vigas y columnas de confinamiento pero no en todas las plantas																
No posee confinamiento en ninguna de las plantas																
II. Estado de conservación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Muros en buena condición, sin fisuras visibles																
Muros que presentan fisuras no extendidas																
Muros con fisuras de tamaño medio entre 2 a 3 mm de ancho o que presenten un estado mediocre de conservación																
Muros que presenten un fuerte deterioro de sus materiales constituyentes o fisuras de más de 3 mm de ancho																
III. Calidad del sistema resistente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Homogeneidad																
Todas las unidades de mampostería dentro del muro son del mismo tipo, y posee dimensiones constantes y correcta colocación																
Existen dos tipos de unidades mampostería dentro del muro, o Menos del 50% de las unidades tienen dimensiones diferentes o Incorrecta colocación.																
Existen tres tipos de unidades o más dentro de los muros, o Más del 50% de las unidades del muro tienen dimensiones o Incorrecta colocación.																
Ligamento																
Presencia de buen ligamento																
El mortero evidencia separación con las piezas de mampostería																
No existen juntas con mortero verticales u horizontales en algunas zonas del muro																
IV. Elementos No estructurales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ausencia de elementos no estructurales																
Existen estructuras en la parte superior de pequeña dimensión y de peso modesto (Ej. Tanques elevados de plástico)																
Edificación con balcones salidos menos de 1 m																
Existen estructuras en la parte superior de peso significativo (Ej. Tanques elevados de asbesto o concreto)																
Edificación con balcones salidos más de 1 m.																
V. Diafragma horizontal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Losa Maciza (Espesor entre 0.1 m y 0.20 m)																
Losa aligerada (Espesor mayor de 0.20 m)																
Losa prefabricada (Sección tipo T)																
Sin diafragma																
VI. Tipo de cubierta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Losa de concreto																
Liviana, con zinc o eternit																
Pesada con teja de barro																
VII. Datos Numéricos																
Número de pisos																
Altura 1er. Piso (m)																
VIII. Cimentación																
La fundación está ubicada a una misma cota																
La diferencia máxima de las cotas de fundación es inferior a un 1 m.																
La diferencia máxima de las cotas de fundación es superior a un 1 m																
IX. Entorno																
Presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén																
Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén																

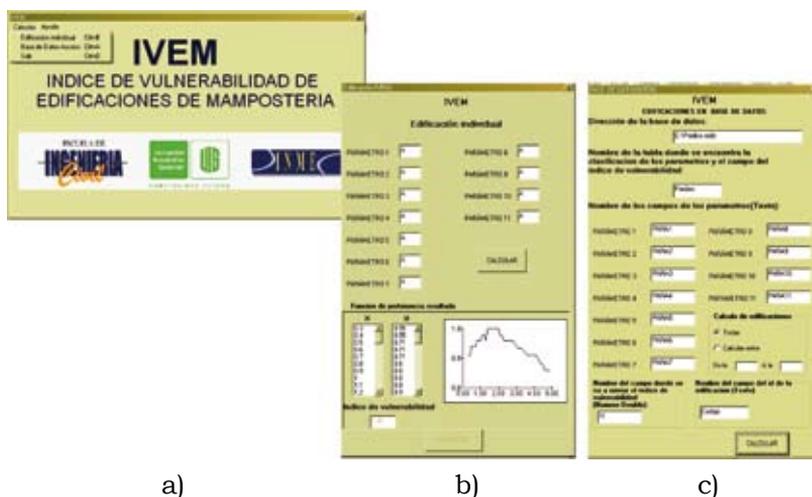
Fuente: presentación propia de los autores.

3.1 PROGRAMA IVEM PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

El programa IVEM se concibió con el fin de incorporar todas las operaciones aritméticas necesarias entre conjuntos difusos para calcular el peso promedio difuso, además de realizar el proceso para expresar mediante un valor numérico el índice de vulnerabilidad. Las funciones de pertenencia se convierten en un insumo del programa y con las clasificaciones de cada parámetro se escogen las funciones respectivas y se calcula el índice de vulnerabilidad.

El IVEM fue realizado en lenguaje de programación Visual Basic. Está conformado por dos ventanas que subyacen en el menú “cálculos”. La primera de ellas es denominada *edificación*, diseñada para realizar el cálculo del índice de vulnerabilidad para una edificación individual. La segunda se denomina *base de datos* y permite calcular los índices de vulnerabilidad de un conjunto de edificaciones que se encuentran en una base de datos de Microsoft Office Access (Figura 5).

Figura 5. Interfaz del programa IVEM: (a) presentación, (b) ventana para evaluar la vulnerabilidad de una edificación y (c) ventana para evaluar la vulnerabilidad de varias edificaciones en base de datos



Fuente: presentación propia de los autores.

La ventana *edificación* necesita como datos la clasificación (A, B, C y D) de cada uno de los parámetros de los cuales se compone el índice de vulnerabilidad. Los resultados arrojados luego de solicitar el cálculo se componen de la función de pertenencia final que define el índice de vulnerabilidad, la cual puede ser graficada, y el valor numérico de la vulnerabilidad, producto de descomponer los resultados del proceso difuso de la función de pertenencia.

La ventana *base de datos* requiere la siguiente información de entrada: dirección completa del lugar donde se encuentra alojada la base de datos, nombre de la tabla donde se encuentra la clasificación de cada uno de los parámetros y del campo adonde se va a enviar el valor del índice de vul-

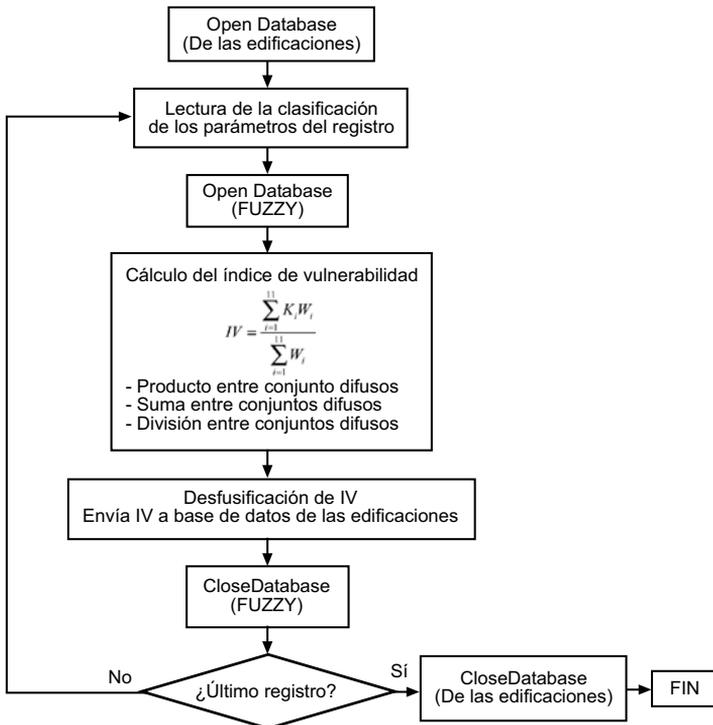
nerabilidad, nombre de los campos de los parámetros, nombre del campo adonde se va a enviar el índice de vulnerabilidad y nombre del campo del ID o código de la tabla. Cada uno de los campos dentro de la tabla de la base de datos debe poseer un tipo de variable. Se tiene la opción de realizar un cálculo completo de todas las edificaciones dentro de la base de datos o de algunas en particular.

3.2 ALGORITMO DEL PROGRAMA

Para el cálculo en la ventana base de datos, el IVEM toma la información necesaria de la base de datos donde se encuentran las clasificaciones de los parámetros. A su vez, el IVEM requiere leer las funciones de pertenencia tanto de las calificaciones de los parámetros como sus valores de importancia; estas funciones se encuentran alojadas en otra base de datos denominada FUZZY, que el programa ubica en su carpeta al momento de ser instalado.

La selección de la funciones de pertenencia para realizar el cálculo del índice de vulnerabilidad varía de acuerdo con las clasificaciones de los parámetros. Seleccionadas las funciones de pertenencia, realiza los cálculos respectivos entre conjuntos difusos. Finalmente, descompone el resultado del proceso difuso de la función de pertenencia final y obtiene un valor numérico del índice de vulnerabilidad que envía a la base de datos de las edificaciones (Figura 6).

Figura 6. Algoritmo del programa IVEM



Fuente: presentación propia de los autores.

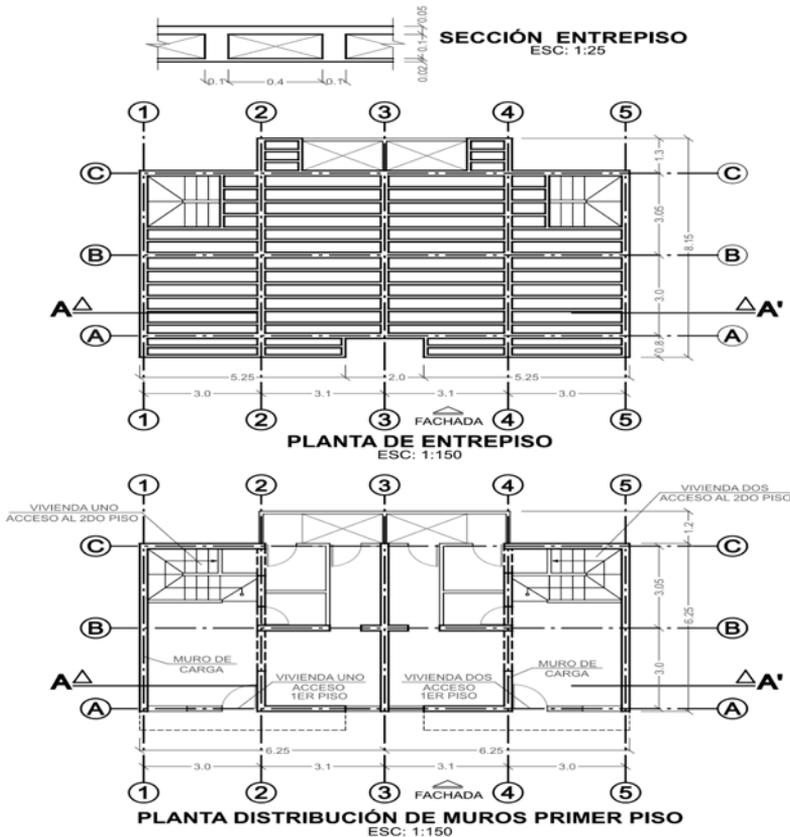
4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

El modelo fue pensado para ser aplicable a gran escala; sin embargo, permite conocer la vulnerabilidad de una edificación en particular. A continuación se presenta un ejemplo de utilización de la metodología a pequeña y gran escala.

4.1 APLICACIÓN A UNA EDIFICACIÓN EN PARTICULAR

El modelo fue aplicado a una edificación de mampostería en particular de la ciudad de Bucaramanga, construida en 1997 (Maldonado y Chio, 2007). La edificación posee un sistema estructural de mampostería no confinada, de dos plantas, con placas aligeradas rígidas en los dos niveles. La configuración de los muros se ilustra en la Figura 7.

Figura 7. Edificación en mampostería de la ciudad de Bucaramanga

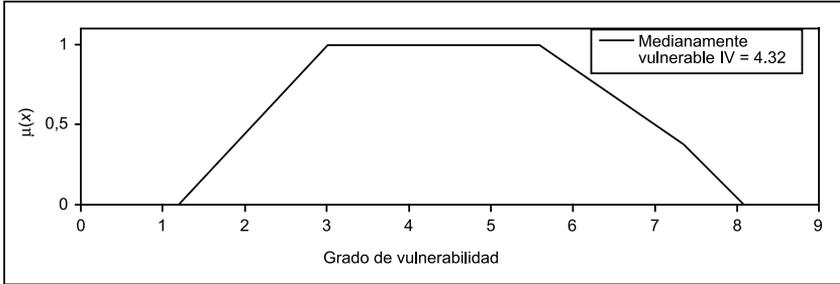


Fuente: presentación propia de los autores.

Inicialmente se levantó la información de las características de la edificación, que permiten definir las clasificaciones de los parámetros.

Luego se analizó la vulnerabilidad por medio del programa IVEM. De este último proceso resultó que es medianamente vulnerable, con un índice de vulnerabilidad de 4,32 y con una función de pertenencia como la que se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Función de pertenencia del grado de vulnerabilidad para la edificación del ejemplo



Fuente: presentación propia de los autores.

4.2 APLICACIÓN A ESCALA REGIONAL

El método fue elaborado para ser aplicado a gran escala; por ello se utilizó en una zona de estudio que comprende un total de 78 barrios, con aproximadamente 760 manzanas y 12.000 predios en el municipio de Floridablanca, ubicado en el área metropolitana de Bucaramanga.

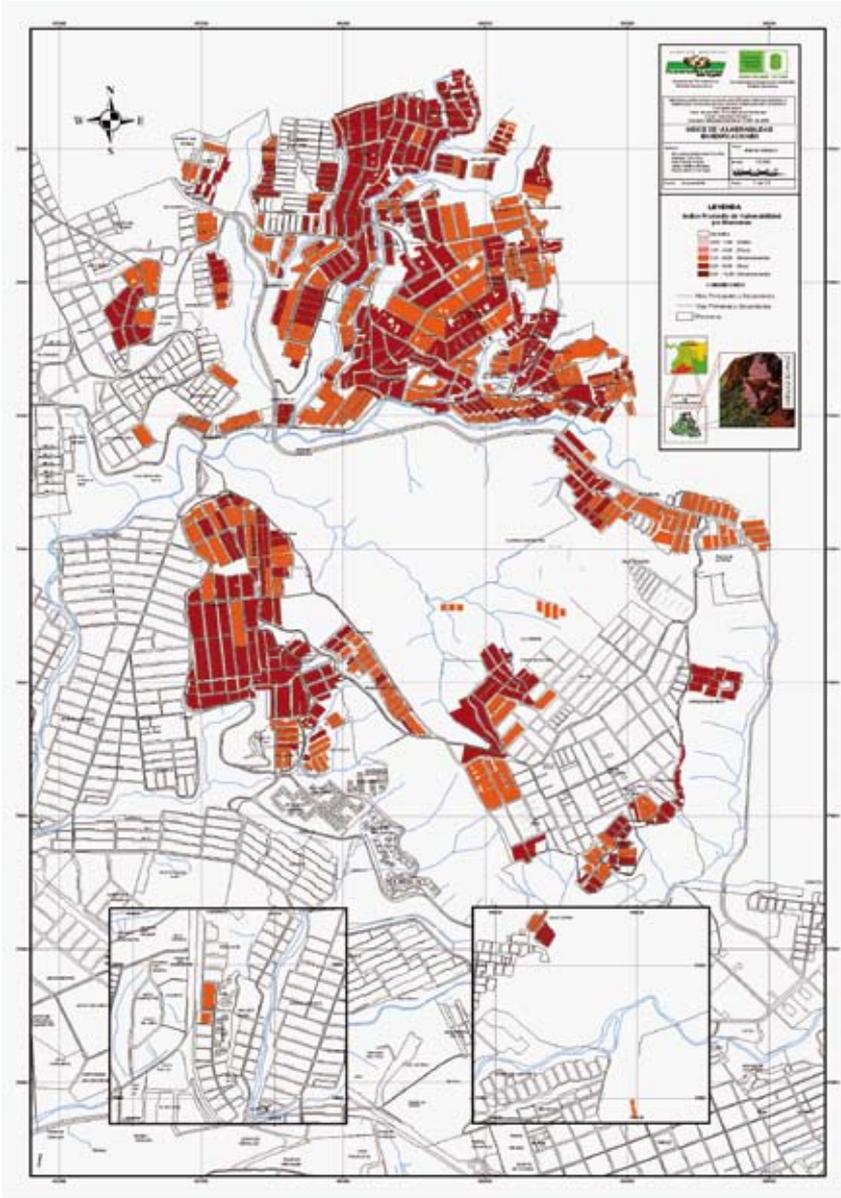
Para evaluar la vulnerabilidad de la zona fue necesario hacer un inventario de todos los predios, mediante un trabajo de campo que incluyó el diligenciamiento del formulario predio por predio y la toma de un registro fotográfico de la zona. La información se incorporó a un sistema de información geográfico que facilitó el manejo y la visualización de las características de las edificaciones de la zona.

Después de almacenar la información y usar el programa IVEM, se construyó el mapa de vulnerabilidad sísmica de la zona de estudio (Figura 9). Los resultados de vulnerabilidad se estimaron por edificaciones, y con ellos se definieron los valores por manzana, como se presenta en el mapa.

Asimismo, se elaboraron dos mapas de vulnerabilidad de la zona de estudio; el primero consideró criterios de expertos nacionales, y el segundo, la opinión de expertos internacionales. En cada caso se construyeron las funciones de pertenencia de las calificaciones de cada parámetro y de sus valores de importancia, que luego fueron incorporadas por separado en el promedio ponderado difuso —utilizado para calcular el índice de vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería (Ecuación 1)—. Finalmente, con los dos modelos de promedio ponderado difuso se calculó el índice de vulnerabilidad para cada una de las edificaciones de la zona de estudio.

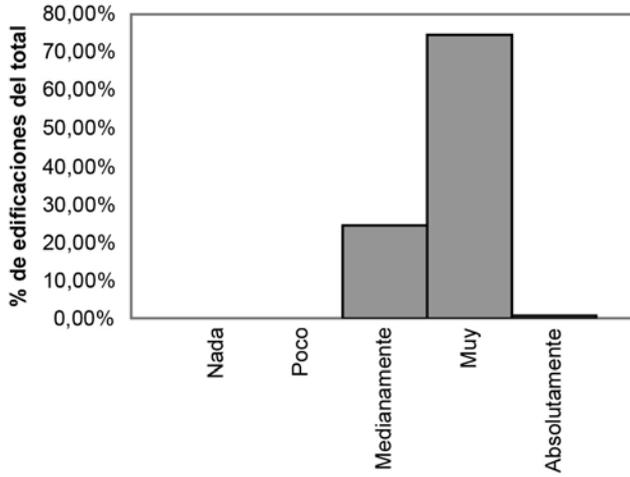
Los resultados de cada uno de los mapas se resumen en los histogramas de las figuras 10 y 11. En ellos se observa la importancia de considerar las opiniones de los dos tipos de expertos, dado que en los dos casos la tendencia es estimar las edificaciones entre medianamente y muy vulnerable. Al comparar los resultados con los obtenidos, tomando las opiniones en un solo grupo, los resultados son entre medianamente y muy vulnerables, como se muestra en la Figura 9 y en la Figura 12.

Figura 9. Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio



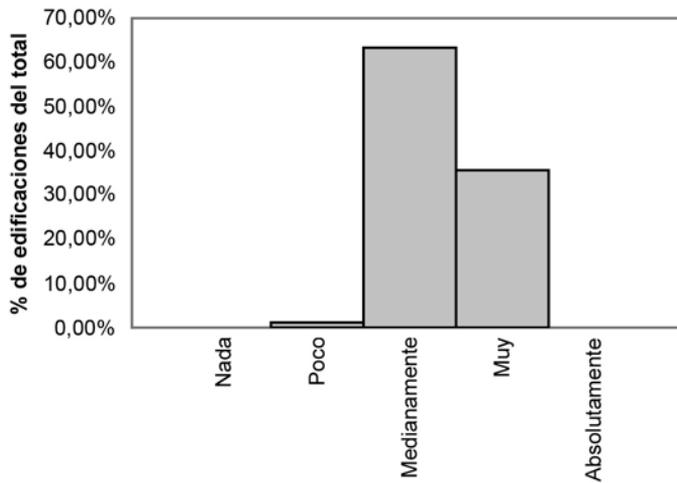
Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 10. Resultados del índice de vulnerabilidad considerando en el modelo solamente opiniones de expertos nacionales



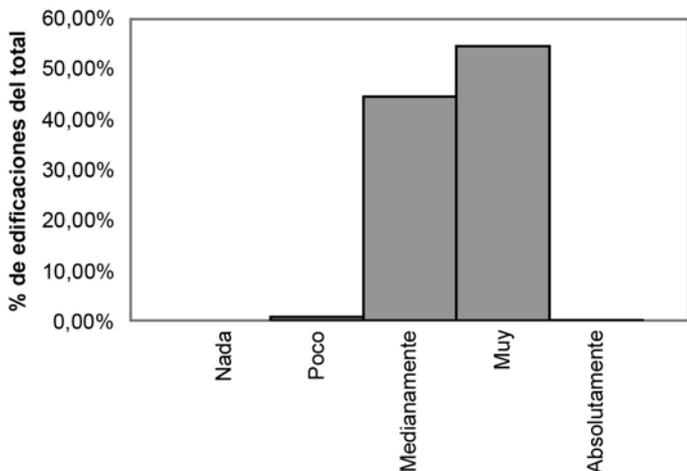
Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 11. Resultados del índice de vulnerabilidad considerando en el modelo solamente opiniones de expertos internacionales



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 12. Resultados del índice de vulnerabilidad considerando en el modelo opiniones de expertos nacionales e internacionales



Fuente: presentación propia de los autores.

Otra manera de visualizar lo anterior es a través de los resultados de las condiciones de calidad y de los valores de importancia de los parámetros por medio de un valor numérico no difuso. Este último se definió como el valor numérico del centro de gravedad de la función de pertenencia respectiva. En la Tabla 1 se ilustran estos valores para las condiciones A, B, C y D y para las calificaciones de importancia W de cada parámetro, considerando primero las opiniones de los expertos internacionales, luego la de los nacionales y, finalmente, la del grupo de expertos total.

Tabla 1. Resultados de las condiciones de calidad y valores de importancia de los parámetros

No.	Parámetro	Nacionales					Internacionales					Todos				
		A	B	C	D	W	A	B	C	D	W	A	B	C	D	W
1	Sistema estructural	2,4	6,3	8,8		9,3	3,2	6,1	9,5		9,2	2,6	6,2	9,0		9,3
2	Calidad del sistema resistente	2,2	3,4	4,5	6,5	7,9	2,2	3,7	5,9	7,0	8,8	2,2	3,6	5,4	6,9	7,9
3	Resistencia estructural	1,3	4,2	6,1	8,5	7,6	1,2	5,5	7,5	9,5	8,2	1,3	4,8	6,9	8,9	7,9
4	Posición de la cimentación	1,8	3,1	5,6	6,9	6,8	1,8	3,9	6,1	7,7	7,0	1,7	3,7	5,9	7,3	6,6
5	Suelo y pendiente del terreno	2,0	3,9	5,9	8,1	6,9	1,7	4,1	6,3	8,4	7,3	1,9	4,0	6,0	8,1	7,1
6	Diafragmas horizontales	1,5	3,9	6,5	8,4	7,2	1,6	4,1	6,1	8,2	7,5	1,6	4,0	6,2	8,1	7,3
7	Configuración en planta	2,2	4,3	6,1	8,3	6,9	1,9	4,1	6,2	8,1	7,2	1,9	4,2	6,2	8,2	6,9

Continúa

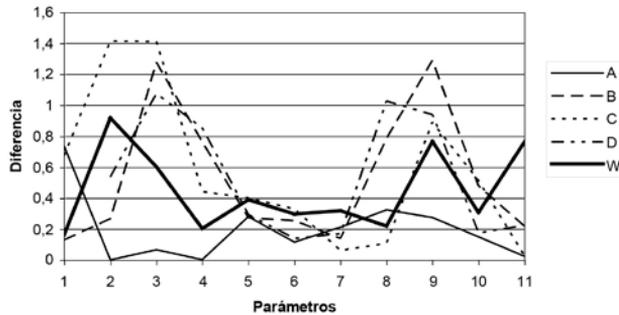
No.	Parámetro	Nacionales					Internacionales					Todos				
		A	B	C	D	W	A	B	C	D	W	A	B	C	D	W
8	Configuración en elevación	1,3	2,9	4,9	6,6	7,0	1,6	3,7	5,0	7,6	7,2	1,5	3,0	4,7	7,4	7,0
9	Distancia máxima entre los muros	1,5	2,5	4,8	6,8	7,3	1,8	3,8	5,7	7,8	6,5	1,7	2,9	5,2	7,2	6,9
10	Tipo de cubierta	1,8	4,1	5,7	8,2	6,6	1,6	4,6	6,2	8,4	6,3	1,6	4,5	5,8	8,3	6,6
11	Estado de conservación	1,6	4,2	6,4	9,3	7,5	1,6	4,0	6,4	9,1	6,7	1,6	4,1	6,4	9,2	6,9

A, B, C y D corresponden a las condiciones de calidad de cada uno de los parámetros W es el valor de importancia por cada parámetro

Fuente: presentación propia de los autores.

La diferencia entre los anteriores valores numéricos no difusos correspondientes a las opiniones de los expertos se presenta la Figura 13, en la cual en el eje horizontal se encuentran los once parámetros y en el eje vertical se presenta la diferencia entre las opiniones de los expertos nacionales e internacionales.

Figura 13. Diferencias entre las respuestas de los expertos



Fuente: presentación propia de los autores.

De acuerdo con la Figura 13, la mayor diferencia en las respuestas se registró en los parámetros que consideran la calidad del sistema estructural, la resistencia estructural y la distancia entre muros. Este comportamiento se presenta tanto en la calificación de las condiciones de calidad como en los valores de importancia. Lo anterior se justifica en la relevancia de estos parámetros dentro del modelo, dado que corresponden a unos de los de mayor peso en la estimación del índice de vulnerabilidad de las edificaciones. A su vez, se observa que las mayores diferencias se presentan en las condiciones de calidad B y C, que corresponden a los niveles donde se puede presentar mayor ambigüedad en las respuestas, dado que están asociados a condiciones de vulnerabilidad media.

Finalmente, la mayor diferencia corresponde a un valor de 1,4, relacionado con la condición C de los parámetros que consideran la calidad del sistema estructural y la resistencia estructural. Esto significa que la diferencia entre la respuesta de esta condición de calidad en cada uno de los dos parámetros es de 1,4; pero dentro de la escala numérica utilizada entre 0 y 10 para calificar los grados de vulnerabilidad *nada* (0), *poco* (3), *medianamente* (5), *muy* (9) y *absolutamente* (10) vulnerable, ésta no marca una diferencia significativa.

5. CONCLUSIONES

Hoy en día, la necesidad de realizar estudios de vulnerabilidad ante las diferentes amenazas a las que están sometidas las ciudades conlleva aplicar modelos propuestos en otros contextos o construir los propios. Al utilizar modelos construidos con datos de otros lugares donde las características estructurales son diferentes a las nuestras, se corre el riesgo de utilizar modelos inadecuados y, por consiguiente, obtener valores incorrectos.

A su vez, al construir un modelo propio para evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones de ciudades de nuestro país, se requiere una buena información de registros de daños ocurridos en sismos pasados o datos experimentales del comportamiento de las estructuras. Por consiguiente, se deben ampliar los estudios de recopilación y análisis de información de daños sísmicos y, al tiempo, fortalecer la investigación en lo referente al comportamiento estructural de nuestras edificaciones. Mientras ocurre este proceso es necesario desarrollar modelos propios con los medios que se cuentan y por ello la alternativa de utilizar la opinión de expertos para este tipo de estudios es adecuada.

En el caso de la vulnerabilidad sísmica de ciudades como Bucaramanga y Floridablanca, donde no se cuenta con registros de daños en edificaciones de mampostería, ni se dispone de datos experimentales, el modelo propuesto mostró su sencillez y viabilidad en su aplicación, por lo cual es ideal su uso en estudios a gran escala. Se espera que en la medida en que se cuente con mayor información se desarrollen otros modelos.

La metodología propuesta se fundamenta en la evaluación de los parámetros que más influyen en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, que corresponden al sistema estructural, a la calidad del sistema resistente, a la posición de la cimentación, al tipo de suelo y pendiente del terreno, al tipo de diafragma horizontal, a la configuración en planta y elevación, a la distancia máxima entre los muros, al tipo de cubierta y al estado de conservación de la edificación. Éstos pueden ser cualitativos o cuantitativos, pero son definibles a partir de información general de la edificación.

Los parámetros seleccionados para definir el modelo y sus respectivas clasificaciones obedecieron a condiciones propias de las edificaciones de nuestro medio; por consiguiente, el modelo propuesto es aplicable a

ciudades de características similares a las estudiadas. A su vez, el grado de vulnerabilidad de cada una de las clasificaciones de los parámetros y su valor de importancia se definió a partir de opiniones de expertos y mediante la utilización de la teoría de los conjuntos difusos, lo cual hace al modelo aplicable en medios donde no se cuenta con información proveniente de registros de daño sísmico o donde no se tiene información experimental de las zonas de interés de estudio.

A partir de la relación del grado de vulnerabilidad de los diferentes parámetros y su respectivo valor de importancia se define un índice de vulnerabilidad, el cual califica a la estructura entre nada, poco, medianamente, muy y absolutamente vulnerable. Esto se asocia con un valor numérico y una representación de la ambigüedad de la respuesta.

En la construcción del modelo se contó con opiniones de expertos nacionales e internacionales de México, Chile, Perú, Venezuela y Puerto Rico, los cuales consideraron que los parámetros más relevantes corresponden al sistema estructural y la calidad del sistema resistente.

El método tiene gran aplicación en estudios a gran escala, donde se requiere evaluar una gran cantidad de edificaciones y con la mínima información posible. De esta manera, permite comparar diferentes zonas y detectar las más vulnerables, aparte de que se convierte en una buena herramienta para los planes de mitigación sísmica y planificación territorial.

La metodología involucra el uso del programa computacional IVEM para calcular el índice de vulnerabilidad de las edificaciones de forma individual o colectiva; además, ofrece de esta manera una herramienta sistematizada para la evaluación de la vulnerabilidad de cualquier ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo recibido por parte de la Universidad Industrial de Santander, de Colciencias y de la Alcaldía de Floridablanca.

REFERENCIAS

- ABREO, G. J. y ARGUELLO, S. A. *Caracterización dinámica de las edificaciones ubicadas en el sector de Ciudadela Real de Minas (Bucaramanga)*. Trabajo de grado. Bucaramanga, Colombia: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, 2003.
- AIS y FOREC. *Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismo resistente de viviendas de mampostería*. Bogotá, 2001.
- APPLIED Technology Council. *Earthquake Damage Evaluation data for California*, ATC-13. Redwood City, California, 1985.

- ARDILA, R. y MÉNDEZ, A. *Caracterización dinámica de las edificaciones ubicadas en el sector de Morrorrico (Bucaramanga)*. Trabajo de grado. Bucaramanga, Colombia: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, 2003.
- BANDEMÉR, H. y GOTTWALD, S. *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with Applications*. New York: Jhon Wiley and Sons, 1996.
- BENEDETTI, D. y PETRINI, V. *Sulla Vulnerabilità Sismica di Edifici in Muratura: Prioste di un Método di Valutazione*. Roma: Lindustria delle Costruzioni, 1984.
- CARDONA, O. y HURTADO, J. *Propuesta metodológica para los análisis de vulnerabilidad*. Informe de consultoría del proyecto UN-DRO/ACDI/ONAD para la Mitigación de Riesgos en Colombia. Santiago de Cali, 1990.
- CARREÑO, O. y RODRÍGUEZ, R. *Caracterización estructural de edificaciones de uno y dos niveles ubicadas en la meseta de Bucaramanga*. Trabajo de grado. Bucaramanga, Colombia: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, 2003.
- CASTELLANOS, C. J. y GARCÍA, O. M. *Caracterización estructural de edificaciones de primer y segundo nivel ubicadas en una zona de Bucaramanga*. Trabajo de grado. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2003.
- EUROPEAN Seismological Commision. *European Macroseismic Scale 1998 EMS-98*. Luxemburgo: Grünthal, 1998.
- FEMA 154/Report ATC-21. *Rapid Visual Screening of Building for Potential Seismic Hazard*. Washington, 1988.
- KACPRZYK, J. *Multistage Fuzzy Control, A Model-Based Approach to Fuzzy Control and Decision Making*. New York: John Wiley and Sons, 1997.
- MALDONADO, E., CHIO, G. y GÓMEZ, I. *Aplicación de los conjuntos difusos en la evaluación de los parámetros de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de mampostería* [artículo en revisión], 2007.
- MALDONADO, E. y CHIO, G. *Visión estructural de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2007.
- TERANO, T., ASAI, K. y SUGENO, M. *Fuzzy System Theory and its Applications*. Boston: Academic Press, 1992.
- Universidad Industrial de Santander (UIS) y Alcaldía de Floridablanca. *Metodología para la evaluación del riesgo debido a amenazas naturales en zonas urbanas de ciudades colombianas. Caso de estudio Floridablanca. Fase I Riesgo sísmico*. Santander, 2006.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965 (8), 338-353.