

## Estimación de las funciones de vulnerabilidad sísmica en edificaciones en tierra

---

Assessment of functions seismic  
vulnerability of earth building

Esperanza Maldonado Rondón\*,  
Gustavo Chio Cho\*\*

---

\* Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesora titular de la Universidad Industrial de Santander. Coordinadora de la maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación INME. [emaldona@uis.edu.co](mailto:emaldona@uis.edu.co)

**Correspondencia:** Calle 102 n.º 23 A-38, Bucaramanga (Colombia).

\*\* Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor asociado de la Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación INME. [gchioch@uis.edu.co](mailto:gchioch@uis.edu.co)

**Apoyos y subvenciones:** Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto de investigación titulado *Zonificación del riesgo sísmico en centros urbanos utilizando funciones calculadas. Caso de estudio: meseta de Bucaramanga*, financiado por la Universidad Industrial de Santander y por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas, Colciencias.

## Resumen

*En este trabajo se presenta una metodología para definir el daño producido por un sismo de aceleración pico efectiva de diseño,  $A_n$ , igual a 0.02 g y 0.05 g en edificaciones en tierra apisonada (tapia) o adobe, por medio de la generación de funciones de vulnerabilidad. La metodología propuesta consiste en relacionar un índice de vulnerabilidad con un índice de daño en función de un evento sísmico determinado. El modelo de índice de vulnerabilidad se basó en el que propusieron por Benedetti y Petrini [1], adaptado a las características de las edificaciones colombianas, y el índice de daño fue determinado mediante una relación demanda-capacidad. La construcción de las funciones requirió contar con una muestra de 53 edificaciones existentes en la ciudad de Bucaramanga. A cada uno de los edificios se le calculó su índice de vulnerabilidad y su índice de daño para diferentes aceleraciones máximas, y con ellos se construyeron las funciones de vulnerabilidad. Las funciones definidas en esta investigación fueron aplicadas en las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga.*

**Palabras claves:** Adobe, daño sísmico, edificaciones en tierra, funciones de vulnerabilidad sísmica, tapia, daño, vulnerabilidad.

## Abstract

This paper presents a model to assess seismic damage of earth buildings when a seismic action occurs; this is carried out through seismic vulnerability functions. The model relates the vulnerability index with the damage index according to a specific seism. Seismic vulnerability is based on the index proposed by Benedetti and Petrini [1] adapted to the condition of Colombian buildings. The damage index is estimated using the capacity/demand relationship. A sample of the 53 earth buildings in Bucaramanga was considered in the construction of the seismic vulnerability functions. The vulnerability index and the damage index were calculated on each one of the buildings for different maximum accelerations, and then with these indexes a vulnerability functions were estimated. These functions were used to evaluation seismic damage in the city of Bucaramanga.

**Key words:** Earth buildings, seismic vulnerability functions, seismic vulnerability, seismic damage, damage, vulnerability.

Fecha de recepción: 20 de noviembre de 2008  
Fecha de aceptación: 24 de marzo de 2009

## 1. INTRODUCCIÓN

En las ciudades colombianas aún siguen existiendo, considerables edificaciones construidas con técnicas heredadas de los conquistadores españoles. Estas son las edificaciones en tierra apisonada llamada comúnmente tapia y las construidas con adobe de tierra. Algunas de ellas se han conservado

por su valor histórico y cultural, pero en su gran mayoría muchas han sido modificadas de tal manera que se han adaptado a las necesidades de las viviendas actuales. De las grandes casonas con patios centrales hoy en día se ha pasado a espacios más pequeños donde otros materiales como la mampostería y el concreto han sido utilizados para su transformación.

Las edificaciones en tierra son cuestionadas por su comportamiento ante la acción de los sismos, pues su respuesta en presencia de cargas de gravedad es muy buena, aunque no sucede lo mismo ante efectos horizontales. Los defensores de este sistema estructural argumentan que las edificaciones aún se encuentran en pie a pesar de su edad y de las acciones que han soportado a lo largo de los años. De otro lado, las investigaciones en cuanto al comportamiento sísmico de la tapia son muy escasas debido a la idea de considerarse un sistema no óptimo para soportar acciones sísmicas.

Por lo anterior, es importante realizar estudios que permitan entender mejor el comportamiento de la tapia en zonas de alta amenaza sísmica y que, a su vez, ofrezcan herramientas para proponer planes de mejoramiento o rehabilitación.

De esta manera el presente trabajo se propone estudiar el comportamiento ante sismo de las edificaciones de tapia a partir de funciones de vulnerabilidad. Las funciones relacionan un índice de vulnerabilidad con un índice de daño. El índice de vulnerabilidad se definió a partir de la opinión de expertos. La estimación del daño se elaboró a través de la relación demanda-capacidad. Posteriormente con los valores de índice de vulnerabilidad y valores de relación demanda-capacidad según diferentes eventos sísmicos se establecieron relaciones de vulnerabilidad-estado de daño para diferentes eventos sísmicos.

## **2. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD**

La vulnerabilidad sísmica es una medida que permite clasificar a las estructuras de acuerdo con sus características y calidad estructural, dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable, ante la acción de un sismo. De otra parte, una de los aspectos más importantes de los estudios de riesgo sísmico a nivel urbano es que la metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones tiene que ser de alguna

manera simple, para que se pueda aplicar a grandes áreas como centros urbanos donde la cantidad de sus edificaciones es grande y la variedad de sus propiedades es considerable. Luego, cualquier metodología se puede aplicar pero con su correspondiente incremento en los costos de aplicación que, para el caso de un centro urbano, puede ser inadmisibles. Por esta razón, se debe aplicar la metodología que mejor se adapte a los fines propuestos en el estudio de riesgo sísmico. De esta manera en estudios a gran escala, la vulnerabilidad se puede definir mediante funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño, entre otros.

Una función de vulnerabilidad es una relación matemática que expresa de forma continua el daño que puede sufrir una estructura cuando se somete a un evento sísmico de determinado nivel. Las funciones de vulnerabilidad se construyen a partir de datos de daño observado o son generadas artificialmente. Una de sus principales variantes la constituyen las funciones de vulnerabilidad que relacionan un índice de vulnerabilidad con un índice de daño, condicionado por un parámetro que describe el movimiento del terreno. El parámetro puede ser la aceleración pico efectiva de diseño,  $A_d$ , o una de las escalas de intensidad sísmica tales como la escala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) y la de Mercalli Modificada (MMI).

Las funciones de vulnerabilidad pueden ser observadas o calculadas [2]. Las observadas se construyen de registros de daños debidos a sismos, a diferencia de las calculadas, que dada la falta de esta información, simulan las características de las edificaciones para evaluar el daño.

Dentro de las funciones de vulnerabilidad observadas se encuentran las propuestas por Guagenti y Petrini [3], que relacionan el índice de vulnerabilidad, daño y aceleración del terreno, en edificaciones de mampostería con parámetros estimados en las edificaciones de comunidades italianas. Otras funciones propuestas son las elaboradas por Angeletti *et ál.* [4] que establecen unos trabajos de vulnerabilidad construidos a partir del análisis de levantamientos de daño después de los sismos en Italia, y que dependen de la intensidad sísmica de la escala de Mercalli, Cancani y Sieberg, MCS. Benedetti y Petrini [1] construyeron un modelo que se basó en los levantamientos de daño y vulnerabilidad para estructuras de hormigón armado y mampostería no reforzada, utilizando los formularios

construidos por ellos mismos, llamados nivel 1 para daño y nivel 2 para vulnerabilidad.

Yépez [5] generó funciones de vulnerabilidad a través de la simulación de estructuras de mampostería y hormigón armado, basándose en el modelo de Benedetti y Petrini [1]. Estas funciones fueron construidas para diferentes valores de intensidad en la escala de MSK.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Metodología para la construcción de las funciones de vulnerabilidad**

La utilización de una metodología para la estimación de la vulnerabilidad sísmica depende del objetivo del estudio, pero también de la disponibilidad de datos y tecnología; además, está relacionada y ligada con la escala de análisis y con las características de los elementos en estudio. Por ejemplo, para establecer un análisis de riesgo sísmico de elementos particulares o aislados se utilizan métodos deterministas; por el contrario, para la evaluación masiva de tipos de edificación con fines de cuantificación del riesgo sísmico en una región se recomienda aplicar métodos probabilistas y cualitativos [5].

Para el presente trabajo se propuso evaluar la vulnerabilidad de edificaciones de tierra en centros urbanos a partir de funciones de vulnerabilidad construidas para las condiciones de las edificaciones del contexto colombiano. El modelo propuesto está pensado y elaborado para ser incorporado posteriormente en estudios a nivel regional, luego no pretende suplir un estudio detallado de una edificación. El modelo de estimación de la vulnerabilidad se basa en la definición de un número determinado de parámetros, los cuales se consideran influyen de manera importante en el comportamiento de la estructura ante la acción del sismo. Dado que no se cuenta con suficiente información sobre daños reales en las edificaciones, es necesario acudir a la opinión de expertos para definir los grados de vulnerabilidad de los parámetros que más influyen en el nivel de daño que produce un sismo.

Los pasos desarrollados por los autores para la construcción de las funciones de vulnerabilidad para las edificaciones en tierra son los siguientes:

- a) Identificación de los parámetros que más influyen en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones.
- b) Definición de los grados de vulnerabilidad de cada parámetro a partir de la opinión de expertos.
- c) Definición de la muestra de edificaciones.
- d) Cálculo del índice de vulnerabilidad de las edificaciones de la muestra.
- e) Definición de los valores que representan la acción sísmica, en este caso la aceleración pico efectiva de diseño.
- f) Cálculo del daño de las edificaciones de la muestra para diferentes valores de aceleración pico efectiva de diseño.
- g) Relación del índice de vulnerabilidad con su respectivo índice de daño para una aceleración pico efectiva de diseño dada.
- h) Construcción del índice de vulnerabilidad ( $IV$ ) contra el índice de daño ( $ID$ ) para cada aceleración pico efectiva de diseño.

En la figura 1 se presenta el esquema de una familia de funciones de vulnerabilidad basadas en un índice de vulnerabilidad y de un índice de daño para diferentes eventos sísmicos, determinados por  $A_a$ .

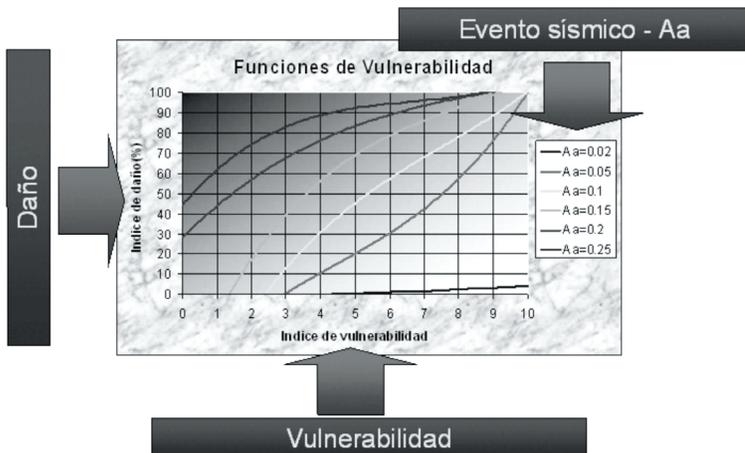
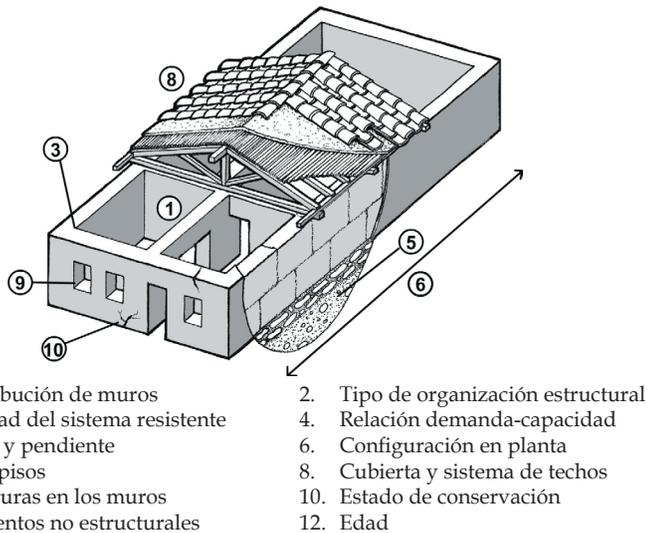


Figura 1. Esquema de la definición de una función de vulnerabilidad

### 3.2. Metodología para la evaluación del índice de vulnerabilidad

El modelo utilizado para la estimación de la vulnerabilidad dentro de la construcción de las funciones de vulnerabilidad se definió a partir del método del índice de vulnerabilidad propuesto por Benedetti y Petrini [1], que ha sido aplicado en ciudades diferentes a las italianas, como Barcelona (España) [5] [6], Cuenca (Ecuador) [7], Concepción (Chile) [8], Floridablanca y Bucaramanga [9] [10] [11], entre otras.

El modelo propuesto cuantifica la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en función de doce (12) parámetros: distribución de muros, tipo de organización estructural, calidad del sistema resistente, relación demanda-capacidad, suelo y pendiente, configuración en planta, entrepisos, cubierta y sistema de techos, aberturas en los muros, estado de conservación, elementos no estructurales y la edad de la edificación, ver figura 2.



**Figura 2.** Parámetros del modelo de índice de vulnerabilidad en edificaciones en tierra

La distribución de los muros considera el espaciamiento máximo entre estos mismos y el espesor del muro maestro; a su vez, tiene en cuenta la relación existente entre el área de los muros y el área total de la edificación. El tipo y la organización estructural busca describir la ruta de carga, el sistema

estructural y los tipos de conexiones entre los muros y otros elementos de la edificación. La calidad del sistema estructural evalúa el tipo de material utilizado, la forma del elemento y su homogeneidad. La relación demanda-capacidad se determina en función de un índice de sobreesfuerzo. El suelo y pendiente considera la diferencia en el tipo de suelo de cimentación de la edificación y del ángulo de inclinación del terreno. La configuración en planta es un parámetro que se estima a partir de la forma en nivel de la edificación y la relación entre su ancho y su largo. El sistema de entrepiso se involucra para estimar su influencia y su forma de conexión con los muros. La cubierta o sistema de techo estima su aporte en la transmisión de cargas a los muros. Las aberturas en los muros pretenden evaluar su influencia en la capacidad de carga de los muros; se estima a partir del tamaño de las aberturas y de su distribución en el muro. El estado de conservación incluye el efecto del estado de la estructura en su capacidad. Finalmente, la edad toma en consideración la degradación y la pérdida de resistencia de los materiales a medida que pasa el tiempo. Para mayor detalle de los parámetros ver la referencia [11].

Cada parámetro, a su vez, se encuentra dividido entre tres y cuatro clasificaciones a las cuales se les asocia un grado de vulnerabilidad diferente en medio de *A (nada vulnerable)* y *D (muy vulnerable)*. Por ejemplo; en lo referente al tercer parámetro, *calidad del sistema estructural*, la clasificación es la siguiente:

- *A.* Sistema de módulos de tapia pisada con esquinas integradas o mampostería de adobe de buena calidad. Existe ligamento o trabe entre todos los módulos o unidades. Tamaño constante y homogéneo de los módulos y unidades a lo largo de todo el muro.
- *B.* Sistema de módulos de tapia con formaleta hasta el final o mampostería de adobes de buena calidad, con ligamento o trabe entre todos los módulos o unidades no muy homogéneas y con tamaño variable de módulos y unidades a lo largo del muro. O sistema de módulos en tapia pisada con esquinas integradas o mampostería de adobe de buena calidad, sin ligamento o trabe entre módulos o unidades.
- *C.* Sistema de módulos en tapia con formaleta hasta el final del muro, mampostería de adobe de mala calidad, con ligazón entre módulos o unidades de baja a mediana homogeneidad de los materiales.

- **D.** Sistema de módulos con formaletas hasta el final de tapia pisada, mampostería de adobe de mala calidad sin ningún tipo de ligazón entre módulos o unidades, con material no homogéneo a lo largo del muro.

El cálculo del índice de vulnerabilidad se encuentra basado en la relación del grado de vulnerabilidad de los diferentes parámetros y en su respectivo valor de importancia, que fueron definidos a partir de opiniones de expertos en el tema. La utilización de la opinión de expertos posee un alto grado de subjetividad, imprecisión e incertidumbre; por esta razón se decidió utilizar la matemática de conjuntos difusos [12], [13], [14] para manejar esta información. La aritmética difusa se usó para relacionar las calificaciones de cada parámetro con su respectivo valor de importancia. A su vez, el llamado *promedio ponderado difuso* fue utilizado para combinar información difusa con diferente peso o importancia. Luego, en este modelo el cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica de edificaciones en tierra se expresa como:

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

Donde  $IV$  es el índice de vulnerabilidad sísmica de la edificación y  $K_i$  es una medida del grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro  $i$ . Los valores  $W_i$  son una medida de la importancia asociada con el parámetro  $i$  con respecto a los demás parámetros.

### 3.3. 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 tierra se realiza de la siguiente manera:

- 1) Traslación de las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los parámetros a conjuntos difusos mediante la definición de las correspondientes funciones de pertenencia. Estas funciones se construyen a partir de las opiniones de los expertos.
- 2) Transformación de las variables de importancia de cada parámetro a conjuntos difusos mediante las funciones de pertenencia. De igual manera

que en el punto anterior, estas funciones de pertenencia se elaboran con base en la opinión de expertos.

- 3) Combinación de 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*.
- 4) Transformación del conjunto difuso resultante *índice de vulnerabilidad* a una expresión lingüística o escala cualitativa como *nada, poco, medianamente, muy* y *absolutamente* vulnerable. La transformación de un conjunto difuso a una expresión lingüística natural es un proceso relativamente simple, el cual 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.
- 5) Asociación de un valor numérico no difuso a la variable lingüística del índice de vulnerabilidad calculado. Esto se realiza escogiendo como valor numérico el centro de gravedad de la función de pertenencia resultante del cálculo del peso promedio difuso.

#### 3.4. Metodología propuesta para la determinación del índice de daño sísmico de las edificaciones

De los modelos existentes para el cálculo de daño en edificaciones en muros de tierra apisonada o adobe se toma la relación demanda-capacidad, incorporando el modelo propuesto por Abrams [15], que fue construido para los muros en mampostería. El modelo asume que la resistencia última se encuentra mucho después del primer agrietamiento, pues considera una reducción de la resistencia proporcional a la longitud agrietada. Luego este comportamiento puede ser descrito mediante un análisis de equilibrio instantáneo de las diferentes fuerzas y reacciones que se encuentran en el panel, como se ilustra en la figura 3. En ella  $H$  representa la fuerza lateral actuante,  $h$  es la altura libre del panel,  $f_a$  es el esfuerzo de compresión,  $L$  es la longitud total del panel,  $f_{max}$  es el esfuerzo máximo en la fibra extrema en compresión situada en el extremo

inferior del panel producto del esfuerzo de compresión vertical actuante y el esfuerzo resultante del momento flector que genera la fuerza  $H$ ,  $e$  es la excentricidad producida por el estado de flexo compresión,  $d$  es la distancia a la fibra extrema en compresión hasta la fibra libre de esfuerzo.

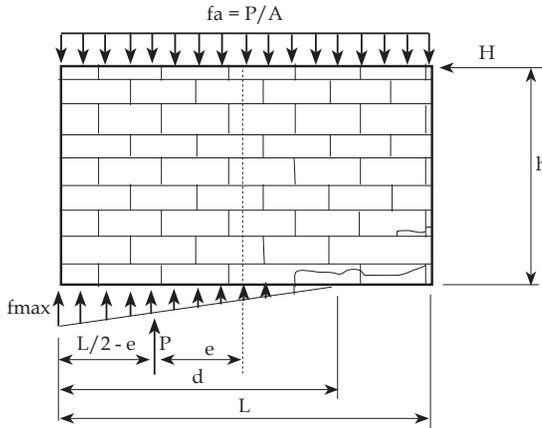


Figura 3. Comportamiento del muro frente a una carga lateral cíclica

- $F$  Esfuerzo admisible a cortante
- $F_a$  Esfuerzo admisible a compresión
- $T_a$  Esfuerzo cortante actuante
- $F_{va}$  Esfuerzo resistente máximo a cortante
- $F_v$  Esfuerzo admisible a cortante
- $D$  Índice de daño
- $b$  Ancho del muro

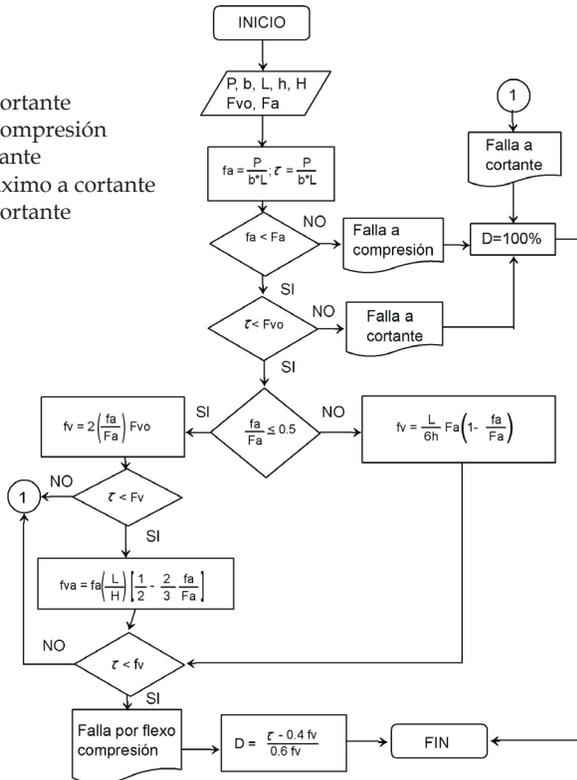


Figura 4. Diagrama de flujo, modelo de Abrams

Bajo estas consideraciones, en la figura 4 se resume el procedimiento para determinar la resistencia lateral de los muros.

De esta manera mediante el modelo de Abrams [15] se puede encontrar una estimación del porcentaje de daño de un muro de mampostería.

### 3.5. Estados de daño

La definición de los estados de daño en las edificaciones en tierra se basó en los propuestos por el ATC-13 [16], con una modificación realizada al estado de daño severo. Para este estado de daño el rango se consideró entre 60% y 80%. Ver tabla 1.

**Tabla 1**  
Estados de daño correspondiente a índices de daño económicos

|   | Estados de daño | Índice de daño económico<br>% | Índice de daño central<br>% |
|---|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Sin daño        | 0                             | 0                           |
| 2 | Muy pequeño     | 0 -1                          | 0.5                         |
| 3 | Ligero          | 1 -10                         | 5                           |
| 4 | Moderado        | 10 - 30                       | 20                          |
| 5 | Alto            | 30 - 60                       | 45                          |
| 6 | Severo          | 60 - 80                       | 70                          |
| 7 | Colapso         | 80 - 100                      | 90                          |

- (1) Sin daño: no se produce daño.
- (2) Muy pequeño: daño menor de alguno de los componentes, no se requiere reparación.
- (3) Ligero: daño importante localizado en algunos componentes; generalmente no requiere reparación.
- (4) Moderado: daño importante localizado en los componentes, se debe reparar.
- (5) Alto: daño extendido en la estructura, se requiere reparación.
- (6) Severo: daño mayor extendido en toda la estructura, que puede obligar a arrasar, demoler o reparar la estructura.
- (7) Colapso: destrucción de la mayor parte de la estructura.

El índice de daño estructural se asumió igual al índice de daño (costo) económico central.

### 3.6. Muestra de las edificaciones estudiadas

La muestra de edificaciones de tapia constó de 53 casas [17], las cuales se encuentran distribuidas en diferentes zonas de la ciudad de Bucaramanga.

La ciudad está dividida en 20 zonas desde el punto de vista de sus edificaciones según Maldonado y Chio [18]. En la tabla 2 se presentan el número de casas estudiadas y una fotografía de algunas de ellas. A su vez, se especifican los barrios que componen la zona.

**Tabla 2**  
Edificaciones de tierra inventariadas

| Zona | Barrio   | Casas analizadas | Casa típica   |
|------|--|------------------|---|
| 6    | Alfonso López, Girardot, Campohermoso                          | 19               |    |
| 7    | San Francisco, Comuneros y Mutualidad                          | 13               |    |
| 8    | Concordia, Antonia Santos y Bolívar                            | 5                |    |
| 9    | La Universidad, Nuevo Sotomayor, San Alonso, Galán y La Aurora | 7                |  |
| 13   | Gaitán   | 5                |  |
| 15   | Chorreras de don Juan  | 2                |  |
| 16   | Sotomayor  | 2                |  |

**Zona:** Representa el número del sector en el cual se encuentra dividida la ciudad [18].

Del análisis de los resultados presentados en Yamín *et al.* [19] y Díaz y Ríos [20] se definieron las características de la tapia para la ciudad de Bucaramanga. Estas propiedades se presentan en la tabla 3.

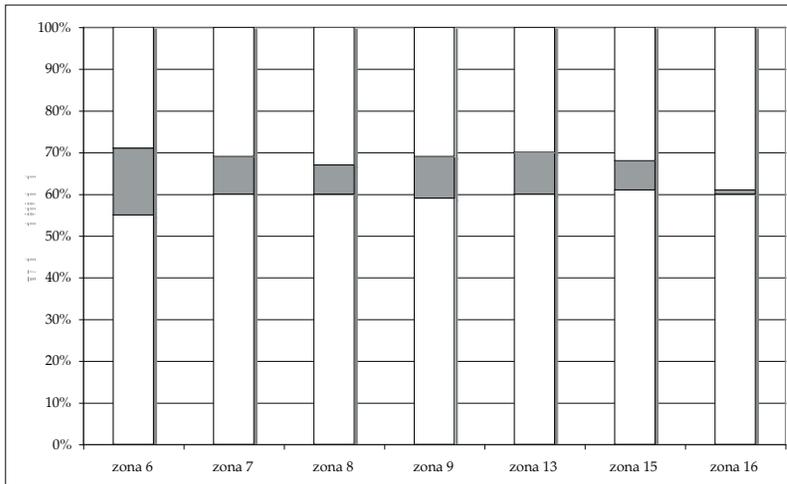
**Tabla 3**  
Propiedades de la tapia

| PARÁMETRO                | Unidades           | VALOR | REFERENCIA |
|--------------------------|--------------------|-------|------------|
| Densidad                 | Ton/m <sup>3</sup> | 1,92  | [19]       |
| Módulo de elasticidad    | kN/m <sup>2</sup>  | 55900 | [20]       |
| Resistencia a compresión | kN/m <sup>2</sup>  | 330   | [19]       |
| Resistencia a tensión    | kN/m <sup>2</sup>  | 20    | [19]       |
| Resistencia a cortante   | kN/m <sup>2</sup>  | 37    | [19]       |
| Resistencia a flexión    | kN/m <sup>2</sup>  | 15    | [19]       |

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Índices de vulnerabilidad sísmica

Basados en el modelo de *índice de vulnerabilidad* utilizado en este trabajo, los índices de vulnerabilidad de las edificaciones de la muestra se encuentran entre 5.5 a 7.1. Este rango abarca las edificaciones entre *medianamente vulnerables* y *muy vulnerables*. En la figura 5 se muestran los rangos de vulnerabilidad para cada zona de estudio; puede observarse en todas las zonas la presencia de edificaciones calificadas con vulnerabilidad de alrededor de 6.



**Figura 5.** Rangos de vulnerabilidad en cada zona de estudio

## 4.2. Estimativo del daño

La estimación del daño de las edificaciones se obtiene mediante la evaluación de la relación demanda-capacidad. Para ello se evalúa el índice de sobreesfuerzo, que permite definir la capacidad de la estructura de soportar y responder adecuadamente ante cualquier solicitud de carga. La capacidad se determinó con base en las características existentes de los muros y la demanda mediante la expresión de esfuerzos propuestos por Abrams [15] ante diferentes acciones sísmicas. De esta manera los índices de daño para la muestra se encuentran en los rangos entre el 60% y 80% para una aceleración de 0.02g y para valores mayores de acciones sísmicas, los daños alcanzan la falla de la estructura.

En la tabla 4 se muestran los resultados del *índice de sobreesfuerzo* para cada una de las direcciones ( $x$  y  $y$ ). Se indica el límite inferior, el superior, y el valor promedio por zona y por todas ellas a la vez.

**Tabla 4**  
Resumen de los índices de daño en edificaciones en tapia

| Aceleración | Zona | Isx    |        |              | Isy    |        |              |
|-------------|------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------------|
|             |      | Mínimo | Máximo | Promedio     | Mínimo | Máximo | Promedio     |
| 0.02g       | 6    | 0.18   | 2.13   | 1.155        | 0.24   | 0.96   | 0.6          |
|             | 7    | 0.4    | 1.16   | 0.78         | 0.19   | 0.41   | 0.3          |
|             | 8    | 0.36   | 1.27   | 0.815        | 0.31   | 0.75   | 0.53         |
|             | 9    | 0.4    | 0.99   | 0.695        | 0.23   | 0.71   | 0.47         |
|             | 13   | 0.27   | 1.62   | 0.945        | 0.21   | 0.45   | 0.33         |
|             | 15   | 0.65   | 0.74   | 0.695        | 0.34   | 0.37   | 0.355        |
|             | 16   | 0.67   | 0.74   | 0.705        | 0.37   | 0.45   | 0.41         |
|             |      |        |        | <b>0.827</b> |        |        | <b>0.428</b> |

De los resultados anteriores se concluye que las estructuras de tapia sobre las que se construyeron las funciones, las cuales son reales, presentan un mejor desempeño en la dirección  $y$ , pues los índices de sobreesfuerzos en todas las zonas fueron menores.

Para las aceleraciones mayores a 0.02g, los valores de daño alcanzaron la falla de la estructura.

#### 4.3. Funciones de vulnerabilidad

Definidos los índices de vulnerabilidad y estimados los niveles de daño, ahora se establecen sus respectivas relaciones y conclusiones. Tan solo es posible identificar la función de vulnerabilidad para  $A_a$  igual a 0.02g, debido que a partir de la aceleración  $A_a$  de 0.05g los daños indican la falla de la edificación. En la figura 5 se ilustra la función de vulnerabilidad para  $A_a$  igual a 0.02g.

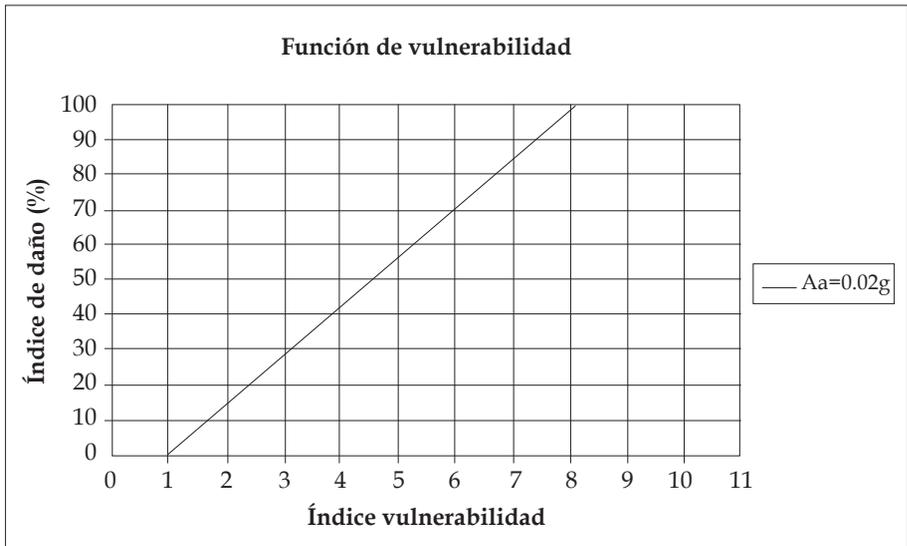


Figura 6. Función de vulnerabilidad calculada

La regresión que mejor se adapta a los datos de las edificaciones en tierra apisonada es una ecuación lineal como se muestra a continuación:

$$ID(\%) = 13.96 \quad IV - 13.96 \quad (2)$$

Donde  $ID(\%)$  es el índice de daño de la edificación y  $IV$  es el índice de vulnerabilidad de la edificación.

#### 5. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN

Bucaramanga es una ciudad de edificaciones de baja altura, que está siendo sometida a un cambio urbanístico dado el valor de la tierra dentro de la

meseta. Las edificaciones de tapia están siendo demolidas y cambiadas por edificaciones de gran altura. Sin embargo, aun en la ciudad existe un 11% de casas en tapia, por las cuales se genera interés en conocer su posible respuesta ante la ocurrencia de un sismo de  $A_a$  igual a 0.2 y 0.5 g. Por consiguiente, para conocer el posible nivel de daño que pueden alcanzar las edificaciones ante las mencionadas acciones sísmicas se aplicaron las funciones construidas en esta investigación. Estos resultados a su vez fueron incorporados en los mapas de escenarios sísmicos para la ciudad de Bucaramanga [11].

La función de vulnerabilidad fue comparada con la matriz de daño propuesta en el ATC-13 [16] para edificaciones de adobe. Los estimativos de daño alcanzados para las edificaciones en tapia aplicando la función es mayor al obtenido mediante la matriz; sin embargo, era de esperarse que se presentara este efecto.

## 6. CONCLUSIONES

Por medio de este trabajo se ofrece un modelo para estimar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en tierra apisonada o adobe, a partir de la aplicación de las funciones de vulnerabilidad sísmica. La metodología parte de calcular un índice de vulnerabilidad en función de 12 características propias de la edificación y a partir de este valor conocer el posible daño que puede alcanzar. Esta metodología permite ser aplicada en medios donde no se cuenta con registros de daños ante sismos pasados o no se tienen datos experimentales.

El modelo difiere de otros utilizados, como el expuesto en el ATC-13, al establecer entre las edificaciones diferentes niveles de capacidad de respuesta ante la acción del sismo que, por consiguiente, permiten estimar discrepancias en el nivel de daño que pueden alcanzar dos edificaciones de tierra apisonada o adobe.

Para el caso de la muestra de edificaciones analizadas, el modelo únicamente permitió la construcción de una sola función de vulnerabilidad sísmica, la correspondiente a  $A_a$  igual a 0,02g. Para efectos sísmicos mayores, las edificaciones alcanzan la falla de la estructura; sin embargo, sobre una muestra realizada con características diferentes, los resultados pueden

cambiar. La función propuesta en este estudio es aplicable a edificaciones con características similares a las presentes en la ciudad de Bucaramanga. El modelo es aplicable a gran escala y fue implementado en la construcción de los escenarios de daño sísmico para la ciudad de Bucaramanga.

Los resultados de la muestra evidencian que las estructuras de adobe y tapia son vulnerables a los efectos sísmicos. Ante aceleraciones de 0.05g los resultados dejan ver que las edificaciones alcanzan daños estructurales severos, llegando incluso al colapso. La deficiencia sísmica de la construcción de tapia y adobe se debe al elevado peso de la estructura, a su baja resistencia y a su comportamiento frágil no dúctil ante solicitaciones sísmicas. En el momento de un sismo severo, debido a su gran peso, estas estructuras pueden alcanzar niveles elevados de fuerza sísmica, que son incapaces de resistir, y por ello fallan violentamente.

Una de las ventajas de las funciones propuestas en esta investigación es que permiten su incorporación en un modelo de evaluación de la vulnerabilidad y del daño sísmico a gran escala. Funciones similares fueron construidas para las edificaciones de mampostería y de hormigón en sistema aporticado y en muros estructurales. De esta forma se construyó un programa para la construcción de los mapas de escenarios sísmicos, a partir del levantamiento de las edificaciones de una ciudad, en este caso Bucaramanga. A cada edificación se le determinó su índice de vulnerabilidad de acuerdo a su sistema estructural, luego, en función de un valor de  $A_g$ , se utilizó la función de vulnerabilidad respectiva y se determinó su nivel de daño. Sin embargo, al igual que en los otros sistemas, a estas estructuras como mampostería, pórticos y muros estructurales en hormigón, las funciones no han sido calibradas con datos reales, dado que se no se cuenta con ellos.

Las funciones propuestas con las de Angeletti *et al.* [4] fueron obtenidas a partir de datos reales de daño en localidades italianas, las cuales no necesariamente obedecen a las mismas características de materiales y formas constructivas de las edificaciones de las ciudades colombianas como Bucaramanga. De aquí la ventaja de usar modelos elaborados para el medio donde van a ser aplicadas.

## REFERENCIAS

- [1] D. Benedetti, y V. Petrini, "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un método di valutazione", *L'industria delle Costruzioni*, vol. 149, pp. 66-78, Roma, Italia, 1984.
- [2] C. Caicedo, A. Barbat, J. A. Canas y R. Aguiar, "Vulnerabilidad sísmica de edificios" en *Monografías de Ingeniería Sísmica*, vol. IS-6, A. H. Barbat, Ed. España: CIMNE, 1994.
- [3] E. Guagenti y V. Petrini, "Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità", *Proceedings of the 4th Italian, National Conference on Earthquake Engineering*, tomo I, pp. 145-153, 1989.
- [4] P. Angeletti, A. Bellina, E. Grandori, A. Moretti, y V. Petrini, "Comparison between Vulnerability Assessment and Damage Index, Some Results", *Proceeding of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 7, pp. 181-186, 1988.
- [5] F. Yépez, *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación*, tesis de grado para obtener el título de Doctor, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1996.
- [6] U. Mena, "Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas", tesis para obtener el título de Doctor, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2002.
- [7] J. Jiménez, "Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de Cuenca mediante técnicas de simulación", tesis para obtener el grado de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2002.
- [8] K. Gent, M. Astroza y G. Giuliano, G, "Calibración del índice de vulnerabilidad del GNDT a las edificaciones chilenas: Estructuras de albañilería confinada", *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas*, Concepción, Chile, 2005.
- [9] E. Maldonado, G. Chio y I. D. Gómez, "Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos", *Ingeniería y Universidad*, vol. 11, no. 2, pp. 149-168, 2007.
- [10] E. Maldonado, G. Chio y I. D. Gómez, "Funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico para edificaciones de mampostería utilizando técnicas de simulación", *DYNA*, año 75, no. 155, pp. 63-76, 2008.
- [11] E. Maldonado y G. Chio, *Vulnerabilidad sísmica en centros urbanos*. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 283 p, 2008.
- [12] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and control*, vol. 8, 1965.
- [13] T. Terano, K. Asai y M. Sugeno, *Fuzzy system theory and its applications*, Boston: Academia Press, 1992.
- [14] H. Bandemer y S. Gottwald, *Fuzzy sets, fuzzy logic, fuzzy methods with applications*, New York: Jhon Wiley and Sons, 1996.

- [15] D.P. Abrams, "Strength and behavior of unreinforced masonry elements", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, 1992.
- [16] ATC, Applied Technology Council. Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13, Redwood City, California, USA, 1985.
- [17] D. Solar y J. Caballero, "Caracterización estructural de las edificaciones de tapia en la ciudad de Bucaramanga", trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2007.
- [18] E. Maldonado y G. Chio, *Visión estructural de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, p. 156, 2007.
- [19] L. E. Yamín, A. E. Rodríguez, L. R. Fonseca, J. C. Reyes y C. A. Phillips, "Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones de adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria", *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*, vol.18, pp. 175-190, 2003.
- [20] K. Díaz y J. Ríos, Alternativas de rehabilitación de adobe y tapia pisada, [http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/746/1/MI\\_ICYA\\_2005\\_017.pdf](http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/746/1/MI_ICYA_2005_017.pdf).