

Índice de vulnerabilidad estructural ante los efectos de remoción en masa en edificaciones de mampostería basado en conjuntos difusos

Structural vulnerability index to the effects of landslides in masonry buildings based on fuzzy sets

Esperanza Maldonado Rondón*¹, Gustavo Chio Cho*

* Universidad Industrial de Santander. COLOMBIA

Fecha de recepción: 25/ 05/ 2011
Fecha de aceptación: 15/ 12/ 2011
PAG. 23 - 39

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo rápido y sencillo de evaluación de la vulnerabilidad estructural de edificaciones a escala regional. El modelo fue construido de forma que puede ser aplicado especialmente a zonas donde no se cuenta con información de daños reales. El método se basa en la identificación de las características más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá una edificación bajo la acción de un efecto de remoción en masa. La valoración de estas características se realizó mediante la determinación de catorce (14) 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, estas fueron procesadas mediante técnicas de lógica difusa. Una vez calificados cada uno de los parámetros, se procedió a relacionar sus calificaciones con su valor de importancia por medio de un factorial difuso. El resultado de esta relación por medio de técnicas basadas en conjuntos difusos corresponde al índice de vulnerabilidad.

Palabras Clave: Vulnerabilidad estructural, conjuntos difusos, índice de vulnerabilidad, efectos de remoción en masa, variables lingüísticas

Abstract

The aim of this paper is to develop a simple model to assess structural vulnerability of buildings at a regional scale. This model was especially made for areas where current reports on damages of buildings do not exist. The method is based on the identification of the most influential characteristics associated with damage in building under the action of the effect effects of landslides. The evaluation of these characteristics was carried out by means of the determination of fourteen (14) parameters. A vulnerability degree and an importance value based on experts' opinions were assigned to each of the 14 parameters. Due to the imprecision and subjectivity of the opinions, data was processed by means of fuzzy logic 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 factorial. The result of this relationship, according to techniques based on fuzzy set, is the building vulnerability index.

Keywords: Structural vulnerability, fuzzy set, vulnerability index, landslide effects, linguistic variables

1. Introducción

El desarrollo urbanístico acelerado que han vivido las ciudades Colombianas, debido al aumento descontrolado de la población, la imprevisión al construir, la escasez de vivienda económica que obliga a la población a edificar en zonas de alto riesgo, y en ciertos casos el pésimo manejo de las amenazas de origen naturales en los proyectos y construcción de las viviendas, conlleva a que ante una amenaza de este tipo, las pérdidas y el número de víctimas sean aún mayores.

1. Introduction

The accelerated urban development undergone by Colombian cities - due to a high population growth, lack of building design planning, economic housing shortage - has forced population to build in high risk areas, often underestimating nature disaster threats to housing construction projects and to population suffering losses and also leading to a higher death toll.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: emaldona@uis.edu.co



Por consiguiente, se debe trabajar tanto en identificar las zonas que posiblemente resultarán más afectadas al momento que se materialice una amenaza de origen natural como en planificar mejor la construcción de las edificaciones futuras, de tal forma que se logre una ciudad menos vulnerable; lo cual sólo será posible si se avanza en el estudio de la vulnerabilidad de las ciudades.

La experiencia ha demostrado que generalmente se espera que ocurran los desastres para actuar. La mayoría de estudios existentes de vulnerabilidad, amenaza y riesgo por deslizamientos se han incentivado a partir de tragedias del pasado y esto es lo que no debe suceder. Se debe empezar por realizar estudios completos y bien soportados, sin estar condicionados por la premura del tiempo que obliga a mostrar resultados y a proponer medidas inmediatas, desconociendo realmente la problemática que se desea solucionar. Luego, sólo se ofrecerá a la sociedad medidas eficaces de atención, de mejoramiento ante la acción de fenómenos por remoción en masa y de planificación cuando se conozca claramente, cómo son y cómo responden las edificaciones.

Por todo lo anterior, el objetivo principal de esta investigación es presentar una metodología para estimar la vulnerabilidad de las edificaciones de un área determinada ante los efectos de remoción en masa. El modelo se basa en la definición de las características más relevantes de una estructura de mampostería que pueden influir en su vulnerabilidad ante estos efectos. Las características citadas se han determinado mediante la elección de catorce parámetros. Los parámetros se clasificaron de acuerdo a tres o cuatro condiciones de calidad, a las que se les asignó un grado de vulnerabilidad determinado y, a su vez, a cada parámetro se le 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 los conjuntos difusos se utilizó el factorial difuso como medio para el cálculo del índice de vulnerabilidad. Este índice es la relación entre el grado de vulnerabilidad de cada parámetro y su valor de importancia.

Consequently, it is important to work identifying the potential areas which would be affected by an effective natural disaster threat as well as to provide a better construction planning for future buildings construction, in order to achieve a less vulnerable city. This would only be possible if a vulnerability study for the cities is developed.

Generally, experience has demonstrated that action is taken after disasters have occurred. Most existing vulnerability, threats and risks studies due to landslides have been encouraged after tragedies have taken place in the past and this practice must be avoided. It is necessary to develop complete and fully supported studies, not conditioned to time limitations urging to deliver prompt results and proposing immediate measures, which are unaware of the real problem intended to solve. Therefore, effective caution and improvement measures will be only offered to the community with a clear planning on how buildings are and how they respond to landslide effects.

Therefore, the main purpose of this research is to introduce a new methodology to estimate building vulnerability of a given area to landslide effects. The model is based on the assessment of the most relevant characteristics of a masonry structure, which may affect its vulnerability faced to abovementioned effects. Quoted characteristics have been determined by selecting fourteen parameters. Parameters were classified in accordance to three or four quality standards, which were assigned with a specific vulnerability degree. Besides, each parameter was assigned with an importance value. These vulnerability degrees and weight value were identified by expert opinions.

Since the proposed model involves expert opinions and its further application is based on the responses to a form which classifies each parameter; it was decided to employ fuzzy sets techniques. Among fuzzy sets diffuse factorial was used, as a means of calculation for vulnerability index. Such index is the relation between vulnerability degree of each parameter and its importance value.

2. Modelos de estimación de la vulnerabilidad

En la actualidad existen diferentes metodologías propuestas para estimar la vulnerabilidad de las edificaciones ante las acciones de los movimientos en masa; sin embargo, una buena parte utiliza datos históricos o se basa en la experiencia obtenida de eventos pasados. Luego en zonas donde no se cuenta con registro de daños pasados la construcción y adaptación de estas metodologías no es directa. Por ello, es importante desarrollar modelos de estimación de la vulnerabilidad que dependan de las características propias de las edificaciones y lugares donde van a ser implementadas.

Uzielli et al. (2008) presentan un método de estimación cuantitativa de la vulnerabilidad basado en un enfoque probabilístico. Parten de asociar la vulnerabilidad a la falta de la capacidad inherente de la estructura para preservar su integridad física y la funcionalidad durante la ocurrencia de un efecto de remoción en masa y estiman que depende principalmente de las características de la estructura y de su estado de mantenimiento. De esta manera, definen la vulnerabilidad en función de la tipología estructural y de su estado de mantenimiento.

Leone et al. (1996) proponen un modelo para evaluar los daños debido a los fenómenos de remoción en masa, basado en matrices de daño construidas a partir de estadísticas de los registros históricos. Para ello, introducen el concepto de vulnerabilidad de la estructura en función del tipo de estructura, de su edad y de su resistencia asignando un valor entre 0 y 1.

Finlay et al. (1997) ilustra un ejemplo de la estimación de la vulnerabilidad asignando un valor entre 0 y 1 de índice de vulnerabilidad basado en datos históricos, sin consideración de los diversos componentes que afectan la vulnerabilidad. Los valores son asignados de acuerdo con la experiencia histórica que se posee en el manejo de la amenaza.

3. Parámetros del modelo

El modelo propuesto se basa en la definición de 14 parámetros de la edificación y de su entorno más cercano, los cuales se consideran como los de mayor influencia en la vulnerabilidad de una edificación de mampostería ante los efectos de remoción en masa. A cada uno de ellos se le definió tres o cuatro condiciones de calidad (A, B, C y D), de la siguiente manera:

2. Vulnerability estimation models

Nowadays there are different proposed methodologies to estimate building vulnerability to landslide actions. However, a great deal employs historical data or they are based on the experience obtained from past events. Then, in areas lacking of past damages records, construction and adaptation of such methodologies is not direct. Therefore, it is important to develop vulnerability estimation models depending on the buildings own characteristics and the places where they will be implemented.

Uzielli et al. (2008) introduce a quantitative vulnerability estimation method based on a probabilistic approach. They start by associating vulnerability to the lack of inherent capacity of the structure to preserve its physical integrity and functional capacity during the occurrence of a landslide effect and, they estimate that this mainly depends on the structure characteristic and its maintenance conditions. So they define vulnerability in function of structural typology and maintenance conditions.

Leone et al. (1996) propose a model to evaluate damages due to landslide phenomena, based on damage matrixes built from statistics on past records. To do so, they introduce the concept of structure vulnerability in function of the structure type, age and its strength by assigning a value from 0 to 1.

Finlay et al. (1997) depict an example of vulnerability estimation by assigning a value from 0 to 1 to vulnerability index based on historical records, without considering several components affecting vulnerability. Values are assigned in accordance with historical experience available from threat management.

3. Model parameters

The proposed model is based on the assessment of 14 building parameters and their closest surroundings, which are considered of major influence on a masonry building vulnerability faced to landslide effects. Each one of them were assigned with three or four quality standards (A, B, C y D), as follows:

Parámetro 1 - Sistema estructural

- A. Mampostería confinada en todas las plantas.
- B. Mampostería reforzada en todas las plantas.
- C. Mampostería confinada pero no en todas las plantas.
- D. Mampostería que sólo posee vigas de confinamiento sin columnas o columnas sin vigas de confinamiento.
- E. Mampostería no confinada en todas las plantas.

Parámetro 2 - Calidad del sistema resistente

- A. Mampostería de buena calidad, con piezas homogéneas y buen ligamento.
- B. Mampostería de buena calidad, con piezas no muy homogéneas y bien ligadas.
- C. Mampostería de baja calidad con piezas homogéneas o no muy homogéneas, y bien ligadas.
- D. Mampostería de buena o baja calidad, con piezas no homogéneas o mal ligadas.

Parámetro 3 - Resistencia Estructural

- A. Edificación con un valor de $\alpha < 1$. (a es la relación capacidad-demanda a movimientos en la base de la edificación)
- B. Edificación con un valor de $0.6 = \alpha < 1$.
- C. Edificación con un valor de $0.4 = \alpha < 0.6$.
- D. Edificación con un valor de $\alpha < 0.4$.

Parámetro 4 - Configuración en altura

- A. Edificación con $-\Delta M/M < 10\%$ o edificaciones de un solo piso. (ΔM es la variación de masa máxima entre dos pisos, siendo (-) para disminución y (+) para aumento; M es la masa del piso inferior).
- B. $10\% \leq -\Delta M/M < 20\%$.
- C. $-\Delta M/M > 20\%$.
- D. $+\Delta M/M > 0$.

Parámetro 5 - Ubicación de la edificación

- A. Edificación que cumpla una de las siguientes condiciones:

1. Ubicada sobre una pendiente menor a 30° o fuera de un talud mayor de 30° que cumple con las distancias de aislamiento requeridas establecidas.

Parameter 1 – Structural system

- A. Squared Masonry in every floor plan
- B. Reinforced masonry in every floor plan
- C. Squared masonry not in every floor plan
- D. Masonry which only has supporting beams, without columns, columns without supporting beams
- E. Non-squared masonry in every floor plan

Parameter 2 – quality of load-bearing structure

- A. High quality masonry, with uniform pieces properly bonded
- B. High quality masonry, with not quite uniform pieces but properly bonded
- C. Low quality masonry with uniform and non-uniform pieces, properly bonded
- D. High and low quality masonry, with non-uniform pieces or improperly bonded

Parameter 3 – Structural strength

- A. Building with a value of $\alpha < 1$. (a is the capacity-demand relation to movements in the building foundation)
- B. Building with a value of $0.6 = \alpha < 1$.
- C. Building with a value of $0.4 = \alpha < 0.6$.
- D. Building with a value of $\alpha < 0.4$.

Parameter 4 – Height lay out

- A. Building with $-\Delta M/M < 10\%$ or only one storey building (ΔM is the maximum mass variation between two storey, being (-) for decrease and (+) for increase; M is the mass of lower storey).
- B. $10\% \leq -\Delta M/M < 20\%$.
- C. $-\Delta M/M > 20\%$.
- D. $+\Delta M/M > 0$.

Parameter 5 – Building location

- A. Building shall meet one of the following conditions:

1. Building placed on a gradient lower than 30° or beyond a slope higher than 30° , fulfilling required isolation distances already established.

2. Ubicada arriba de la corona de una ladera con pendiente del terreno entre 30° y 45°, sobre un talud de altura inferior a 5 metros pero que cuenta con un muro de contención en estructura rígida de igual o mayor altura total del talud.
3. Localizada abajo de la base o pie del talud, con altura total inferior a 5 metros, con muro de contención en estructura rígida de altura igual o superior a la altura total del talud.

B. No se cumple ni A ni C.

C. Edificación que presenta una de las siguientes características:

1. Ubicada sobre el talud con pendiente natural superior a 30° o fuera de él pero donde no se cumple con las distancias de aislamiento requeridas.
2. Construido sobre cortes.
3. Ubicada sobre un corte realizado en una ladera con pendiente natural del terreno superior a 30°.
4. Ubicada sobre relleno en ladera.

Parámetro 6 - Posición de la cimentación

- A. La cimentación está ubicada a una misma cota. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- B. La diferencia máxima entre las cotas de la cimentación es inferior a 1 metro con ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén o la fundación se encuentra a una misma cota pero hay presencia de empuje no equilibrado debido al terraplén.
- C. La diferencia máxima entre las cotas de la cimentación es inferior a 1 metro con presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- D. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es superior a un metro.

Parámetro 7 - Tipo de cimentación

- A. Pilotes.
- B. Cimentación corrida.
- C. La edificación se encuentra sobre una losa de cimentación.
- D. La edificación se apoya sobre elementos esbeltos que descansan en zapatas profundas.
- E. La edificación se apoya sobre elementos esbeltos que descansan en zapatas en la superficie del terreno.

2. Building placed on a hill top with land gradient between 30° and 45°, on a slope lower than 5 meters high, but counting with a rigid-structure-retaining wall, which height is equal or higher than the slope total height.
3. Building placed under the base or slope foundation, with a total height lower than 5 meters, counting with a rigid-structure-retaining wall, which height is equal or higher than the slope total height.

B. Not fulfilling A either C.

C. Building having one of the following characteristics:

1. Building placed on the slope with natural gradient lower than 30° or out of its scope, but not fulfilling required isolation distances
2. Built on cross sections
3. Placed on a cross section of a natural land gradient higher than 30°
4. Placed on a back-filled hillside

Parameter 6 – Foundation location

- A. Foundation is located at the same benchmark. Lack of unbalanced pressure due to back-filling.
- B. Maximum differences among foundation benchmarks are lower than 1 meter, with lack of unbalanced pressure due to backfill or; because the foundation is located at the same benchmark but there is presence of unbalanced pressure due to backfill.
- C. Maximum differences among foundation benchmarks are lower than 1 meter, with presence of unbalanced pressure due to backfill.
- D. Maximum differences among foundation benchmarks are higher than 1 meter

Parameter 7 – Foundation Types

- A. Piles
- B. Continuous footing
- C. Building on foundation slab
- D. Building is supported on slender elements laying on deep footings
- E. Building is supported on slender elements laying on the ground-surface footing

Parámetro 8 - Tipo de suelo

- A. Edificación cimentada sobre roca o suelo rígido.
- B. Edificación cimentada sobre llenos.

Parámetro 9 - Vegetación del sitio

- A. La edificación se encuentra sobre un sitio donde se ha mantenido el contorno natural.
- B. La edificación se encuentra sobre un sitio donde no se ha mantenido el contorno natural y se conserva una pequeña parte de la vegetación natural del sitio.
- C. El sitio donde se ha construido la edificación ha sufrido una transformación importante y se ha realizado una limpieza discriminada.

Parámetro 10 - Muros de contención

- A. La edificación no requiere muros de contención y si los requiere se cumple lo siguiente:
 - a. Los muros estén diseñados para resistir la acción del suelo y del agua.
 - b. Están cimentados sobre roca o suelo firme.
 - c. Los muros cuentan con un sistema de drenaje detrás de la pared vertical adecuado (Suarez, 2009).
 - d. Los materiales de relleno son limpios y compactos de acuerdo a las normas de la ingeniería.
- B. Edificación que no aplica en A o en C.
- C. Requiere muro pero no cuenta con él. La edificación requiere muros estructuralmente pero estos:
 - a. Están contruidos inadecuadamente, utilizando material flojo o mal compactado.
 - b. El relleno cuenta con troncos, árboles, vegetación, rocas inestables, escombros de construcción etc.
 - c. No se cuenta con un sistema de drenaje adecuado.

Parámetro 11 - Sistema de drenaje

- A. Se cumple lo siguiente:
 - a. Existe sistema de alcantarillado.
 - b. Existen drenajes superficiales para las aguas de escorrentía y estas descargan a un sistema de alcantarillado.
 - c. Los tanques de almacenamiento son herméticos y cimentados adecuadamente.
- B. No se cumple ni A ni C.

Parameter 8 – Type of soil

- A. Building founded on rocky or rigid soil
- B. Building founded on back-fills

Parameter 9 – Vegetation existing on the area

- A. Building is in an area where natural surrounding has been maintained
- B. Building is in an area where natural surrounding has not been maintained and little original vegetation is kept.
- C. The area where the building has been constructed has suffered a major changes and a discriminated cleaning has been executed.

Parameter 10 – Retaining walls

- A. Building does not require retaining walls. If needed they shall meet the following:
 - a. Walls must be designed to endure soil and water actions
 - b. Walls must be founded on rocky or firm soil.
 - c. Walls must have a proper drainage system behind vertical wall (Suarez, 2009).
 - d. Back-fill materials must be clean and compact in accordance with engineering regulations.
- B. Building not fulfilling A or C.
- C. Building requires a retaining wall but does not count with it. Building requires structural walls but they:
 - a. They are improperly constructed using loose-fitting or under-compacted material
 - b. Back-fill contains logs, trees, vegetation, unstable rocks, construction waste material, etc.
 - c. A proper drainage system is not available

Parameter 11 - Drainage system

- A. Meet the following
 - a. Sewage system is available
 - b. There are surface drainages for rainy waters which discharge into a sewage system.
 - c. Storage tanks are airtight and properly founded.
- B. Not fulfilling A or C.

C. Se cumple lo siguiente:

- a. Las aguas de escorrentía recogidas en la cubierta de la edificación son entregadas directamente al talud.
- b. Las aguas negras son entregadas directamente al talud.
- c. No existen drenajes superficiales.
- d. Los tanques de almacenamiento no son herméticos y no están cimentados adecuadamente.

Parámetro 12 - Manejo de basuras

- A. Existe un sistema de recolección de basuras adecuado.
- B. El sistema de recolección no es adecuado o se vierte la basura directamente sobre y en la ladera.

Parámetro 13 - Estado de conservación del entorno

- A. El sector cuenta con sistemas de drenaje limpios. No existen uniones rotas en el alcantarillado ni hay presencia de escapes en tubos de suministro. No se observan filtraciones de agua en el suelo.
- B. No clasifica en A ni en C.
- C. El sector no cuenta con sistema de drenaje limpio y además se presenta por lo menos uno de los siguientes aspectos:
 - a. Existen uniones rotas en el alcantarillado.
 - b. Hay presencia de escapes en tubos de suministro.
 - c. Se observan filtraciones de agua en el suelo.

Parámetro 14 - Estado de conservación de la edificación

- A. Muros en buena condición, sin fisuras visibles.
- B. Muros que presentan fisuras no extendidas.
- C. Muros con fisuras de tamaño medio entre 2 a 3 milímetros de ancho, edificio que no presenta fisuras pero que se caracteriza por un estado mediocre de conservación de la mampostería.
- D. Muros que presentan un fuerte deterioro de sus materiales constituyentes ó fisuras de más de 3 milímetros de ancho.

C. Fulfilling the following:

- a. Rainy waters collected by the building roof are delivered directly to the slope.
- b. Sewage waters are delivered directly to the slope.
- c. There are no surface drainages available.
- d. Storage tanks are not airtight and they are not properly founded.

Parameter 12 – Handling of waste materials

- A. There is an adequate waste collection system
- B. Waste collection system is not appropriate or waste material is directly dumped to the hillside.

Parameter 13 – Surrounding conservation conditions

- A. The area has clean drainage systems. There are no miss-matched joints in the sewage system or leakage in the supply piping either. Water leakage is not observed on the soil.
- B. Does not meet A either C.
- C. The area counts with a clean drainage system. Furthermore, there is at least one of the following aspects:
 - a. There are broken joints alongside the sewage system
 - b. There are leakages in the supply piping
 - c. There are visible leakages on the soil

Parameter 14 – Building Preservation Conditions

- A. Walls in good conditions, non visible crackings.
- B. Walls having non-extended crackings.
- C. Walls having medium size crackings, ranging from 2 up to 3 millimeters width. Building that does not have crackings but it is characterized by a poor masonry preservation conditions.
- D. Walls have a major material damage or have crackings higher than 3 millimeters width.

Cada parámetro a su vez, tiene asociado un valor de importancia dentro del estimativo de la vulnerabilidad de toda la estructura.

Each parameter has, in turn, an associated importance value in the vulnerability estimation of the whole structure.

4. Definición del modelo del índice de vulnerabilidad

4. Definition of the vulnerability index model

La vulnerabilidad en este artículo se define cuantitativamente como la susceptibilidad de los elementos a sufrir daños debido a los efectos de los fenómenos de remoción en masa. El método propuesto constituye una descripción completa de la información necesaria para la obtención de una expresión cuantitativa de la vulnerabilidad denominada Índice de vulnerabilidad, el cual relaciona los grados de vulnerabilidad de los parámetros que más influyen en la vulnerabilidad de las edificaciones y sus valores de importancia dentro del estimativo total de vulnerabilidad. Los parámetros considerados se asocian de acuerdo a las características propias de las estructuras, a su ubicación y a factores de entorno. A su vez, el aporte asociado a aspectos estructurales puede ser directo e indirecto, ver Figura 1.

In this paper vulnerability is quantitatively defined as the susceptibility of the elements to suffer damages due to landslides effects. The proposed model is a complete description of required information to obtain a quantitative expression of vulnerability, called Vulnerability Index. This index relates parameters vulnerability degrees mostly affecting building vulnerability and their importance values in the total vulnerability estimation. Selected parameters are associated in accordance with the structures own characteristics, their location and surrounding factors. Besides, the input associated to structural aspects can be direct or indirect, see Figure 1.

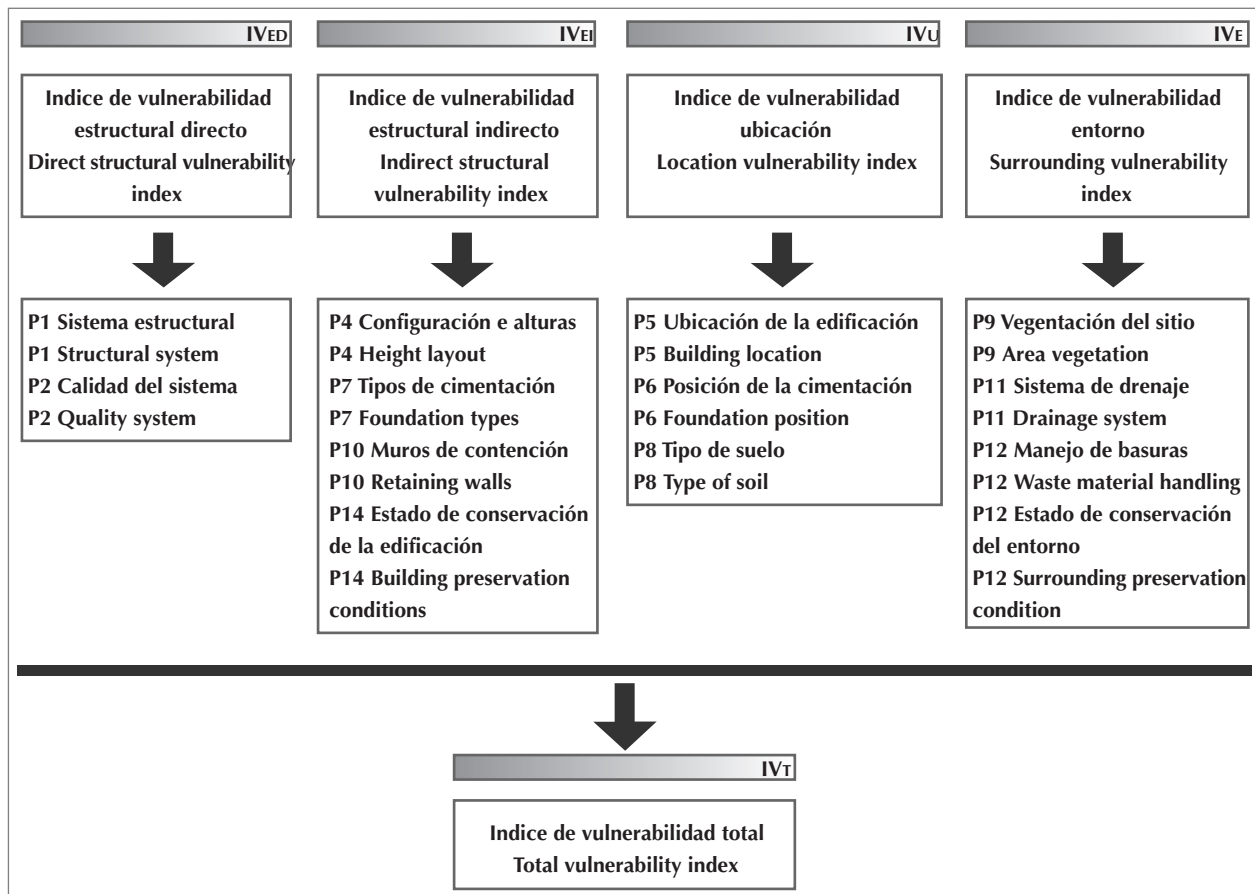


Figura 1. Esquema de la definición del modelo del índice de vulnerabilidad
 Figure 1. Definition lay out of vulnerability index model

El modelo se basa en la estimación de un índice de vulnerabilidad total (IV_T) el cual es la contribución de cuatro estimativos de índices de vulnerabilidad parciales; uno asociado a los aspectos directos (IV_{ED}), otro a los estructurales indirectos (IV_{EI}), otro a los aspectos de ubicación de las edificaciones (IV_U) y, finalmente uno asociado a los aspectos de entorno (IV_E). Cada uno de ellos se encuentra en un rango de 0 (nada vulnerable) a 1 (absolutamente vulnerable), ver Figura 1.

Cada índice se estima a partir de las calificaciones de las diferentes condiciones de calidad de los parámetros seleccionados (A, B, C y D) llamados K_I y los valores de importancia de cada uno de los parámetros dentro de la determinación de la vulnerabilidad total de la edificación, W_i . Los valores de K_I y W_i fueron trabajados a partir de números difusos dada la ambigüedad en su definición (Zadeh, 1965; Chakroborty y Kikuchi, 1990; Chao y Ayyub, 1995; Maldonado 2007). La aritmética difusa (Bandemer y Gottwald, 1996; Tee, et. al., 1988) se empleó para relacionar las calificaciones de cada parámetro (K_I) y sus respectivos valores de importancia (W_i). El método propuesto para combinar la información difusa, con desigual importancia o pesos, fue el factorial, y con él se determinó el índice de vulnerabilidad, expresándolo como:

$$I.V. = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \varepsilon_i) \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = K_i * W_i \quad (2)$$

Donde I.V. es el índice de vulnerabilidad; ε_i es el i -ésimo del n factor de vulnerabilidad (cada uno definido en el rango de [0,1]); K_i es el grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro i ; W_i es una medida de la importancia asociada al parámetro i respecto a los demás parámetros y n es el número de parámetros del modelo.

De esta forma cada uno de los índices se determinará de la siguiente manera:

$$I.V_{ED} = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - \varepsilon_i) \quad (3)$$

Los parámetros que están asociados a este índice son el sistema estructural, la calidad y la resistencia estructural.

$$I.V_{EI} = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \varepsilon_i) \quad (4)$$

The model is based on the estimation of a total vulnerability index (IV_T), which is the input of four estimated partial vulnerability indexes. One is associated with direct aspects (IV_{ED}), other with indirect structural aspects (IV_{EI}), other with building locations (IV_U) and finally another associated with surroundings aspects (IV_E). Each one of them has a range from 0 (non vulnerable) to 1 (completely vulnerable). See Figure 1.

Each index is estimated from qualifications of different quality conditions on selected parameters (A, B, C and D) named K_I . The importance values of each parameter in the total vulnerability determination of the building are named W_i . And values K_I and W_i were analyzed under fuzzy sets because of their definition ambiguity (Zadeh, 1965; Chakroborty and Kikuchi, 1990; Chao and Ayyub, 1995; Maldonado 2007). Diffuse arithmetic (Bandemer y Gottwald, 1996; Tee, et. al., 1988) was employed to relate qualifications of each parameter (K_I) and their respective importance values (W_i). The proposed method to combine diffuse information - of uneven importance or weights - was diffuse factorial, which was used to determine vulnerability index, expressed as:

Where I.V. is the vulnerability index; ε_i is i -th of n vulnerability factor (each one defined in a range of [0.1]); K_i is the vulnerability degree of i parameter category i ; W_i is the importance associated to parameter i in relation to the other parameters and; n is the number of parameters in the model.

Therefore, each index will be determined as follows:

Parameters associated to this index are structural system, quality and structural strength.

En este índice estarán los parámetros asociados con la configuración en altura, el tipo de cimentación, los muros de contención y el estado de conservación.

This index will include parameters associated with height lay out, type of foundation, retaining walls and preservation conditions.

$$I.V_U = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - \varepsilon_i) \quad (5)$$

En este índice se considerarán los parámetros asociados a la localización, al nivel de cimentación y al tipo de suelo donde se encuentre la edificación.

This index will consider parameters associated with location, foundation level and the type of soil where building is constructed.

$$I.V_L = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \varepsilon_i) \quad (6)$$

En este índice se consideran los parámetros que forman parte del entorno de la edificación pero que están directamente relacionados con ellas y cuya afectación pueden alterar su vulnerabilidad. Luego, los parámetros asociados a este grupo son: vegetación del sitio, sistema de drenaje, manejo de basuras y conservación del entorno.

This index considers the parameters related to building surroundings, which are directly related to them, whose affectation can actually damage vulnerability. Consequently, parameters associated with this group are: site vegetation, drainage system, waste material control and surrounding preservation.

Luego, para la estimación del índice de vulnerabilidad total primero se escoge el mayor valor entre los índices de vulnerabilidad estructural directa IV_{ED} y el índice correspondiente a la ubicación, IV_U ; luego se toman los índices de vulnerabilidad restantes y se realiza un promedio de ellos. Finalmente, estos valores se reemplazan en la Ecuación 7.

In order to estimate total vulnerability index, the higher value among direct structural vulnerability index IV_{ED} and, location index I_{VU} are considered in the first place. Then the remaining vulnerability indexes are accounted and they are averaged out. Finally, these values are replaced in Equation 7.

$$I.V_T = IV_{ED} \circ U \left[1 + 0.2 \frac{IV_{EI} + IV_E}{2} \right] \leq 1 \quad (7)$$

El valor del índice de vulnerabilidad total será siempre menor o igual a 1.

Total vulnerability index will always be lower or equal to 1.

5. Algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad

5. Algorithm used for the calculation of vulnerability index

El cálculo de cada uno de los índices de vulnerabilidad incluyendo el total, se realizó mediante la utilización de conjuntos difusos de la siguiente manera:

Calculation of each vulnerability index, including total index, was developed by means of the use of fuzzy sets, as follows.

- 1) Translación de las variables de calificación de cada una de las condiciones de calidad de los catorce parámetros a conjuntos difusos, mediante la definición de las correspondientes funciones de pertenencia construidas a partir de opinión de expertos.
- 2) Conversión de las variables de importancia de cada parámetro a conjuntos difusos mediante las funciones de pertenencia construidas a partir de opinión de expertos.

- 1) Translation of qualification variables of fourteen-quality conditions parameters into fuzzy sets is made by means of a definition of the corresponding membership functions based on expert opinions.
- 2) Conversion of importance variables of each parameter into fuzzy sets by employing membership functions based on expert opinions.



3) Combinación de las variables de calificación y las variables de importancia difusas para obtener los conjuntos difusos que representen los índices de vulnerabilidad expresados en las Ecuaciones 2 a 7. Esta combinación da como resultado los conjuntos difusos llamados índice de vulnerabilidad estructural indirecta, estructural directa, de ubicación, de contorno e índice de vulnerabilidad total.

4) Transformación del conjunto difuso resultante, Índice de vulnerabilidad total a una expresión lingüística como muy baja, baja, media, alta y muy alta vulnerabilidad. La transformación de un conjunto difuso a una expresión lingüística natural es un proceso relativamente simple, el cual involucró 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 a la variable lingüística del 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 de la Ecuación 7.

6. Variables lingüísticas utilizadas

En la definición de los grados de vulnerabilidad de los parámetros del modelo y de los valores de importancia a partir de números difusos fue necesario definir adecuadamente las variables lingüísticas para describir los diferentes grados de vulnerabilidad y valores de importancia. Estas variables lingüísticas fueron utilizadas para calificar cada una de las condiciones de calidad impuestas a cada parámetro y para definir el peso de cada parámetro dentro de la estimación de la vulnerabilidad total de la estructura. Así pues, las variables lingüísticas naturales seleccionadas para calificar los grados de vulnerabilidad fueron muy baja, baja, media, alta y muy alta. Cada una de estas variables fue representada por conjuntos difusos de la siguiente manera:

- Vulnerabilidad muy baja = $\{1 | 0, 0 | 0.2\}$
- Vulnerabilidad baja = $\{0 | 0.15, 1 | 0.3, 0 | 0.45\}$
- Vulnerabilidad media = $\{0 | 0.35, 1 | 0.5, 0 | 0.65\}$
- Vulnerabilidad alta = $\{0 | 0.55, 1 | 0.7, 0 | 0.85\}$
- Vulnerabilidad muy alta = $\{0 | 0.8, 1 | 1\}$

3) Permutation of qualification variables and fuzzy importance variables to obtain fuzzy sets representing vulnerability indexes expressed in Equations 2 to 7. Such permutation provides fuzzy set results called indirect structural, direct structural, location, surroundings and total vulnerability indexes.

4) Transfiguration of the remaining fuzzy set, total vulnerability index into linguistic expression such as very low, low, medium, high or very high vulnerability. Transfiguration of a fuzzy set into natural linguistic expressions is a relatively simple process, which involves distance determination of the remaining fuzzy set to each fuzzy set representing the quoted linguistic expressions. The minimum distance between the remaining fuzzy set and the fuzzy sets representing linguistic variables, is the linguistic expression associated with the vulnerability index.

5) Association of vulnerability index to the linguistic variable calculated from a non-fuzzy numerical value. It was developed by choosing a numeric value from function gravity center of membership function resulting from Equation 7.

6. Employed linguistic variables

For the definition of vulnerability degrees of this model's parameters and importance values obtained from fuzzy sets, it was necessary to accurately define the linguistic variables to describe different degrees of vulnerability and importance values. Such linguistic variables were employed to characterize each quality condition assigned to each parameter and; to define the importance of each parameter in the total structural vulnerability estimation. Therefore, natural linguistic variables selected to characterize vulnerability degrees were very low, low, medium, high or very high. Each variable was represented by fuzzy sets as follows.

- Very low vulnerability = $\{1 | 0, 0 | 0.2\}$
- Low vulnerability = $\{0 | 0.15, 1 | 0.3, 0 | 0.45\}$
- Medium vulnerability = $\{0 | 0.35, 1 | 0.5, 0 | 0.65\}$
- High vulnerability = $\{0 | 0.55, 1 | 0.7, 0 | 0.85\}$
- Very high vulnerability = $\{0 | 0.8, 1 | 1\}$



Siendo de la forma:

Being:

$$y = \{\mu_{(x)}|x\} \quad (8)$$

Donde $\mu_{(x)}$ denota el grado de pertenencia de x , definiendo x como el 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.

Where $\mu_{(x)}$ indicates x membership degree; defining x as the universe of building vulnerability in fuzzy sets.

The graphical representation of membership functions of linguistic variables employed in this research are shown in Figure 2.

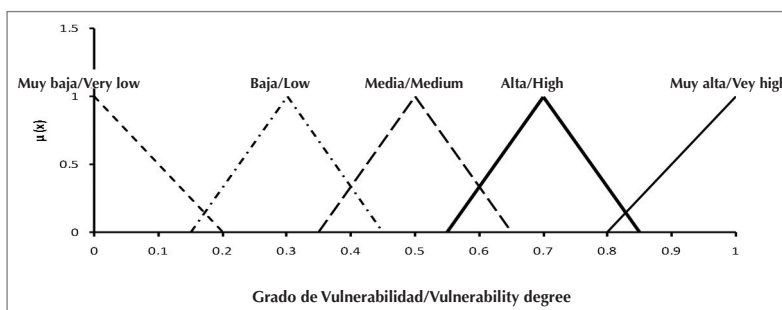


Figura 2. Funciones de pertenencia de las variables lingüísticas muy baja, baja, medio, alta y muy alta
 Figure 2. Membership functions of linguistic variables vey low, low, medium, high or very high

7. Valores de calidad y de importancia del modelo

Las funciones de pertenencia de las condiciones de calidad y de los valores de importancia de los parámetros construidas para ser utilizadas en el modelo propuesto se presentan en las Tablas 1 y 2.

7. Quality and importance values of the model

Membership functions of quality conditions and created importance values of parameters to be analyzed by the proposed model are presented in Tables 1 and 2.

8. Forma de aplicación del modelo

Para la aplicación del modelo, es necesario realizar el inventario de las edificaciones de la zona de estudio. Este inventario consiste en recopilar la información necesaria para asignarle una condición de calidad a cada uno de los catorce parámetros del modelo. Posteriormente, esta información es almacenada en un SIG, en el cual está incorporado el cálculo del índice de vulnerabilidad (UIS y CDMB, 2011). Finalmente, mediante el procesamiento de la información en el SIG se obtiene el mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio. En este mapa se identifica el grado de vulnerabilidad de cada una de las viviendas que conforman la zona.

8. Model application method

For the application of this model, it is necessary to make an inventory including the buildings of the area under study. Such inventory consists of gathering the necessary information to assign a quality standard to each fourteen parameters of the model. Afterwards the information is stored by a SIG, which includes the vulnerability index calculation (UIS and CDMB, 2011). Finally by means of SIG data processing, a vulnerability mapping is obtained for the area under study. Such mapping identifies vulnerability degree of each building in the area.

Tabla 1. Funciones de pertenencia para los valores de calidad de cada uno de los parámetros, K_i
 Table 1. Membership functions for quality values of each K_i parameter

#	Categoría	$\mu(x)$												
		0	0.15	0.2	0.3	0.35	0.45	0.5	0.55	0.65	0.7	0.8	0.85	1
1	A-B	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
	D-E	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
2	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
	C-D	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
3	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-	-
	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.25	1	-
4	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
	C-D	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
5	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.25	1	-
6	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
7	A-B-C	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	E	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
8	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.25	1	-
9	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
10	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
11	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
12	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
13	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
14	A	1	0.25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-

se refiere al número del parámetro
 # refers to parameter number

Tabla 2. Funciones de pertenencia para los valores de importancia, W_i
 Table 2. Membership functions for W_i importance values

#	$\mu(x)$												
	0	0.15	0.2	0.3	0.35	0.45	0.5	0.55	0.65	0.7	0.8	0.85	1
1	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
2	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
3	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
4	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.25	1
6	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
8	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
9	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-
11	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
12	-	0	0.33	1	0.67	0	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	0	0.67	1	0.67	0	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	0	0.67	1	0.33	0	-

se refiere al número del parámetro
 # refers to parameter number

9. Aplicación del modelo

El modelo del índice de vulnerabilidad fue aplicado a un sector de la ciudad de Bucaramanga ubicado en la zona llamada El Porvenir, el cual está conformado por 1.110 viviendas, de las cuales el sistema estructural de mampostería confinada en todas sus plantas se presenta en un 54.7%, mientras que el restante 45.3% corresponde a estructuras confinadas en el primer piso pero con los siguientes en no confinada o semiconfinada. Las edificaciones en su mayoría cuentan con dos plantas (54.5%) y las restantes se presentan en tres pisos (24.5%), un piso (20%) y hasta cuatro pisos (1%). Fueron construidas en los años 80 y 90, siguiendo las normas sismoresistentes vigentes en su momento. Las casas fueron entregadas a sus propietarios con un solo piso construido bajo la posibilidad de llevarlas a dos pisos. Luego, al pasar el tiempo muchas de ellas han sido ampliadas en altura a dos y hasta tres pisos pero sin seguir patrones de diseño y construcción adecuados. La zona se encuentra en la parte superior de un talud y algunas de las casas están muy cerca de inicio de la pendiente del talud.

Luego, de realizado el inventario y los cálculos respectivos el mapa de vulnerabilidad obtenido se presenta en la Figura 3.

9. Model application

Vulnerability index model was applied on a sector in Bucaramanga city, located in an area called El Porvenir, which has 1.110 houses having squared masonry in every storey that corresponds to 54.7%, while the remaining 45.3% are squared structures in the first floor, but the following floors have square or semi-square structures. Most buildings are two-storey buildings (54.5%) and the remaining ones are: three-storey buildings (24.5%), one-storey (20%) and even four-storey buildings (1%). They were built in the 80's and 90's, according to anti-seismic regulations in force at that time. One-storey houses were delivered to owners who had the possibility to build a second floor. Over the years, most of them were enlarged into two and three storey houses, without following proper construction design patterns. The area is located on a slope and some houses are quite close to the slope gradient edge.

Then the inventory was made and respective vulnerability mapping calculations were obtained, which are presented in Figure 3.

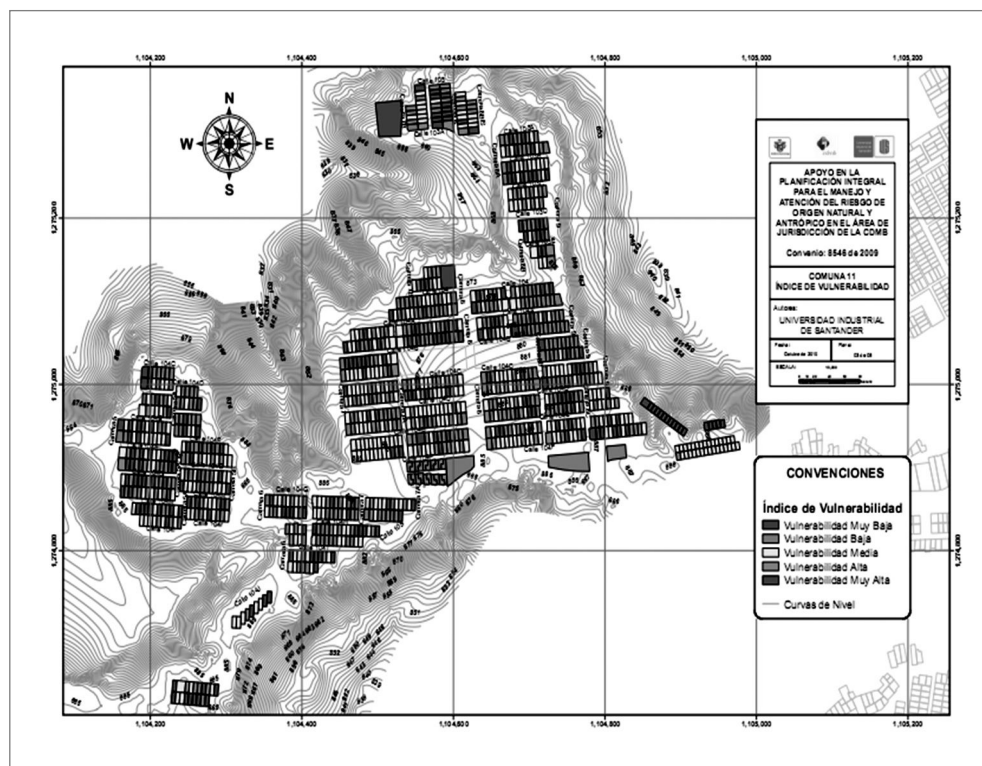


Figura 3. Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio
Figure 3. Vulnerability mapping of the area under study

El mapa de Índice de vulnerabilidad muestra que el 19.73% se califican con un índice de vulnerabilidad muy bajo; estas corresponden a casas de uno o dos pisos con un sistema estructural de confinamiento en todas las plantas. Así mismo, el 25.95% está asociado a un índice de Vulnerabilidad bajo. De la misma forma, se registra un 36.49%, con un índice de vulnerabilidad media. Con un índice de vulnerabilidad alta el 16.22%; finalmente fueron calificadas con vulnerabilidad muy alta el 1.62% de la muestra total. Estas últimas se encuentran en la zona sur-oriental y noreste del barrio; y su alto grado de vulnerabilidad se explica por su cercanía al talud.

10. Conclusiones

En la actualidad ante la necesidad de realizar estudios de vulnerabilidad debido a diferentes amenazas naturales se llega a aplicar modelos propuestos en otros contextos o a construir los propios. El utilizar modelos construidos con datos de otros lugares, donde las características estructurales son diferentes a las propias, se corre el riesgo de utilizar el modelo inadecuado y por consiguiente de obtener resultados incorrectos. A su vez, el construir un modelo propio para evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones de ciudades de nuestro país requiere una buena información de registros de daños ocurridos en eventos pasados o datos experimentales del comportamiento de las estructuras, los cuales generalmente no se tienen. Por consiguiente, se debe ampliar los estudios de recopilación y análisis de información debidos a movimientos en masa y a su vez, se debe fortalecer la investigación en lo referente al comportamiento estructural de las edificaciones. Pero mientras este proceso se da 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 de ciudades como Bucaramanga, 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 que se cuente con mayor información se desarrollen otros modelos.

The vulnerability index mapping shows that 19.73% of houses are qualified with a very low vulnerability index; these are one or two-storey houses with a square structural system in every storey. Then 25.95% of buildings were qualified with low vulnerability index. 36.49% of them were registered with a medium vulnerability index. A high vulnerability index was assigned to 16.22% and finally 1.62% with a very high vulnerability index in the whole sample. The latter are located in the neighborhood south-east sector and the high degree of vulnerability is explained by their proximity to the slope.

10. Conclusions

Facing the current need of conducting vulnerability studies due to several nature threads, it is a common practice to apply the proposed models on other contexts and to build own models. By applying existing models created from other locations data, where structural characteristics are different, it exposes us to the risk of using an inadequate model and consequently reaching wrong results. On the other hand, creating an own building vulnerability model, for different cities in our nation, demands accurate information about damages in past events or structural experimental behavior records, which are often not available. Therefore, data collection and information analysis due to landslides must be broadened. Hence, the research on building structural behavior shall be strengthened. While this process takes place, it is necessary to develop new models, by using the existing resources. Therefore, the alternative of using expert opinions for these kinds of studies is quite appropriate.

In the case of cities vulnerability such as Bucaramanga, where there are no damage records on masonry buildings either experimental information, the application of the proposed model proved to be simple and practical; therefore, its use is appropriate for studies at great scale. It is expected that new models will be developed based on further information.

La metodología propuesta se fundamenta en la evaluación de los parámetros que más influyen en la vulnerabilidad de las edificaciones ante los efectos de remoción en masa, los cuales corresponden al sistema estructural, a la calidad del sistema resistente, a la posición de la cimentación, al tipo de suelo, ubicación de la edificación, existencia de elementos de contención, el sistema de drenajes, la vegetación del sitio, a la configuración en elevación y al estado de conservación de la edificación y del entorno. Estos pueden ser cualitativos o cuantitativos, pero son definibles a partir de información general de la edificación.

Los parámetros seleccionados para la definición del modelo y sus respectivas clasificaciones obedecieron a condiciones propias de las edificaciones del 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 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, 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 vulnerabilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta, asociándole un valor numérico y una representación de la ambigüedad de la respuesta.

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 establecer comparaciones entre diferentes zonas y detectar las más vulnerables. Convirtiéndose en una buena herramienta para los planes de mitigación sísmica y planificación territorial.

El modelo propuesto ha sido incorporado en la construcción de funciones de vulnerabilidad planteadas en el proyecto Apoyo en la planificación para el manejo y atención del riesgo de origen natural y antrópico en el área de jurisdicción de la CDMB (UIS y CDMB, 2011).

11. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS), a la Corporación de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB),

The proposed methodology is based on the evaluation of parameters that affect at a great extent the building vulnerability faced to landslide effects, which correspond to structural system, quality of strength system, foundation position, type of soil, building location, retaining elements availability, drainage systems, area vegetation, height lay out and preservation conditions of the building and surroundings. They may be qualitative or quantitative parameters, but they are defined based on general information of the building.

The parameters chosen for the definition of this model and its respective classifications correspond to buildings' own environmental conditions. Hence, the proposed model is well applicable to cities having similar characteristics to the ones already studied. Besides, vulnerability degree of each parameters classifications and its importance value were defined by means of the use of fuzzy sets theory, which makes the model applicable on places not counting with damage information records either experimental information on study interest areas.

Based on the relation between vulnerability degree of different parameters and their respective importance value, a vulnerability index was defined. This index qualifies structure vulnerability as very low, low, medium, high or very high, by associating it with a numeric value and a representation of response ambiguity.

The method is greatly applicable to high-scale studies, where a great amount of buildings are to be assed by using the minimum possible information. In this way, it allows the comparison among different zones to detect the most vulnerable ones, thus becoming a useful tool for seismic mitigation plans and land-use planning.

The proposed model has been included in the vulnerability construction functions stated by the Planning support project for natural sources and man-induced risks - handling and care - in the jurisdiction area of CDMB (UIS and CDMB, 2011).

11. Acknowledgements

The authors are thankful for the support received from Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga Plateau Defense Association (CDMB)

y a la Alcaldía de Bucaramanga, por el apoyo recibido a partir del proyecto de investigación titulado Apoyo en la planificación para el manejo y atención del riesgo de origen natural y antrópico en el área de jurisdicción de la CDMB (UIS y CDMB, 2011).

and Bucaramanga City Hall, during the development of research study titled Planning support project for natural sources and man-induced risks - handling and care - in the jurisdiction area of CDMB (UIS and CDMB, 2011).

12. Referencias / References

- Bandemer H., Gottwald S. (1996), *Fuzzy sets, fuzzy logic, fuzzy Methods with Applications*, Jhon Wiley and sons, New York.
- Chakroborty P., Kikuchi S. (1990), *Application of Fuzzy Set Theory to the Analysis of Capacity and Level of Service of Highways*, Proceedings of the First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, Maryland, USA.
- Chao R., Ayyub B. (1995), *Distributions with Fuzziness and Randomness*, Proceedings of ISUMA-NAFIPS'95.
- Finlay P.J., Mostyn G.R., Fell R. (1997), *Vulnerability to landsliding*, Quarterly Journal of Engineering Geology, Geotechnical Society, Toronto, Canada, 1, 307-324.
- Leone F., Aste J.P., Leroi E. (1996), *Vulnerability assessment of elements exposed to mass-moving: working toward a better risk perception*, In: Senneset, K. (Ed.), *Landslides*. Balkema, Rotterdam, 263–269.
- Maldonado E., Chio G., Gómez I. (2007), *Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos*, Ingeniería y Universidad. Volumen 11, no. 2, 149-168.
- Suarez J. (2009), *Deslizamientos, Técnicas de remediación*. Volumen 2, División de Publicaciones UIS, Bucaramanga.
- Tee A.B., Bowman M.D., Sinha K.C. (1988), *A fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation*, Civil Engineering System, 5, 17-24.
- UIS y CDMB (2011), *Apoyo en la planificación para el manejo y atención del riesgo de origen natural y antrópico en el área de jurisdicción de la CDMB*, Convenio interadministrativo No 115-2009, suscrito entre la CDMB, la Alcaldía de Bucaramanga y la UIS.
- Uzielli M., Nadim F., Lacasse S., Kaynia A.M. (2008), *A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides*, Engineering Geology, 102, 251-256.
- Zadeh L. A. (1965), *Fuzzy sets*, Information and control. Volumen 8.