

EVALUACIÓN SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES ANTIGUAS DE TAPIA PISADA DE ADOBE

RICARDO A. CRUZ. H.

Director Grupo de Investigación en Materiales
y Estructuras de Construcción
Universidad Industrial de Santander
racruz@uis.edu.co

W. L. CORTÉS

Coinvestigador Grupo de Investigación en Materiales
y Estructuras de Construcción
Universidad Industrial de Santander
racruz@uis.edu.co

RESUMEN

En gran parte del pueblo americano se encuentran edificaciones que han utilizado el barro en forma de tapia pisada y adobe, como un legado cultural dejado por los hombres del viejo mundo y nuestros antepasados. Una muestra de este legado constructivo se encuentra en los municipios de Girón, Barichara, San Gil y Matanza, entre otros, situados en el departamento de Santander, logrando despertar un gran interés a nivel nacional e incluso internacional por su valor histórico y cultural. Por esto y por razones de seguridad estructural se hace imprescindible su conservación y eventualmente su reforzamiento. Lo anterior se justificaría, por un lado, pensando en la explotación turística de dichas edificaciones, y por otro, en que no se ocasionarían pérdidas humanas en el evento de ocurrencia de sismos de alguna importancia.

Este trabajo presenta una alternativa metodológica para evaluar sísmicamente las edificaciones históricas que permitan su conservación, construidas por el sistema y características de la tapia pisada y el uso del adobe. Seguidamente podrán los organismos gubernamentales y no gubernamentales crear planes de preservación y reforzamiento estructural para el mejoramiento de las condiciones de estas edificaciones y fortalecer la industria del turismo en nuestro departamento.

La metodología de evaluación sismo resistente constituye una primera aproximación para la restauración y rehabilitación de las edificaciones históricas. Una segunda etapa consistirá en desarrollar estudios de campo que permitan su calibración y ajuste para lo cual se hace necesario un trabajo interdisciplinario que involucre historiadores, arquitectos, ingenieros y en general todas aquellas personas interesadas en la preservación y conservación del patrimonio histórico.

PALABRAS CLAVE: Evaluación estructural, vulnerabilidad, edificaciones históricas, tapia pisada, adobe.

INTRODUCCIÓN

En Colombia al igual que en la mayoría de países, las edificaciones construidas en tapia pisada y adobe no se encuentran normatizadas, ni reguladas, ni siguen unas especificaciones de diseño y construcción. A su vez, existen pocos estudios que describan su comportamiento, además la alta actividad sísmica del país pone en riesgo la gran

cantidad de edificaciones de este tipo. Países como Perú y México [12], [17] han investigado estos materiales y se han preocupado por el mejoramiento de la técnica constructiva y el conocimiento de su comportamiento sísmico. Este trabajo contribuye a la normatización de estas estructuras y constituye un proyecto piloto que busca la recuperación y mejoramiento de nuestra historia arquitectónica y constructiva.

Las edificaciones históricas, tanto del periodo colonial como del republicano, tuvieron como características predominantes el uso de la tierra para los elementos verticales de soporte tales como muros y columnas, madera para los entresijos y cubiertas y piedra para los elementos de cimentación. Información más detallada acerca de los materiales, elementos y procesos constructivos se encuentra en [8], [12], [13], y [15].

El proceso de evaluación comienza con una inspección e inventario de la estructura, que constituye el primer contacto que tienen el evaluador con la edificación y permite conocer cualitativamente su estado y condiciones. Enseguida se realiza el proceso de evaluación de daño y vulnerabilidad sísmica, con el cual se obtiene una medida de su vulnerabilidad, es decir, que tan susceptible a daños es la edificación ante la acción de fuerzas horizontales producidas por un sismo. Cabe recalcar que la obtención de este valor de vulnerabilidad permite a los organismos de prevención de desastres u otras entidades como las aseguradoras cuantificar los daños y pérdidas materiales ante un posible terremoto.

El desarrollo de esta metodología va dirigido a aquellas edificaciones históricas de carácter civil, cuyo sistema estructural esta conformado principalmente por elementos de tapia pisada o adobe, las cuales no se encuentran contempladas dentro de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR 98) [2].

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN SISMO RESISTENTE

La metodología para la evaluación sismo-resistente de las edificaciones de tapia y adobe esta basada en el método del índice de vulnerabilidad, el cual se ha venido desarrollando en Italia desde 1976 y ha sido objeto de estudio en diferentes universidades de este país [3].

El método puede clasificarse como subjetivo, debido a que realiza una calificación de las edificaciones mediante las observaciones de las características físicas, apoyándose en cálculos estructurales simples. Siguiendo un proceso establecido en un formulario propuesto, se hace el levantamiento de la vulnerabilidad y se obtiene un coeficiente llamado índice de vulnerabilidad. Este índice esta relacionado directamente con el grado de daño de la edificación mediante funciones de vulnerabilidad, las cuales no se plantean en el presente trabajo, pero deben ser generadas mediante estudios posteriores a partir de bases de datos obtenidas de la evaluación post-sísmica de las edificaciones históricas en diferentes regiones del país.

La metodología propuesta consta de dos partes, que son la inspección e inventario de la estructura y la evaluación de su vulnerabilidad. Durante la inspección e inventario se realizan reportes y se llenan formatos que constituyen los primeros documentos de la historia estructural y hoja de vida de la edificación, en donde se consignan sus características y datos patológicos. En esta etapa no se pretende tomar acciones correctivas, ni plantear soluciones a los puntos débiles de la edificación, solo constituye un documento descriptivo del estado real de los elementos estructurales y no estructurales. La segunda parte o evaluación de vulnerabilidad de la edificación se divide en dos niveles: 1) Evaluación post sísmica de daños y 2) Cálculo del índice de vulnerabilidad. De la correlación de los resultados obtenidos en los dos niveles de la evaluación de vulnerabilidad se puede obtener las funciones de vulnerabilidad [4].

Es necesario establecer la relación que existe entre el daño y la vulnerabilidad de la edificación, ya que hablar de vulnerabilidad de una forma aislada no indica de forma cuantitativa el porcentaje de edificación afectada, porcentaje que desea conocer el propietario de la edificación o entidades interesadas en su conservación, para estimar los costos de rehabilitación y reforzamiento de la edificación.

Otro aspecto importante de la evaluación sismo resistente es la identificación de los elementos que disminuyen la capacidad estructural de la edificación, con el fin de proponer las alternativas de rehabilitación y refuerzo más eficientes.

INSPECCIÓN E INVENTARIO

La inspección refleja el estado presente de las edificaciones y se basa en aquellos parámetros identificados, que hasta hoy en día se han definido, como importantes. Estos parámetros deben ser evaluados con la experiencia y ajustados a partir de una continua investigación post sísmica.

La información del estado real y de las características de una edificación se complementa con datos de campo que requieren para su obtención de equipos y herramientas apropiados que varían de acuerdo al proyecto.

La inspección, la cual conlleva a la descripción de la situación real de la edificación, se realiza a través de actividades como la visita al sitio, revisión de la información, caracterización de los materiales y ejecución

de un reporte final. Para la realización de la inspección se proponen una serie de formatos que recogen información sobre aspectos específicos de la edificación, como por ejemplo materiales, los cuales serán utilizados posteriormente en la evaluación de vulnerabilidad [4].

PROCESO DE INSPECCIÓN: El proceso de inspección se debe llevar a cabo como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1.

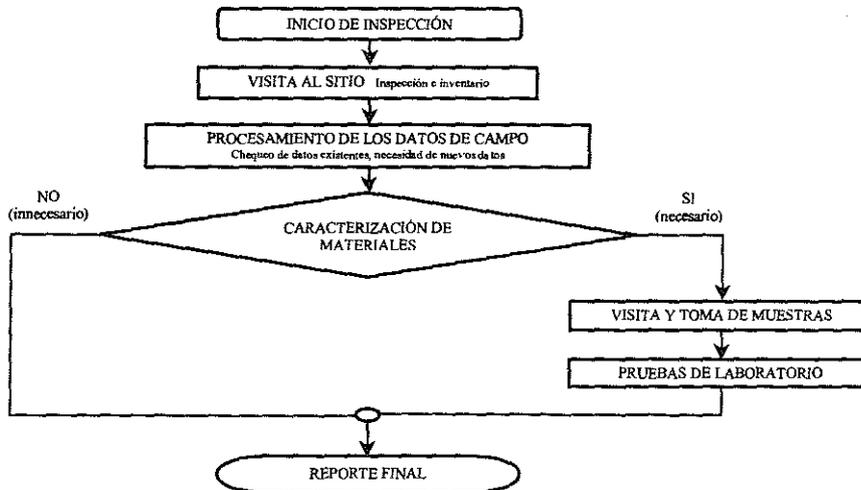


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de inspección de las edificaciones antiguas.

VISITA AL SITIO: Esta etapa constituye el primer contacto que tiene el ingeniero, arquitecto o la persona a cargo de la inspección con la edificación, en donde se describe la condición arquitectónica y estructural actual. Se deben buscar los datos geotécnicos y planos constructivos existentes, y otros datos sobre el comportamiento ante sismos pasados. Todo esto debe ser consignado en el formato de inspección e inventario preliminar para la evaluación sísmica de edificaciones antiguas, en donde se encuentran las instrucciones claras y precisas que facilitan esta tarea. Además, se deben anexar todas las fotografías necesarias para complementar la información consignada en el formato [4].

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO: Una vez realizada la visita al sitio y llenado el formato de inspección e inventario preliminar, se procede a adquirir mayor información acerca del edificio. Las actividades a realizar durante este proceso son las siguientes: 1) verificar la información existente, 2) desarrollar nueva información que sea necesaria, 3) verificar el sistema vertical y lateral de transmisión de fuerzas, 4) revisar y verificar la condición real del edificio, 5) observar condiciones especiales y anomalías, y 6) evaluar la necesidad de caracterizar los materiales utilizados en la edificación. Para esta última

actividad se utiliza un formato especial que permite definir el análisis a realizar sobre materiales y componentes estructurales, y que debe contener todos los datos y pruebas de laboratorio necesarios para una correcta caracterización de la edificación.

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES: El proceso de caracterización de los materiales es muy sencillo y básicamente se realiza en dos pasos, el primero es la visita al campo y toma de muestras, y el segundo es la realización de los ensayos de laboratorio con su respectivo procesamiento e informe. La caracterización depende en gran parte del tipo de proyecto y su importancia, y los ensayos de laboratorio pueden ir desde ensayos sencillos de suelo hasta pruebas más modernas y costosas, tales como termografía, magnetometría, ondas ultrasonido, gato plano, entre otras. Los resultados de la caracterización se deben presentar en el formato de caracterización de materiales, con los anexos que el evaluador crea

convenientes. En [11] y [13], se describen los procedimientos más utilizados en la caracterización de materiales de edificaciones históricas.

REPORTE FINAL: Dentro del reporte final se debe incluir la descripción de la edificación, las deficiencias encontradas, los formatos de inspección correctamente diligenciados, comentarios necesarios a cada uno de los puntos de la inspección, análisis fotográfico, y observaciones y conclusiones.

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD

La evaluación de vulnerabilidad es el proceso mediante el cual se determina el grado de daño en una edificación que resulta por la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad dada.

METODOLOGÍA: La evaluación de vulnerabilidad está dividida en dos niveles: la evaluación post sísmica de daños y el cálculo del índice de vulnerabilidad. Estos se llevan a cabo mediante el diligenciamiento de dos formatos que describen el levantamiento de daño post-sísmico y el índice de vulnerabilidad, respectivamente, cada uno con instrucciones claras que permite la unicidad de criterios.

El primer formato -levantamiento de daño post-sísmico- describe y cuantifica el daño observado en la estructura. Se analizan el grado y extensión de los daños, tanto en elementos estructurales como en elementos no estructurales mediante la utilización de varios grados de daño. El segundo formato -índice de vulnerabilidad- es una descripción completa de los datos necesarios para obtener el índice de vulnerabilidad. Para las edificaciones de tapia pisada y adobe se han propuesto catorce parámetros considerados relevantes en la evaluación, basado en los parámetros propuestos en el método de *índice de vulnerabilidad*, además se tienen en cuenta la NSR-98 [2], la FEMA 178 [4] y la FEMA 273 [5].

Los parámetros a tener en cuenta en evaluación de vulnerabilidad son: 1) distribución de muros, 2) tipo y organización estructural, 3) calidad del sistema resistente, 4) relación demanda capacidad, 5) posición del edificio en el terreno y su cimentación, 6) configuración en planta, 7) entrepisos o forjados horizontales, 8) cubierta o sistema de techos, 9) configuración en altura, 10) vanos presentes en muros, 11) estado de conservación, 12) elementos no estructurales, 13) edad y 14) edificaciones adyacentes. En [4], se encuentra la descripción detallada de cada parámetro.

Cada parámetro se califica en una escala decreciente entre A y D conforme a su calidad, siendo A el de mejor calidad. Como cada parámetro no tiene la misma influencia sobre la vulnerabilidad de la edificación, se les asignó un peso W_i , el cual es obtenido a partir de un proceso de simulación estadística y análisis matemático, encontrando valores que van desde 0.15 hasta 1.0. La Tabla 1 contiene los valores de la incidencia de cada parámetro en el índice de vulnerabilidad.

OBTENCIÓN DE LOS PESOS W_i PARA CADA PARÁMETRO: Los catorce parámetros se han dividido en dos grupos: parámetros cuantitativos y parámetros cualitativos. Los parámetros cuantitativos son aquellos en donde el valor de W_i se obtiene a partir un modelo matemático y métodos estadísticos, mientras que los parámetros cualitativos son aquellos que deben ser ponderados basado en la bibliografía existente y el criterio propio.

PARÁMETROS CUANTITATIVOS: A los parámetros cuantitativos se les puede determinar un peso W_i mediante un análisis de sensibilidad. Estos parámetros son la distribución de Muros, relación demanda capacidad, posición del edificio en el terreno y su cimentación, configuración en planta, configuración en altura y vanos presentes en muros. El proceso de ponderación de los

parámetros cuantitativos sigue los siguientes pasos: Simulación y muestreo, Modelamiento matemático, y Análisis de sensibilidad.

SIMULACIÓN Y MUESTREO ESTADÍSTICO: Para la simulación y muestreo estadístico se toman inicialmente treinta edificaciones antiguas con sus plantas arquitectónicas, se identifican las variables que inciden en el comportamiento de su estructura y se hace la simulación para finalmente determinar la muestra a modelar matemáticamente.

Tabla 1. Escala numérica para el cálculo del índice de vulnerabilidad para edificaciones de tapia pisada y adobe.

Parámetro	A	B	C	D	W_i
1 Distribución de muros.	0	10	20	50	0.3
2 Tipo y organización estructural.	0	10	20	50	1.0
3 Calidad del sistema resistente.	0	10	20	50	0.25
4 Relación demanda-capacidad.	0	10	20	50	1.0
5 Posición del edificio en el terreno y su cimentación.	0	10	20	50	0.65
6 Configuración en planta.	0	10	20	50	0.35
7 Entrepisos (forjados horizontales)	0	10	20	50	1.0
8 Cubierta o sistema de techos.	0	10	20	50	1.0
9 Configuración en altura.	0	10	20	50	1.0
10 Vanos presentes en muros.	0	10	20	50	0.4
11 Estado de conservación.	0	10	20	50	1.0
12 Elementos no estructurales.	0	10	20	50	0.25
13 Edad.	0	10	20	50	0.15
14 Edificios adyacentes.	0	10	20	50	0.25

En este trabajo se usa el tipo de simulación numérica correspondiente al *muestreo latino hipercúbico*, el cual permite usar un pequeño número de simulaciones -treinta en este caso- para una estimación satisfactoria de los parámetros básicos estadísticos. Las funciones de probabilidad para todas las variables aleatorias son divididos en N intervalos equivalentes - N es el número de simulaciones-, donde los centroides de los intervalos son usados en el proceso de simulación. Esto significa que el rango de la función de distribución de probabilidad $F(X_j)$

de cada variable aleatoria X_j esta dividida en N intervalos de igual probabilidad $1/N$, como se muestra en la figura 2. Los valores de las variables son seleccionadas aleatoriamente basados en permutaciones aleatorias de enteros $1, 2, \dots, N$. Cada intervalo de cada variable debe ser usada solamente una vez durante la simulación y se puede utilizar convenientemente una tabla de permutaciones aleatorias, en donde se enfrenten cada una de las variables con sus N simulaciones.

MODELAMIENTO MATEMÁTICO: Una vez obtenida la muestra de las edificaciones a analizar se procede con el modelamiento matemático, basado en métodos lineales solucionados mediante técnicas de elementos finitos. Los modelos han sido empleados para evaluar los esfuerzos en los muros producidos por la acción de las cargas muertas y fuerzas sísmicas.

Para establecer la geometría de cada una de las edificaciones se tomaron algunas plantas arquitectónicas representativas. Las propiedades mecánicas de los materiales han sido asumidas, suponiendo un comportamiento lineal elástico, homogéneo e isotrópico, basadas en valores obtenidos por otros investigadores [12], [17]. El análisis numérico ha sido realizado con el programa SAP 2000 [10], con sus herramientas de análisis lineal y para realizar la geometría se usó AUTOCAD [9]. Los esfuerzos y deformaciones para un caso particular se muestran en la Figura 3.

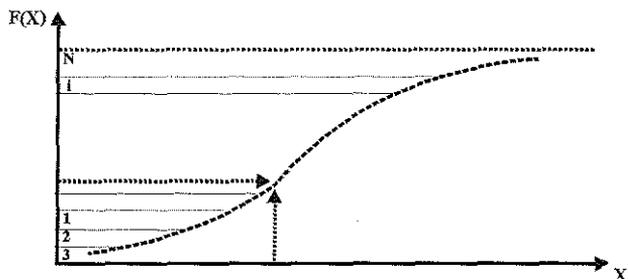


Figura 2. División de función de distribución de probabilidad en intervalos [14].

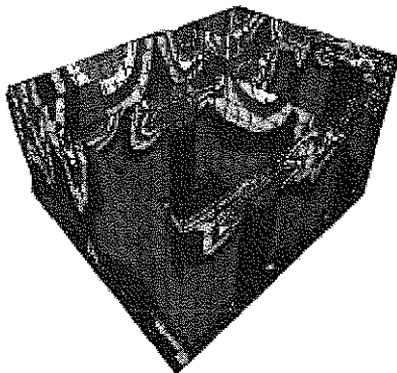


Figura 3. Esfuerzos y deformación de los muros de una edificación.

Para el modelamiento de los muros se utiliza un elemento tipo *shell* cuadrilateral -cuatro nodos- sometido a esfuerzo plano y para las columnas y vigas se utilizan elementos unidimensionales tipo *frame*. La condición de cimentación se modela como una zapata corrida mediante la restricción de los apoyos a movimientos traslacionales y rotacionales a lo largo de los muros y en los pie derechos o postes de madera se modela con apoyos simples restringidos a movimientos traslacionales con tres grados de libertad. Los entrepisos y cubiertas se apoyan sobre vigas conformando un diafragma flexible con masa concentrada sobrepuestas en los muros. Se utilizan *constrains* tipo *beam*, para todos los nodos de entrepiso y de cubierta.

En el modelamiento se incluye un análisis dinámico cronológico mediante el empleo de acelerogramas sintéticos generados a partir de espectros de diseño [15].

Por último, se procede al análisis matemático de la estructura de la edificación en dos direcciones ortogonales en que pueda actuar la fuerza sísmica, de donde se obtienen los esfuerzos que actúan sobre los elementos tipo *Shell* del muro y se comparan con el esfuerzo límite que puede resistir dicho elemento, lo que constituye el índice de respuesta. En el caso de la tapia pisada, el esfuerzo a cortante límite a comparar es de 40 kN/m^2 , dato obtenido de estudios realizados por otros autores y de la bibliografía existente. [6.], [11], [16].

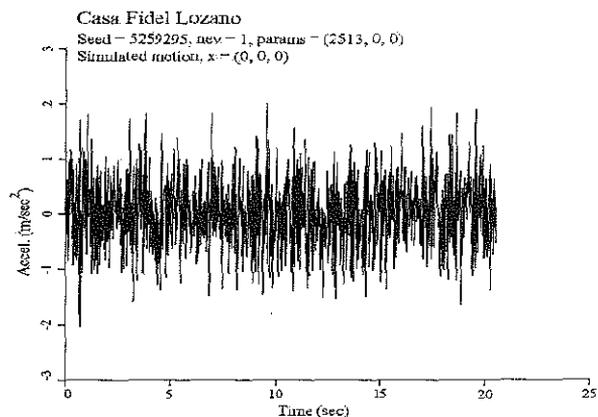


Figura 4. Acelerograma sintético generado con SIMQKE-II.

El procedimiento determinístico puede ser resumido en los siguientes pasos: 1) determinación de masa. 2) definición de la acción sísmica y 3) determinación del índice de respuesta.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: Mediante este análisis se realiza una correlación no paramétrica entre los parámetros

y la respuesta obtenida en el modelamiento matemático, para lo cual se utiliza el método estadístico llamado Kendall's Tau [13], que usa solamente el ordenamiento relativo de rangos mayor que, menor que o igual que. Una descripción detallada del cálculo se encuentra en [8]. Kendall's Tau está en función del rango del valor representativo de la variable aleatoria X_i en una muestra ordenada de N valores simulados usados en la j -ésima simulación la cual es equivalente a los enteros en la tabla de permutaciones aleatorias en el método de muestreo hipercúbico latino - y q_{ji} - rango en la muestra ordenada de la variable de respuesta obtenida en la j -ésima simulación- P_j .

$$\tau_i = \tau(q_{ji}, p_j), j = 1, 2, \dots, N$$

El coeficiente de correlación τ_i que se encuentra entre los valores de -1 y 1 puede ser obtenido fácilmente para una variable aleatoria arbitraria y de esta forma compararse cada uno de los parámetros. El mayor valor absoluto de τ_i para una variable X_i es el que tiene mayor influencia en la respuesta de la estructura. Una ventaja de esta aproximación, radica en poder obtener una medida de sensibilidad para todas las variables aleatorias directamente dentro de un análisis de simulación, ahorrando tiempo de ejecución del modelamiento.

Tabla 2. Valores definitivos de Tao.

PARÁMETRO	TAO
Distribución de Muros	0.3
Relación Demanda-capacidad	1.0
Posición del edificio en el terreno y su cimentación	0.65
Configuración en Planta	-0.35
Configuración en Altura	-1.0
Vanos presentes en muros	0.4

PARÁMETROS CUALITATIVOS: Los pesos correspondientes a los parámetros: tipo y organización estructural, calidad del sistema resistente, entresijos, cubierta o sistema de techos y estado de conservación serán tomados de los valores propuestos por Benedetti-Petrini en [3], mientras que los pesos de los parámetros edad y edificios adyacentes son propuestos en este trabajo como 0.15 y 0.25 respectivamente.

PROCESO DE EVALUACIÓN: Una vez concluida la inspección se inicia el proceso de evaluación. Si la edificación a evaluar fue afectada por un evento sísmico reciente, se realiza

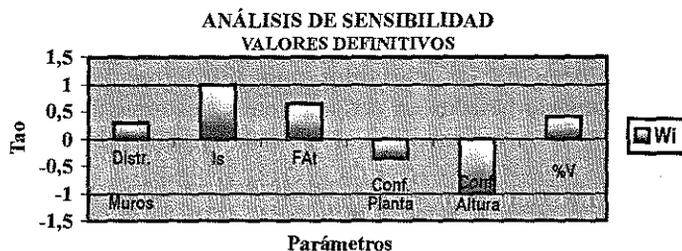


Figura 5. Análisis de sensibilidad definitivo.

primeramente el levantamiento de daño. Enseguida se determina el porcentaje afectado de la edificación, para esto es necesario realizar una visita de campo y mediante observación determinar el porcentaje de edificación afectada. Una vez registradas las principales características del sismo, se calcula el índice de vulnerabilidad a partir de la calidad -A, B, C o D- de cada parámetro y su posterior ponderación -afectación por el peso W_i -, utilizando los valores de la Tabla 1. Si la edificación a evaluar se encuentra en una región con disponibilidad de funciones de vulnerabilidad, se puede prescindir del cálculo de daño y obtener su valor a partir de estas funciones [3] y [4].

Tabla 3. Peso W_i para parámetros evaluados cualitativamente. [3]

Parámetro	W_i
Tipo y organización estructural	1.0
Calidad del sistema resistencia	0.25
Entrepiso -forjados horizontales-	1.0
Cubierta o sistema de techos	1.0
Estado de conservación	1.0
Elementos no estructurales	0.25
Edad	0.15
Edificios adyacentes	0.25

CONCLUSIONES

Una ventaja de esta metodología es la relativa facilidad con la que se describe la vulnerabilidad del edificio por medio del cálculo del índice de vulnerabilidad y su empleo constituye una herramienta importante de decisión en los planes de mitigación de desastres. Un inconveniente que se presenta para la definición de las funciones de vulnerabilidad radica en la necesidad de contar con datos de daños observados, los cuales no están disponibles para las edificaciones de este tipo en Colombia. Contando con una buena base de datos se pueden lograr funciones de vulnerabilidad apropiadas. En el proceso de evaluación de vulnerabilidad juega un papel importante la experiencia del experto para definir la incidencia de parámetros que no se han estudiado hasta el momento, pero que puedan tener un gran peso. En tal caso, se debe ser cauteloso ya

que se puede tratar de una opinión subjetiva errónea del observador. Se deben continuar los estudios sobre vulnerabilidad de edificaciones de tierra y en especial el comportamiento del material de los elementos estructurales. La metodología se puede validar y calibrar con la ayuda de entidades que trabajen con el patrimonio cultural histórico, mediante su implementación en poblaciones como Popayán u otras ciudades en donde las edificaciones históricas hayan sido afectadas por un sismo. Es deber de los organismos del estado propender por el mejoramiento del patrimonio histórico y cultural para lo cual se deberán plantear proyectos de reforzamiento de sus estructuras de tal forma que se evite su deterioro o desaparición.

REFERENCIAS

- [1] Arango Silvia. "Historia de la arquitectura en Colombia". Centro Editorial y Facultad de Artes. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 1989.
- [2] Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Bogota D.C. 1998.
- [3] Caicedo, C.; Barbat, A. H.; Canas, J. A.; Aguiar, R. "Vulnerabilidad Sísmica de Edificios", Monografía de ingeniería sísmica, Monografía CIMNE IS-6, Barcelona 1994.
- [4] Cortés, W. L. "Metodología para la evaluación sismo resistente de edificaciones antiguas en tapia pisada y adobe". Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2002.
- [5] Federal emergency management agency. NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings -FEMA 178-, Building seismic safety council, Washington, D.C. 1992.
- [6] Federal emergency management agency. NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of existing building -FEMA 273-. Building seismic safety council, Washington, D.C. 1997.
- [7] ININVI. "Normas peruanas de edificaciones de adobe". Norma E-80, Perú, 1985.
- [8] Juárez Badillo. "Mecánica de suelos". Tomo I, México, 1985.
- [9] Kendall, M.G. "Rank correlation methods". Cuarta edición, Charles Griffin & Company Ltda. Londres, Gran Bretaña, 1975.
- [10] Manual de usuario AUTOCAD 2000, Autodesk, USA, 1999.
- [11] Manual de referencia SAP 2000, Volumen I y II, Computer and structures inc, Berkeley, California, USA, 1997.
- [12] Meli, R. "Ingeniería estructural de edificaciones antiguas" Fundación ICA, Ciudad de México, 1998.
- [13] Rivero, S.; Amaury, W. "Comportamiento estructural de muros en tierra apisonada, reforzados verticalmente con caña, sometidos a cargas horizontales". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1999.
- [14] Roca, P.; González, J. L.; Mari, A. R.; Oñate, E. "Structural analysis of historical construction. Possibilities of numerical and experimental techniques". Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona 1997.
- [15] Stulz, R. "Materiales de construcción apropiados" Catálogo de soluciones potenciales. SKAT & IT Publications, Germany, 1993.
- [16] Vanmarcke, E.; Fenton, G.; Heredia-Zavoni, E. "SIMQKE-II, conditioned earthquake ground motion simulator". Manual de usuario. Version 2.1, Princeton University, 1996.
- [17] Vargas N. J.; Bariola B. J.; Blondet, M. "Resistencia sísmica de la mampostería de adobe", Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú 1984.