

**VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE SINCELEJO, UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD Y EL ESPECTRO DE CAPACIDAD.**

**Autores:**

Alvaro Caballero Guerrero<sup>1</sup>, Carlos Vergara Garay<sup>2</sup>, Nelson Molinares Amaya<sup>3</sup>

**Dirección autor principal:**

Calle 11C # 24B – 90 Barrio la Palma. Sincelejo – Sucre – Colombia

Arcaballero26@yahoo.com

**Título abreviado:**

Vulnerabilidad Sísmica Centro Sincelejo

**Palabras claves**

Vulnerabilidad, Sísmica, Método Índice de Vulnerabilidad, daño

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras, Especialista en Gerencia y Control de la Construcción, Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras, de la Universidad del Norte. Profesor de la Universidad de Sucre en el Departamento de Ingeniería Civil.

<sup>2</sup> Ingeniero Agrícola, Especialista en Ciencias ambientales, profesor de la facultada de Ingeniería de la Universidad de Sucre, Candidato a Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad del Norte.

<sup>3</sup> Ingeniero Civil. Doctor en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Director e investigador del grupo de investigación en Tecnología del Agua-GTA y del grupo Estructuras y Geotecnia. Profesor de la Universidad del Norte

# **VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE SINCELEJO, UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

## **RESUMEN**

Los desastres naturales presentados en el mundo, dejan evidencia que los programas de prevención y mitigación de desastres no se han aplicado correctamente. Hallar el Riesgo Sísmico en una zona urbana es una herramienta útil para la planificación. Este estudio determinó la vulnerabilidad sísmica del centro Histórico de la Ciudad de Sincelejo, por medio del método del Índice de Vulnerabilidad y del espectro de capacidad de las estructuras (Análisis Pushover), para obtener el daño esperado a diferentes aceleraciones sísmicas, siendo indispensable hallar las correlaciones entre el índice de daño y la vulnerabilidad sísmica, utilizando como herramienta principal, la tecnología de Sistema de Información geográfica SIG, acompañados de un estudio de zonificación geotécnica y la tipología estructural de las edificaciones a estudiar. Los resultados finales muestran que un gran número de estructuras presentan alta Vulnerabilidad y daños significativos ante la presencia de sismos moderados, debido a problemas tanto en el diseño arquitectónico y estructural, como en su construcción.

## **IDENTIFICATION OF SEISMIC VULNERABILITY IN SINCELEJO'S HISTORICAL DOWNTOWN AREA USING A GRAPHIC INFORMATION SYSTEM**

## **ABSTRACT**

The natural disasters occurred all around the World have shown that the programs of prevention and mitigation of them have not been successful. Identifying the seismic risk is a useful tool to make sounds decisions concerning building planning. The main purpose of this study is to determine the seismic vulnerability of Sincelejo's downtown. A seismic vulnerability method through a graphic information system GIS and geotechnical zone study as well as structural data of the different building were used to carried out this study. The findings show a great number of buldings has structural problems not only in their structural frame but also in the architectural design.

## **1. INTRODUCCION**

Los componentes de un complejo urbano son potencialmente vulnerables, incluyendo sus edificaciones. En Colombia, el mayor porcentaje de sus estructuras, se construyeron sin tener en cuenta criterios sísmicos adecuados, ya sea por inexistencia de normas, desconocimientos de estas, ó simplemente no se aplicaron correctamente. Existen muchos métodos para evaluar los daños esperados en zonas urbanas, en las que es posible estimar las pérdidas ante diferentes niveles de amenaza.

En países como Colombia, poco se ha hecho para reducir la Vulnerabilidad Sísmica de las estructuras existentes, siendo necesarios estudios de este tipo para los programas de prevención y mitigación de desastres. Se ha escogido el método del Índice de Vulnerabilidad o Método Italiano, ya que está fundamentada en datos reales, se puede aplicar en investigaciones a nivel urbano, y se tiene la experiencia de haberse aplicado en diferentes países, incluyendo a Colombia, con buenos resultados. El método ha sido desarrollado para estructuras en Mampostería No Estructural y de Hormigón Armado. Una herramienta muy útil, para estos estudios, son los Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual ha venido a facilitar la implementación de las metodologías por la visualización de los resultados, gracias a su capacidad georeferencial.

## **2. RIESGO SÍSMICO**

El Riesgo Sísmico se define como el grado de daño esperado por una estructura o zona urbana, ante la presencia de un terremoto a diferentes

niveles de amenaza. Los componentes que involucran los estudios de Riesgo Sísmico son la Peligrosidad y la Vulnerabilidad Sísmica, acompañados por un grado de incertidumbre, el cual depende, en gran medida, del método escogido para la obtención de los resultados. La Peligrosidad Sísmica de una zona, está relacionado con la descripción de los efectos provocados por terremotos en el suelo de dicha zona, representado mediante aceleraciones, velocidades, desplazamientos, o la intensidad sentida en el lugar. La Vulnerabilidad Sísmica está asociada a las características propias de la estructura o zona urbana, teniendo en cuenta los elementos resistentes ante cargas sísmicas y los elementos No estructurales, y es indispensable en los programas de prevención y mitigación de desastres por terremotos, ya que permiten tomar medidas adecuadas en las zonas donde se ha determinado. Por esto, la metodología escogida, debe ser acorde con los resultados a que se quiere llegar, conociendo los recursos necesarios y la información con que se cuenta. Es por eso que el método del Índice de Vulnerabilidad, es el más acorde para cumplir con los objetivos de este estudio.

### **3. MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD**

El método del índice de Vulnerabilidad (BENEDETTI y PETRINI, 1984), identifica los parámetros más importantes que controlan el daño en los edificios causados por un terremoto. Lo importante de este método, es que se puede aplicar a edificios de Mampostería No Estructural y de Hormigón Armado, el cual son los dos tipos de estructuras predominantes en nuestro medio. En cada uno de los tipos de estructuras, se evalúan once parámetros, con sus respectivos coeficientes de importancia, en la que al final, por medio de unas ecuaciones, se determina la Vulnerabilidad Sísmica de la estructura. A medida

que este valor va aumentando, el edificio es más vulnerable. A continuación se muestra la ecuación para determinar el Índice de Vulnerabilidad para estructuras en Mampostería No Estructural:

$$I_V = \sum_{i=1}^{11} (K_i * W_i)$$

El análisis de este tipo de estructuras, presenta resultados entre 0% (lo menos vulnerable), y 382.5% (lo más vulnerable), por lo que es necesario, para trabajar en un mismo rango a los diferentes tipos de estructuras, estandarizarlo entre 0% y 100%. Para la determinación del Índice de Vulnerabilidad a las estructuras en Hormigón Armado se utiliza la siguiente expresión:

$$I_V = 10 * \left[ \frac{\sum_{i=1}^{11} K_i * W_i + 1}{4} \right]$$

En esta ecuación, los índices de vulnerabilidad dan resultados entre 0% y 100%, por lo que no es necesario estandarizarlo.

#### **4. VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL CENTRO DE SINCELEJO. (Caso Aplicativo)**

Sincelejo es la Capital del Departamento de Sucre, y como centro administrativo y político de la región, está principalmente relacionado con los asentamientos poblacionales más representativos. La ciudad se encuentra en un nivel de amenaza sísmica intermedia según la Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-98). El objetivo principal de este trabajo es calcular,

aproximadamente, las pérdidas probables (estructurales y No estructurales), que puede presentar los edificios frente a un sismo específico.

La zona esta compuesta de 1460 edificaciones, de diferentes características estructurales y arquitectónicas. Los límites de la zona en estudio se pueden observar en la figura 1.

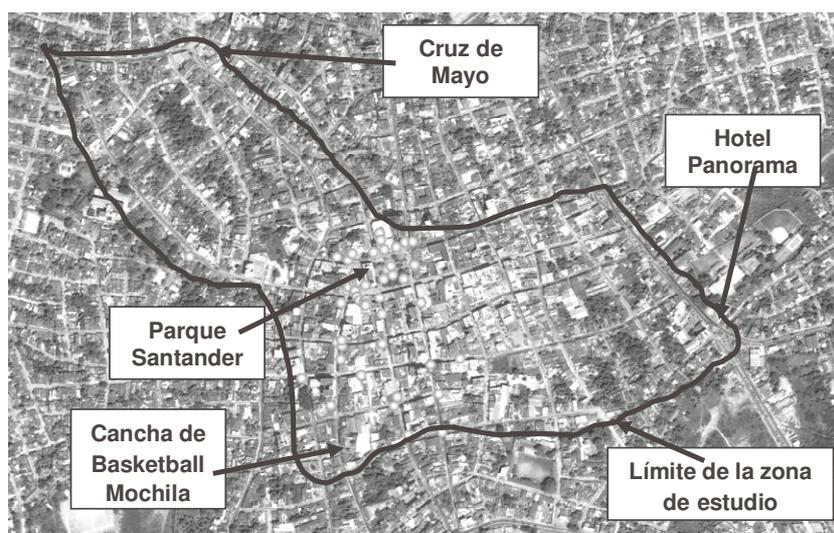


Figura 1. Límites de la zona de estudio.

En los planos de la zona a escala 1:1200, obtenidos en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en la ciudad de Sincelejo, se observa claramente las manzanas, con sus lotes y áreas construidas, identificando cada uno de los predios con su número catastral. Luego los planos de pasan a Autocad, con capas de lotes y construcción por separados para luego exportarlo al programa de ArcView.

## **5. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL Y ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA.**

Conocer la tipología estructural de la zona, es uno de los pasos necesarios para los estudios de Vulnerabilidad Sísmica, ya que son de mucha utilidad para realizar extrapolaciones entre las edificaciones que posean características

similares. Conocer el tipo de estructuras resistente es indispensable en el desarrollo de este trabajo, ya que se puede saber, qué porcentaje de las edificaciones es representativo del estudio. En la Figura 2 se observa la distribución de los tipos de estructuras en la zona, en la cual, las estructuras en Mampostería No Estructural y Hormigón Armado, representan aproximadamente el 96% del total, lo que hace, que el estudio sea representativo.

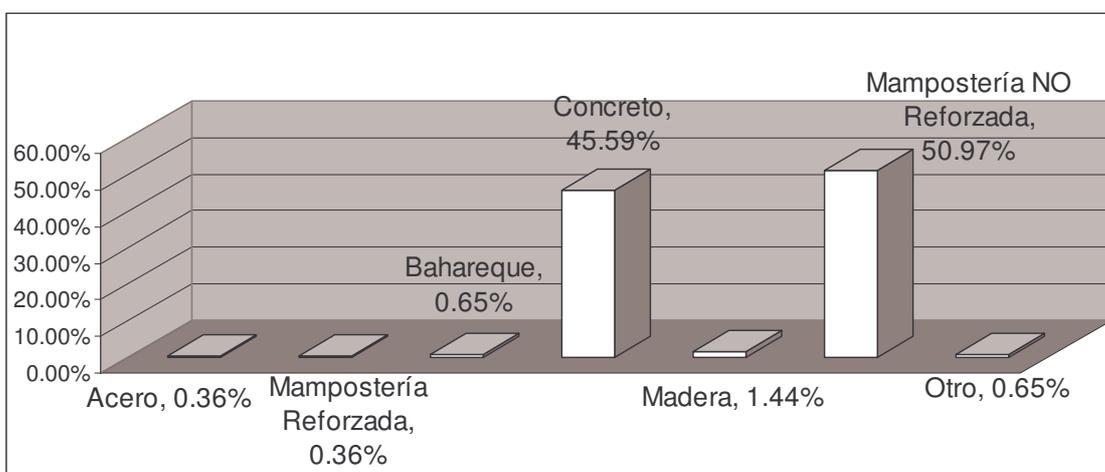


Figura 2. Tipo de estructuras en la zona de estudio.

Un estudio de zonificación Geotécnica se realizó, para conocer el tipo de suelo en la que se va a determinar la Vulnerabilidad Sísmica. Esta Zonificación es fundamental para realizar el método del Índice de Vulnerabilidad, ya que para cada tipo de estructuras, sea Mampostería No Estructural o Hormigón Armado, existen dos parámetros, de los once, que dependen de las características del suelo sobre el cual esta cimentada la edificación. La información se obtuvo de 31 estudios de suelos con un total de 64 sondeos, hechos a diferentes profundidades entre 0 y 7 metros. Se clasifica la información en Excel por estratos a cada metro de profundidad, teniendo en cuenta características como

coordenadas, profundidad, tipo de suelo, consistencia, Número de golpes, porcentaje de humedad natural, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, porcentaje que pasa el tamiz 200, clasificación USC, capacidad portante, y presencia o No del nivel freático. A continuación, en las figuras 3 y 4, se muestra los puntos de los sondeos y, la capacidad portante admisible resistente a la profundidad de 2 a 3 metros, el cual es a la profundidad en la que están cimentadas la mayor cantidad de las edificaciones, respectivamente.



Figura 3. Ubicación de los estudios de suelo en la zona de estudio.



Figura 4. Capacidad portante (KPa) de 2 a 3 metro.

La Figura 4, que es sobre la capacidad portante en KPa en el estrato de 2 a 3 metros de profundidad, indica que en la zona hay un suelo de mucha

resistencia en la parte que va del parque central a la zona de los bancos (zona más oscura), hasta la calle cauca, encontrándose capacidades portante admisibles superiores a 500 Kpa. A medida que se va alejando hacia los lados, la resistencia comienza a disminuir considerablemente, encontrándose un suelo muy malo en la parte occidental (parte más clara), con capacidades portantes admisibles inferiores a 70 KN/m<sup>2</sup>.

Con respecto al nivel freático, no se encuentra presencia de aguas freáticas, hasta profundidades de 5 metros, con excepción de un par de estudios. Esto es debido a que la zona, se encuentra en una altura sobre el nivel del mar, mayor que el resto de la ciudad, como se observa en la topografía de la Figura 5. Esta Figura, se realizó con unas curvas de nivel aproximadas, haciendo la altimetría por esquinas. La parte que se encuentra más oscura, representa pendientes mayores (superiores al 15%), y la parte blanca, con pendiente bajas.



Figura 5. Topografía de la zona de estudio.

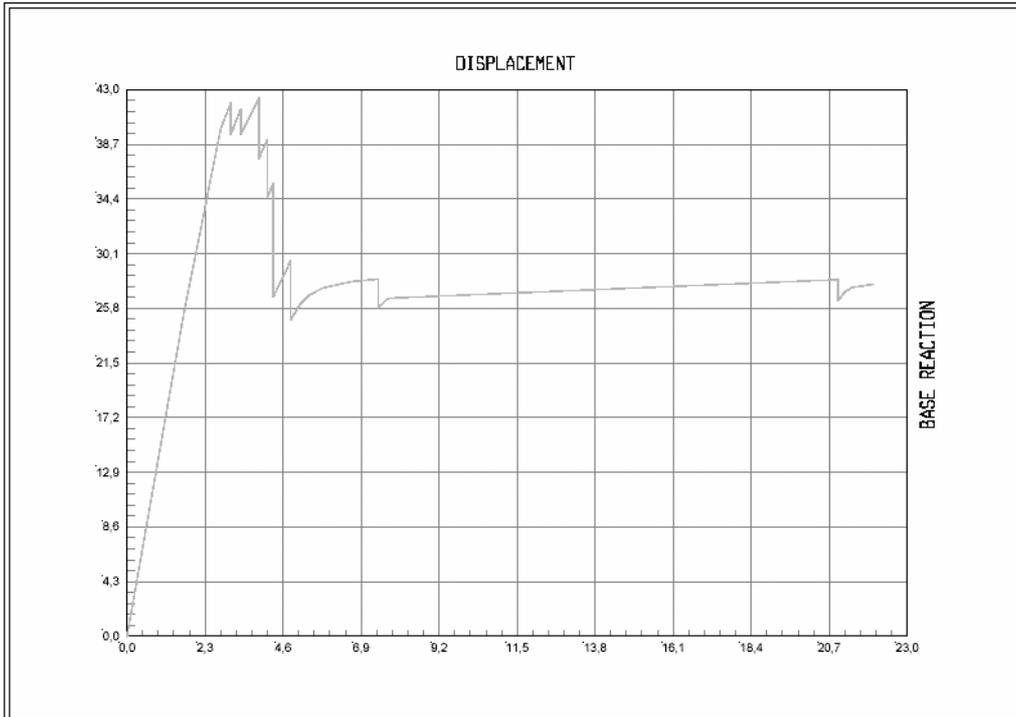
En general, se puede decir que la parte donde se encuentran las edificaciones a estudiar, es de un suelo muy resistente, excepto la parte de la izquierda, el cual es la que va desde la cruz de Mayo y San Carlos, hasta el almacén SAO, en el que el suelo se considera malo. Sin el estudio de Zonificación geotécnica,

no se podía conocer las características de la zona, lo que habría llevado a una gran incertidumbre en el estudio de Vulnerabilidad.

## **6. ESPECTRO DE CAPACIDAD**

Consiste en determinar el punto de desempeño de una estructura cuando se ve sometida a movimientos sísmicos de diferente intensidad; es decir, se compara la capacidad de resistir fuerzas laterales con la demanda sísmica, representada por medio de un espectro de respuesta reducido. El verdadero comportamiento de la estructura se evalúa con tres niveles de amenaza, servicio (0.065g), de diseño (0.125g) y severo (0.15g) obtenidos de la curva de peligrosidad sísmica de la ciudad de Sincelejo.

La curva de capacidad se obtuvo en función de los parámetros determinados, con el programa SAP2000 y mediante un análisis estático no lineal del modelo se obtuvo la curva de capacidad. La ubicación de las rótulas plásticas se realiza en función del diagrama de momentos flectores elástico lineal, las mismas se ubicaron en pie y cabeza de columnas y en los extremos de las vigas. Se realizó un análisis “controlado por desplazamiento” (2% de la altura del edificio), en el cual se aplica la carga horizontal monotónica hasta producir el colapso, en la que se obtiene una curva que representa el cortante basal respecto del desplazamiento horizontal del diafragma rígido correspondiente al primer nivel. En la Fig. 6 se representa la curva de capacidad obtenida para una de las estructuras analizadas.



SAP2000 v10.0.1, File: Vulnerabilidad\_P4\_Bloque X 2, Units: Ton, cm, C  
Analysis Case: Sismo, Parameter Set Name: VDPO1  
CURVA DE CAPACIDAD PORTICO P4 BLOQUE X

Figura 6. Curva de capacidad.

## 6. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD Y GRADO DE DAÑO DE LA ZONA

La encuesta se utilizó teniendo los planos Estructurales y Arquitectónicos de 28 edificaciones en Mampostería No Estructural y a 42 estructuras en Hormigón Armado. Luego por medio de extrapolaciones, se le determinaba el índice de Vulnerabilidad al resto de las estructuras. A las estructuras que no pertenecen a estos dos tipos de estructuras no se les aplico el método. En las Figuras 7 y 8, se expresan los datos obtenidos:

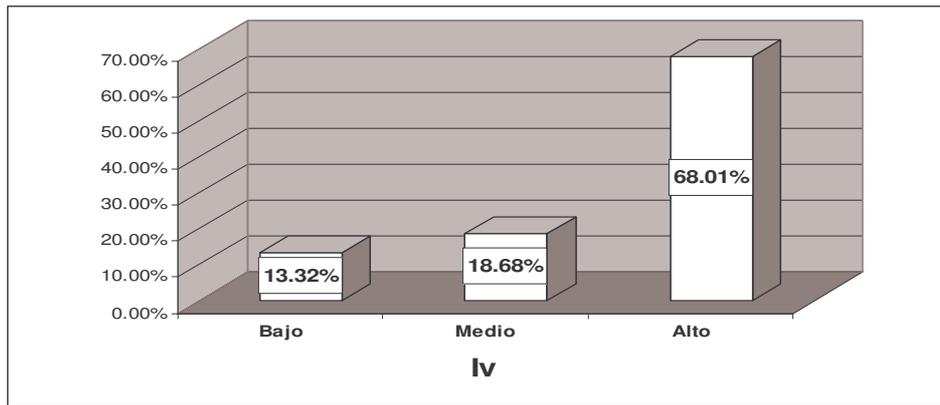


Figura 7. Representación del Índice de Vulnerabilidad de las estructuras en el centro de Sincelejo-Sucre.



Figura 8. Representación del Índice de Vulnerabilidad de las estructuras en el centro de Sincelejo-Sucre. ArcScene.

Como se puede observar, el 68% de las edificaciones, presentan una Vulnerabilidad Sísmica alta, lo cual hace necesario un estudio de peligrosidad Sísmica de la zona, para así conocer el Riesgo Sísmico, y poder dar alternativas de soluciones.

Utilizando las funciones de Vulnerabilidad, obtenida por los investigadores en estudios anteriores, que relacionan el Índice de Vulnerabilidad con el grado de daño, se obtienen los escenarios de daños, en la zona de estudio, a diferentes Aceleraciones Sísmicas  $A_a$  (Figuras 9, 10 y 11). Para todos los casos la escala, es la propuesta por el ATC-13 (1985).

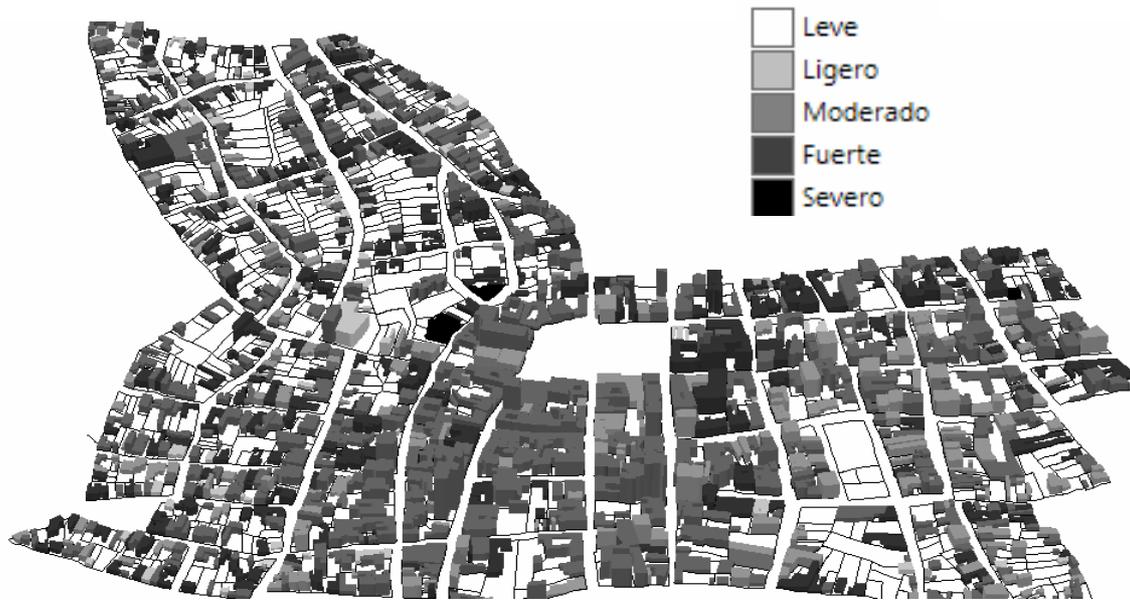


Figura 9. Escenarios de daño para  $A_a = 0.065$ . Sismo de servicio.

De la Figura se puede observar claramente, con un  $A_a = 0.065$ , correspondiente al sismo de servicio, las estructuras tienen un comportamiento sísmico aceptable, especialmente las estructuras en mampostería No estructural, en la que la mayoría de las estructuras solo podrían presentar un daño moderado, y, solo unas pocas, un daño fuerte.



Figura 10. Escenarios de daño para  $A_a = 0.125$ . Sismo de Diseño

De la Figura anterior, se observa claramente que las estructuras, ya presentan un daño entre moderado y fuerte, lo que podría presentar costos significativos en la reparación de dichas estructuras. Pero sin embargo, muy pocas estructuras, tienen un daño severo, que en lo referente al riesgo a vidas humanas, es un poco bajo.



Figura 11. Escenarios de daño para  $A_a = 0.15$ . Sismo Severo.

En la Figura anterior, correspondiente a una aceleración de  $A_a = 0.15$ , (sismo severo), ya se empiezan a observar muchas estructuras con daño fuerte, lo que implica grandes costos en sus reparaciones y posibles riesgos a vidas humanas. Lo interesante, es que para un tipo de sismo de estas características ( $A_a = 0.15$ ), es que se recomienda en la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-98 para la ciudad de Sincelejo. Por lo tanto, muchas de las estructuras no cumplen con este parámetro, debido, a que en su mayoría, son estructuras construidas mucho antes de que salieran las primeras normas. Lo preocupante, es que se encontraron estructuras, que han sido construidas después de la norma NSR 98, que presentan índices de Vulnerabilidad y de daños altos, lo

que da a entender que no se diseñaron y/o construyeron cumpliendo con la norma.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El método del índice de Vulnerabilidad, es un procedimiento adecuado para una evaluación cualitativa y rápida de la vulnerabilidad de las estructuras en zonas urbanas.

Para aplicar el método del Índice de Vulnerabilidad, es importante contar con toda la información, o saber, si se cuenta con los recursos necesarios para obtenerla.

Conocer la geología y características geotécnicas, se convierte en una parte necesaria en todo estudio de Riesgo Sísmico, debido a la importancia en el comportamiento de las estructuras.

Trabajar con la tecnología de Sistema de Información Geográfica SIG, permite suponer escenarios de daños de determinadas características a la zona de trabajo, para así obtener, de manera inmediata, sus posibles consecuencias.

El índice de Vulnerabilidad y el grado de daño de varias edificaciones, se ven afectado principalmente por desconocimiento, por parte de diseñadores y constructores, de los problemas de configuración estructural, afectando su comportamiento.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**AIS, Asociación de Ingeniería Sísmica**, Normas Colombianas de Diseño y Construcciones Sismo Resistente NSR-98. Colombia **1997**.

**BONETT, R.** Tesis Doctoral: Vulnerabilidad y riesgo Sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. **2003**.

**CANO, S. L.; MONSALVE, J. H.; AGUDELO, C. J.; UPEGUI, B. F. y JARAMILLO, F. J.** Metodología para la evaluación del riesgo sísmico de pequeñas y medianas ciudades. Estudio de caso: zona centro de la ciudad de Armenia – Colombia. Universidad de Quindío. Armenia – Colombia. **2000**.

**MENA, U.** Tesis Doctoral: Evaluación del Riesgo Sísmico en zonas urbanas. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería del terreno, Cartográfica y Geofísica. Barcelona. **2002**.

**Organización Panamericana de la salud OPS.** Fundamentos para la Mitigación de Desastres en las instalaciones de Salud. Organización Mundial de la salud OMS. Washington D.C.. **1999, 2004**.

**PALOMINO, C.** Metodologías para estudios de Vulnerabilidad Sísmica Estructural de Edificaciones Existentes. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. XIII Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia. Bogotá D.C.. **Septiembre 30 y Octubre 1-2 de 1999**.

**POT (Plan de Ordenamiento Territorial) Sincelejo.**

**YEPEZ, F.; BARBAT, A. H. y CANAS, J. A.** 1) Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería. Monografías de Ingeniería Sísmica CIMNE IS-12. España. **1995**.

**YEPEZ, F.; BARBAT, A. H. y CANAS, J. A.** 2) Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmicos. Monografías de Ingeniería Sísmica CIMNE IS-14. España. **1995**.