

IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS SÍSMICAMENTE MÁS VULNERABLES EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

ESPERANZA MALDONADO RONDÓN

Profesora Titular

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Grupo INME (Grupo de Investigación Materiales y Estructuras de Construcción)

E-mail: emaldona@uis.edu.co

GUSTAVO CHIO CHO

Profesor Asociado

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Grupo INME (Grupo de Investigación Materiales y Estructuras de Construcción)

E-mail: gchioch@uis.edu.co

RESUMEN

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto de Microzonificación Sísmica del Municipio de Bucaramanga. En él se identifican las edificaciones típicas de la ciudad y se define su distribución en cada una de las zonas que la conforman. A partir de esta tipificación se realiza el estudio de vulnerabilidad sísmica y se definen las zonas más vulnerables usando matrices de probabilidad de daño, adaptadas con base en las propuestas por el ATC. A su vez, se identifican posibles alternativas para disminuir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones.

PALABRAS CLAVE: *Vulnerabilidad sísmica, edificaciones, mapas de vulnerabilidad, Bucaramanga.*

ABSTRACT

This work is framed within the Seismic Microzoning Project for the Municipality of Bucaramanga. The study identifies the typical buildings of the city and their distribution in each of the city zones. Based on this classification, a seismic vulnerability study is conducted and the most vulnerable zones are defined using damage probability matrices adapted from the ATC proposals. Possible alternatives to decrease building seismic vulnerability are identified.

KEYWORDS: *Seismic vulnerability. Buildings. Vulnerability maps. Bucaramanga.*

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bucaramanga está localizada al Nororiente de Colombia, dentro de una región de alta amenaza sísmica, debida principalmente a la alta sismicidad de la región, la existencia de fallas activas que cruzan directamente por ella, la geología de los materiales y la morfología de altas montañas.

El proceso acelerado de urbanización que ha vivido la ciudad, la imprevisión al construir, la necesidad de vivienda económica que obliga a algunos de sus habitantes a edificar en zonas de probable riesgo sísmico (ver **Figura 1**) y, en ciertos casos, el manejo inadecuado del problema sísmico en los proyectos y construcción de las viviendas, conllevan a que, ante un sismo, las probables pérdidas y número de víctimas sean considerables.

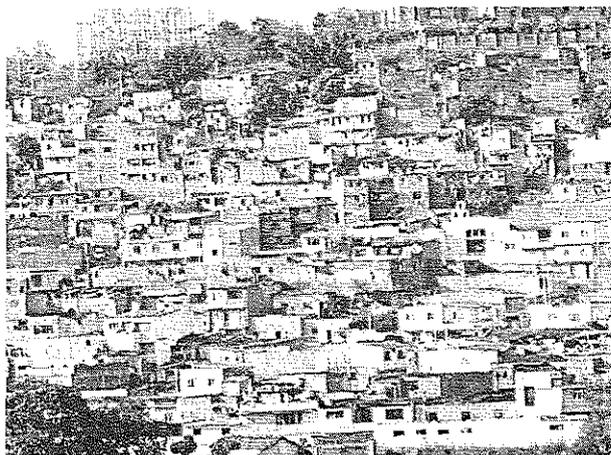


Figura 1. Desarrollo urbano de algunos sectores de la ciudad de Bucaramanga.

Teniendo en cuenta que Bucaramanga permanece en alto riesgo sísmico, se elaboró el estudio de identificación de las zonas más vulnerables sísmicamente en la ciudad de Bucaramanga, el cual pretende ser una guía para la toma de conciencia, reducción del riesgo y planificación de los programas de prevención y atención de emergencias ante ocurrencias sísmicas.

El estudio se desarrolló en varias etapas, que comprenden desde inventario del 11% de las edificaciones del municipio, zonificación de los tipos estructurales prevaletentes, definición del nivel de daño que pueden alcanzar las edificaciones de los sectores de la ciudad, hasta la formulación de recomendaciones para atender y mitigar el riesgo.

Como resultado de este trabajo se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad sísmica de edificaciones, a escala 1:17500, para diferentes escenarios sísmicos hipotéticos probables, las causas de su vulnerabilidad, y las acciones que es aconsejable adoptar para disminuir el riesgo.

METODOLOGÍA SELECCIONADA

La metodología para estimar el nivel de daño que pueden alcanzar las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga se basa en la utilización de Matrices de Probabilidad de Daño, diseñadas por el Applied Technology Council (ATC-13, 1985), metodología que ha sido aplicada en otras ciudades colombianas (Ingeominas-Universidad de los Andes, 1997). Este método se basa en los estados de daño obtenidos para diferentes relaciones Demanda/Capacidad, tanto a

nivel/ de los aspectos relacionados con la rigidez como en aquellos relacionados con la resistencia y disipación de energía inelástica, que cubren todas las posibilidades de daño que pueden presentarse ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Para este estudio se han considerado los estados de daño que se ilustran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Estados de daño considerados en el estudio.

Estado de daño	Rango Factor de daño (%)	Factor de daño central (%)
1. Ninguno	0	0
2. Leve	0-1	0,5
3. Ligero	1-10	5
4. Moderado	10-30	20
5. Fuerte	30-60	45
6. Mayor	60-100	80
7. Colapso	100	100

NINGUNO	Sin daño.
LEVE	Daño menor, el cual no requiere reparación.
LIGERO	Daño significativo de algunos componentes que generalmente no requieren reparación.
MODERADO	Daño significativo de muchos componentes, los cuales se requiere reparar.
FUERTE	Daño que demanda grandes reparaciones.
MAYOR	Daño tal, que puede llevar a la estructura a que sea arrasada, demolida o reparada.
COLAPSO	Dstrucción total.

Los valores de probabilidad de daño se obtienen de las Matrices de Probabilidad de Daño que fueron desarrolladas con base en criterios y apreciaciones de un amplio grupo de expertos. Estas matrices permiten definir la probabilidad de alcanzar un estado de daño según la intensidad, para cada una de las instalaciones; un ejemplo de una matriz de probabilidad de daño es la utilizada para edificaciones en mampostería no confinada que se presenta en la Tabla 2.

Es importante anotar que para las tipologías analizadas, que no cuentan con una matriz desarrollada dentro del ATC-13, se tomo como base una tipología similar utilizando factores determinados en el presente estudio. Se construyó así, una nueva matriz para dicha tipología. De manera similar, la matriz de probabilidad de daño para edificaciones en tapia o adobe se obtuvo de la matriz desarrollada para las edificaciones de mampostería en ladrillo de arcilla. Esta matriz se obtuvo estudiando la vulnerabilidad sísmica de la tapia pisada (Cortés, 2002 y Yépez et al., 1995).

Tabla 2. Matriz de Probabilidad de estado de Daño para mampostería no confinada, ATC-13.

ESTADO DE DAÑO	MDF	INTENSIDADES MMI						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
NADA	0	0	0	0	0	0	0	0
LEVE	0.5	9.1	0.6	0	0	0	0	0
LIGERO	5	90.5	55.5	10.9	0.5	0	0	0
MODERADO	20	0.4	43.4	66	22.4	2	0.1	0.1
FUERTE	45	0	0.5	22.9	65.9	35	10.1	3.4
SEVERO	80	0	0	0.2	11.2	62.5	83.1	50.4
COLAPSO	100	0	0	0	0	0.5	6.7	46.1
% DAÑO MEDIO		5	12	24	43	67	78	88

Los valores de daño medio (MDF) se calculan tomando las matrices de daño directo para cada tipo de instalación, mediante la ponderación de la probabilidad de daño de todos los estados de daño para cada intensidad. El valor de daño medio se calcula de la siguiente forma:

$$MDF_I = \sum_{DS=1}^7 (P_{DSI}) (CDF_{DS}) \quad (1)$$

Donde:

MDF_I	Factor de daño medio para una Intensidad dada en la escala de Mercalli Modificada.
DS	Estado de daño.
P_{DSI}	Probabilidad de alcanzar un estado de daño para cada intensidad.
CDF_{DS}	Factor de daño central para un estado de daño.

TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES ANALIZADAS

Al aplicar la metodología que plantea el ATC-13, las edificaciones deben clasificarse de acuerdo con sus características estructurales. Para el caso del Municipio de Bucaramanga, se asumieron las tipologías representativas y más frecuentes, siendo estas las edificaciones en muros de tapia o adobe, en mampostería no confinada o confinada o reforzada, en pórticos dúctiles o no dúctiles subdivididos en edificaciones de menos de tres niveles, entre 4 y 7, y iguales o mayores a 8; así mismo, se consideró el pórtico en acero y el muro estructural de hormigón reforzado.

TIPIFICACIÓN DE EDIFICACIONES

Definidos los tipos estructurales que se consideraron en este estudio, se procedió a dividir la ciudad en zonas, de acuerdo con las topologías estructurales prevalecientes. Después de lo anterior el siguiente paso consistió en la

recopilación de la información de las edificaciones de la ciudad, la cual se basó en los mapas prediales existentes en el DANE (DANE, 1998) y Ciudad Digital (Ciudad Digital, 2000).

En la fase de recopilación, la segunda actividad se ocupó de definir la unidad estructural usada para inventariar. Después de estudiar las diferentes opciones (predio, manzana, barrio, sector) se decidió seleccionar como unidad estructural la manzana.

Posteriormente se elaboró un formulario que permitió el levantamiento de la información necesaria para conocer la cantidad de edificaciones por zonas y los tipos estructurales prevalecientes en cada una de ellas.

Seguidamente, se realizó una prueba piloto que permitió definir la metodología de trabajo que se adoptaría en el estudio para el levantamiento de la información sobre las edificaciones de la ciudad. Definida la forma de trabajo se seleccionaron las manzanas que conformarían la muestra que debería ser analizada para abarcar toda la zona de estudio, inventariando 440 sobre el total de 3283 manzanas que conforman la ciudad. Con la muestra así definida, se dio inicio al levantamiento de la información en cada una de las casas de las manzanas seleccionadas. Este levantamiento permitió conocer los porcentajes de sistemas estructurales existentes en cada una de las 28 zonas definidas inicialmente. En seguida, se procedió a analizar la información obtenida, encontrándose que algunas de las zonas presentaban resultados similares, de tal forma que, junto a visitas globales a la ciudad, se revaluó la identificación de las zonas. Finalmente se realizaron nuevas visitas a la ciudad, y con toda la información anterior se redefinieron 20 zonas, sobre las cuales se continuó el estudio. En la Figura 2 se ilustran la zonificación definitiva de la ciudad de Bucaramanga de acuerdo con los tipos estructurales prevalecientes.



Figura 2. Plano de la zonificación definitiva de la ciudad de Bucaramanga.

Simultáneamente con el estudio de tipificación, se realizaron en la Universidad Industrial de Santander, estudios de caracterización dinámica de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga (Abreo y Argüello, 2003; Ardila y Méndez, 2003; Carreño y Rodríguez 2003, Castellanos y García, 2003), los cuales permitieron complementar la información

recolectada hasta entonces. Finalmente, la totalidad de la información anterior sirvió para identificar las topologías predominantes en cada una de las 20 zonas y, a su vez, se pudo conocer el porcentaje de tipo estructural existente en toda la ciudad, ver Figura 3.

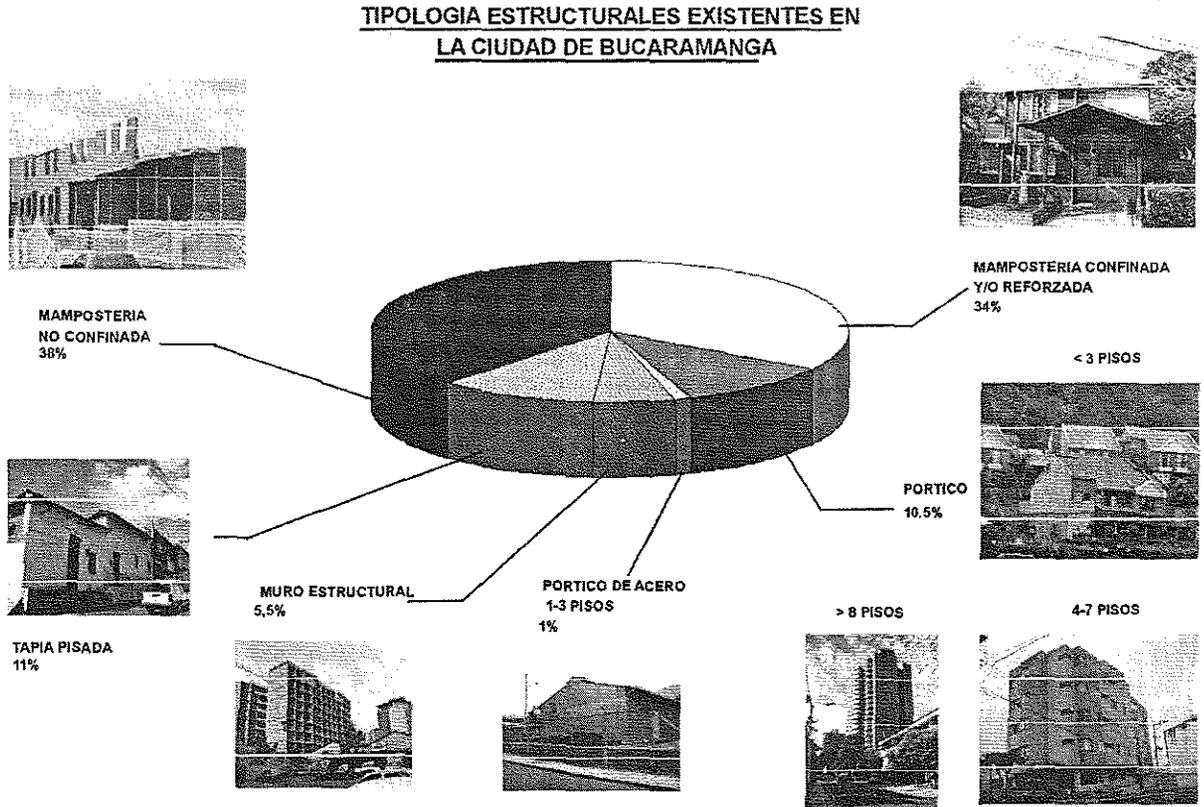


Figura 3. Tipologías estructurales predominantes en la ciudad de Bucaramanga.

Se observa que el 72% de las edificaciones de la ciudad corresponden a sistemas estructurales en muros de mampostería, los cuales representan el sistema predominante. En menor cantidad, pero de manera significativa, se encuentran estructuras en muros de tapia y en pórtico.

PARÁMETROS DE LA ACCIÓN SÍSMICA

El parámetro utilizado para caracterizar la acción sísmica es la *Intensidad Sísmica*, la cual se define a partir de la aceleración máxima A_m (Canas, 1995 y Canas et al., 1994).

Por consiguiente, para la definición de A_m , de los escenarios más probables en Bucaramanga, se partió del estudio de Microzonificación Sismogeotécnica del Área Metropolitana de Bucaramanga (Ingeominas, 2.002).

Para el estudio de microzonificación, se dividió la ciudad, inicialmente, en 7 zonas geotécnicas y a cada una se le analizó su respuesta dinámica ante los escenarios probables. Estudiando los resultados del análisis dinámico se definieron tres zonas sísmicas (roca, abanico y llenos) y, a su vez, en cada una de ellas se identificó un valor de A_m . Ver **Tabla 3**.

Calculado el valor de A_m se procedió a la definición de la Intensidad Sísmica, desarrollando las propuestas formuladas por: Trifunac y Brady (1.975), Ambraseys (1.974), Hershberger (1.956), Gutengerg and Richter (1.956) y Murphy and O'Brien (1.977); metodologías que están expuestas en el ATC-13. Los valores de intensidad obtenidos para las tres zonas sísmicas, de acuerdo con los diferentes autores, se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Valores de Intensidad para cada zona sísmica de acuerdo a diferentes autores.

Zona	A_m (g)	A_m (gals)	Trifunac	Ambraseys	Hershberger	Gutenberg	Murphy
I	0.3	294.3	VIII	VII	VIII	IX	IX
II	0.4	392.4	VIII	VIII	VIII	IX	IX
III	0.65	637.65	IX	VIII	IX	X	X

Se observa que existen algunas diferencias en la intensidad, dado que ésta no deja de ser un parámetro meramente subjetivo y cualitativo, diferente de la magnitud que está directamente involucrada con la liberación de energía del sismo.

Posteriormente, buscando adoptar una media entre los diversos autores, se seleccionaron tentativamente las intensidades que proponen Trifunac y Hershberger, los cuales asignan una intensidad de VIII para las zonas I y II (roca y suelo rígido) y, de IX para la zona III (zona de rellenos). Sin embargo, dado el pequeño tamaño que representa la zona III en comparación con las otras zonas, se decidió analizar toda la ciudad bajo una misma intensidad, tomando siete escenarios, desde la intensidad VI a la XII.

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Para el cálculo de daño en las edificaciones del Municipio de Bucaramanga, como se enuncio anteriormente, se utilizaron las matrices de probabilidad de daño de la metodología propuesta por el ATC-13/FEMA, para cada una de las tipologías estructurales existentes en la ciudad. Este daño total es la contribución del daño causado directamente por el sismo y por los efectos colaterales que el produce.

• CÁLCULO DE DAÑO DIRECTO

Para el cálculo del daño directo de las edificaciones existentes en cada zona, se sistematizó la metodología del ATC-13/FEMA, lo cual arroja como resultado el porcentaje de edificaciones dañadas para cada una de las tipologías estructurales definidas y el daño directo total de la zona, dado para cada intensidad sísmica (Ciudad Digital – UIS, 2002).

Tabla 3. Aceleraciones máximas probables (Ingeominas, 2.002).

ZONA	ACELERACIÓN MÁXIMA PROBABLE
1 Roca	0.30
2 Suelo Rígido	0.40
3 Llenos	0.65

• DAÑO DEBIDO A AMENAZAS COLATERALES

Para el cálculo de las amenazas colaterales, también se utilizó la metodología del ATC-13/FEMA como se describió anteriormente; dichas amenazas se evalúan para cada una de las zonas definidas en la tipificación, considerando como amenazas colaterales las debidas a deslizamiento y efecto de ruptura de falla.

Para el análisis del daño por deslizamiento se realizó una clasificación de las pendientes, se analizaron las características geológicas con sus respectivos problemas frente al sismo, y posteriormente se realizó una calibración con base en la información encontrada en la Corporación Autónoma de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), correspondiente a un estudio de estabilización del talud del barrio Santander.

Para el análisis de ruptura de falla se tomó el trazado de la línea de la falla Bucaramanga Santa Marta, la cual pasa por un costado de la ciudad; con base en estudios recientes de caracterización de ésta falla (Rey y Beltrán, 2002), asumiendo como ancho de la zona de falla y de arrastre las propuestas de la metodología del ATC-13, 100 metros a cada lado de la falla para la zona de falla y 200 metros a cada lado de la falla para la de arrastre.

• DAÑO TOTAL EN EDIFICACIONES

El daño total en edificaciones, definidos para el movimiento del terreno, mas el causado por daños colaterales post sismo, tales como falla del terreno por licuefacción (*PG*), deslizamiento (*LS*), ruptura de falla (*FR*) e inundación (*I*), es la suma de los diversos factores de daño promedio (*MDF*), así:

$$MDF(T) = MDF(S) + MDF(PG) + MDF(LS) + MDF(FR) + MDF(I) < 1.0 \quad (2)$$

En el presente estudio, teniendo en cuenta la mínima amenaza que representa el efecto combinado por inundación y por licuefacción, no se consideró. De esta forma el daño total se debe a la combinación del efecto directo del sismo (MDF(S)), el debido a deslizamiento (MDF(LS)) y el producido por ruptura de la falla (MDF(FR)).

$$MDF(T) = MDF(S) + MDF(LS) + MDF(FR) < 1.0 \quad (3)$$

Este cálculo se sistematizó obteniendo resultados de daño total por zona para cada intensidad del movimiento sísmico. Una vez calculado el Factor de Daño Promedio Total (MDF(T)), se asoció con el estado de daño previamente definido e ilustrado en la **Tabla 1**.

En la **Tabla 5** se presentan los resultados obtenidos para la zona 12.

Tabla 5. Daño total en la zona 12.

INTENSIDAD	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Directo	3	8	17	31	49	61	73
Por Licuefacción	0	0	0	0	0	0	0
Por Pendiente	21	30	33	42	55	67	77
Por Ruptura falla	10	10	10	10	10	10	10
Por Inundación	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	34	48	60	83	100	100	100
ESTADO DE DAÑO	5	5	5	6	7	7	7

Del estudio de los resultados de daño total para la zona 12 se observa que sus edificaciones alcanzan un estado de daño fuerte ante las intensidades VI, VII y VIII, pero puede llegar al colapso ante un sismo de intensidad superior a IX.

Los resultados para todas las zonas se presentan en el documento del Estudio Indicativo de la Vulnerabilidad Sísmica de Bucaramanga (Ciudad Digital-UIS, 2002).

Con los resultados de los daños por zona, se construyeron los mapas de vulnerabilidad para toda la ciudad, los cuales representan el nivel de daño alcanzado en la ciudad ante una intensidad dada. En la **Figura 4** se ilustra el mapa de vulnerabilidad de la ciudad ante la eventualidad de un sismo de intensidad VII.

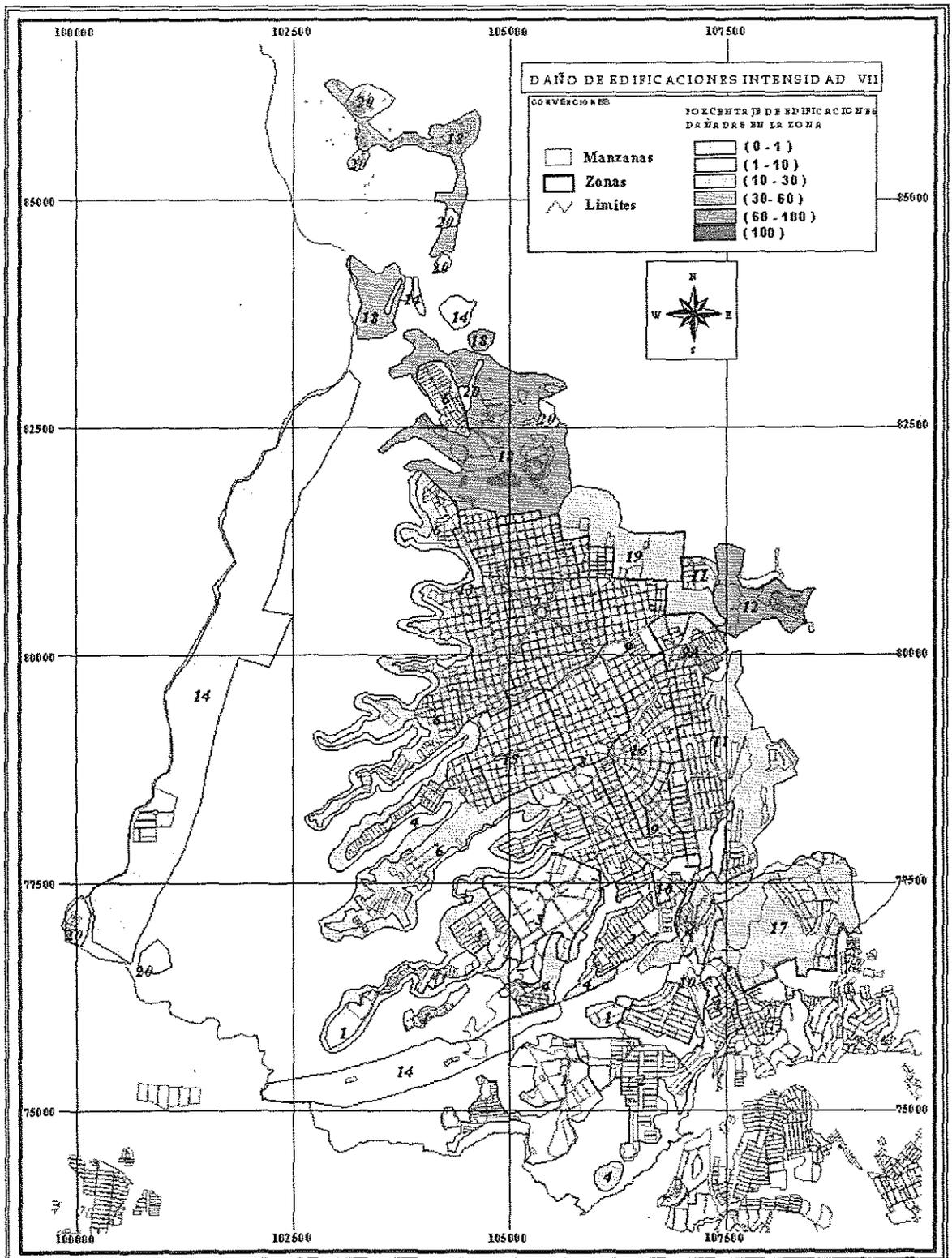


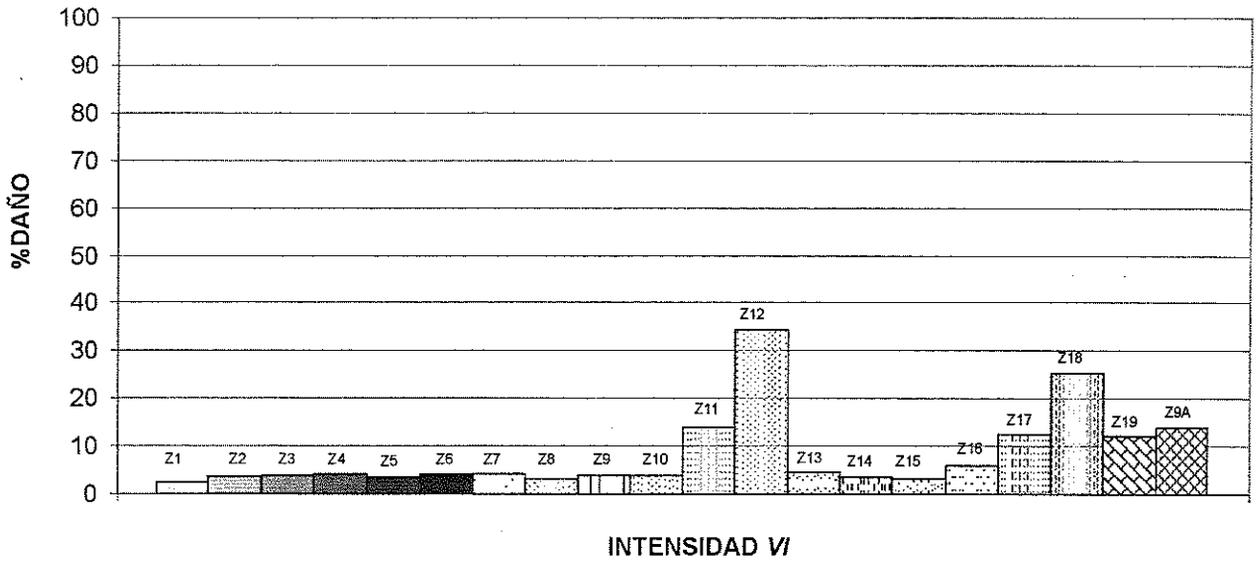
Figura 4. Daño en edificaciones para la Intensidad VII.

ANÁLISIS DE RESULTADOS E IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS MÁS AFECTADAS

Una vez obtenidos los resultados para toda la ciudad y para cada escenario sísmico probable, se procedió a comparar los resultados en las diferentes zonas.

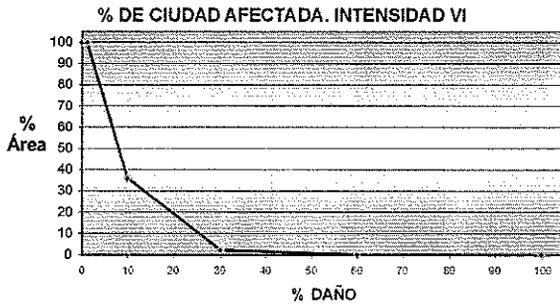
En la **Figura 5** se ilustran los resultados de daño para todas las zonas de la ciudad ante la ocurrencia de un sismo probable de intensidad VI.

DAÑO EN EDIFICACIONES POR ESCENARIO

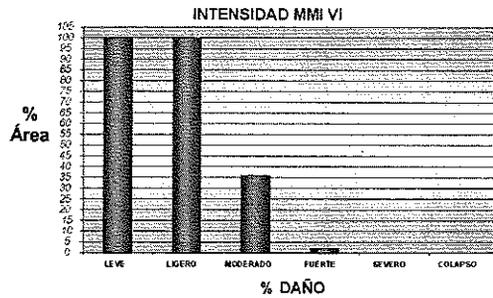


INTENSIDAD VI

a. Daño en edificaciones por zona para la intensidad MMI VI.



b. Porcentaje del área de la ciudad más afectada ante la intensidad VI. (Tipo función lineal).



c. Porcentaje del área de la ciudad más afectada ante la intensidad VI. (Tipo Diagrama de Barras)³.

Figura 5. Porcentaje de ciudad afectada para cada estado de daño a una intensidad MMI VI.

³ Colapso: 100% de Daño, severo:60% - 100%, fuerte: 30% - 60%, moderado: 10% 30%, ligero: 1% - 10%, leve: 0% - 1%

A continuación, en la intensidad VI solamente una zona, es decir el 5% de las zonas, alcanza un nivel del 34%, el 25% se encuentran en un nivel de daño entre el 10% y el 30%, y el 70% de las zonas restantes sufriría daños por debajo del 10%. Este es el escenario menos dañino, sin embargo el 35% de las edificaciones de la ciudad llega a un nivel de daño superior al 10%.

En la **Figura 5**, en los literales b y c, se ilustra el porcentaje de área afectada de la ciudad de acuerdo con el nivel de daño alcanzado ante un sismo de Intensidad VI. Se observa que entre el 100% y 35% del área total de la ciudad se puede sufrir daños entre leves y ligeros y, entre el 35% al 3% los daños pueden llegar a ser moderados.

Este mismo tipo de análisis fue realizado para toda la ciudad ante las diferentes intensidades sísmicas posibles, y del análisis de los resultados se puede concluir:

- Intensidad VI, el 72% de la ciudad es ligeramente dañado, el 25% es moderadamente dañado y un 3% es fuertemente dañado.
- Intensidad VII, el 44% de la ciudad presenta un daño ligero, el 43% moderado y el 13% fuerte.

- Intensidad VIII, el 1% de la ciudad presenta un daño ligero, el 80% moderado y el 19% fuerte.
- Intensidad IX, la ciudad es moderadamente dañada en un 21%, en un 66% es fuertemente dañada y en el 13% es severamente dañada.
- Intensidad X, el 1% sufre un daño moderado, 48% es fuertemente dañada, 47% severamente dañada, y el 4% de la ciudad colapsaría.
- Intensidad XI, el 8% de la ciudad presenta un daño fuerte, el 49% es severamente dañado y el 43% colapsaría.
- Intensidad XII, el 1% de la ciudad es fuertemente dañado, el 36% severamente dañada y el 63% colapsaría.

Lo anterior es una descripción general de la probabilidad de daño en cada uno de los escenarios estudiados en la ciudad de Bucaramanga, los cuales a su vez se representan gráficamente en la **Figura 6**.

DAÑO GENERAL EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

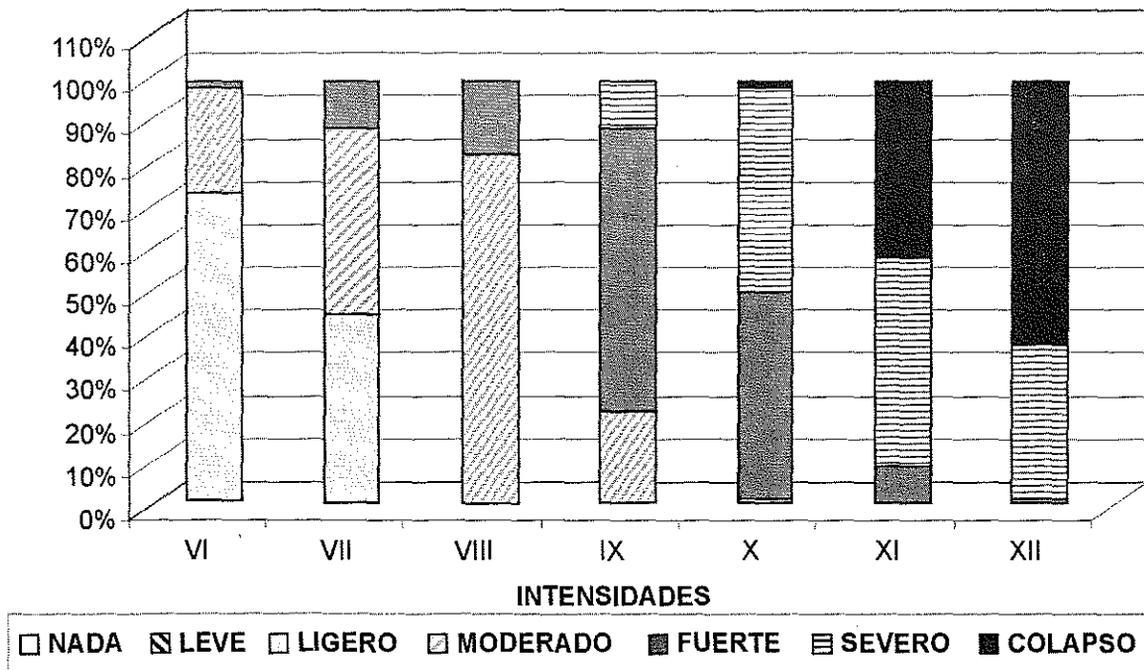


Figura 6. Daño general de la ciudad por intensidad sísmica⁴.

⁴ Colapso: 100% de Daño, severo:60% - 100%, fuerte: 30% - 60%, moderado: 10% 30%, ligero: 1% - 10%, leve: 0% - 1%

- IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS MÁS CRÍTICAS

Realizado el cálculo del daño sísmico de las edificaciones, ante diferentes escenarios sísmicos, se procedió con la identificación de las zonas que probablemente serían las más afectadas. En la **Tabla 6** se presentan, para los diferentes escenarios, las zonas, por nivel de afectación. El nivel 1 corresponde al de mayor grado de daño alcanzado.

Tabla 6. Zonas más afectadas de acuerdo a los escenarios

NIVEL DE AFECTACION	VI	VII	VIII	IX	X
1	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12
2	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18
3	Zona 9A y 11	Zona 9A y 11	Zona 11	Zona 11	Zona 13
4			Zona 9	Zona 13	Zona 11
5				Zona 6 y 4	Zona 6
6					Zona 4
7					Zona 17

A partir de la anterior comparación se identificaron las zonas de mayor afectación, siendo las que se presentan en la 12 y 18; probablemente serían afectadas también, pero en menor grado, las zonas 11, 9, 6, 4, 13 y 17. De estas últimas se resalta la condición de encontrarse o bien localizadas en la escarpa de la meseta o en las áreas por donde cruza la falla Bucaramanga-Santa Marta, ver **Figura 7**.

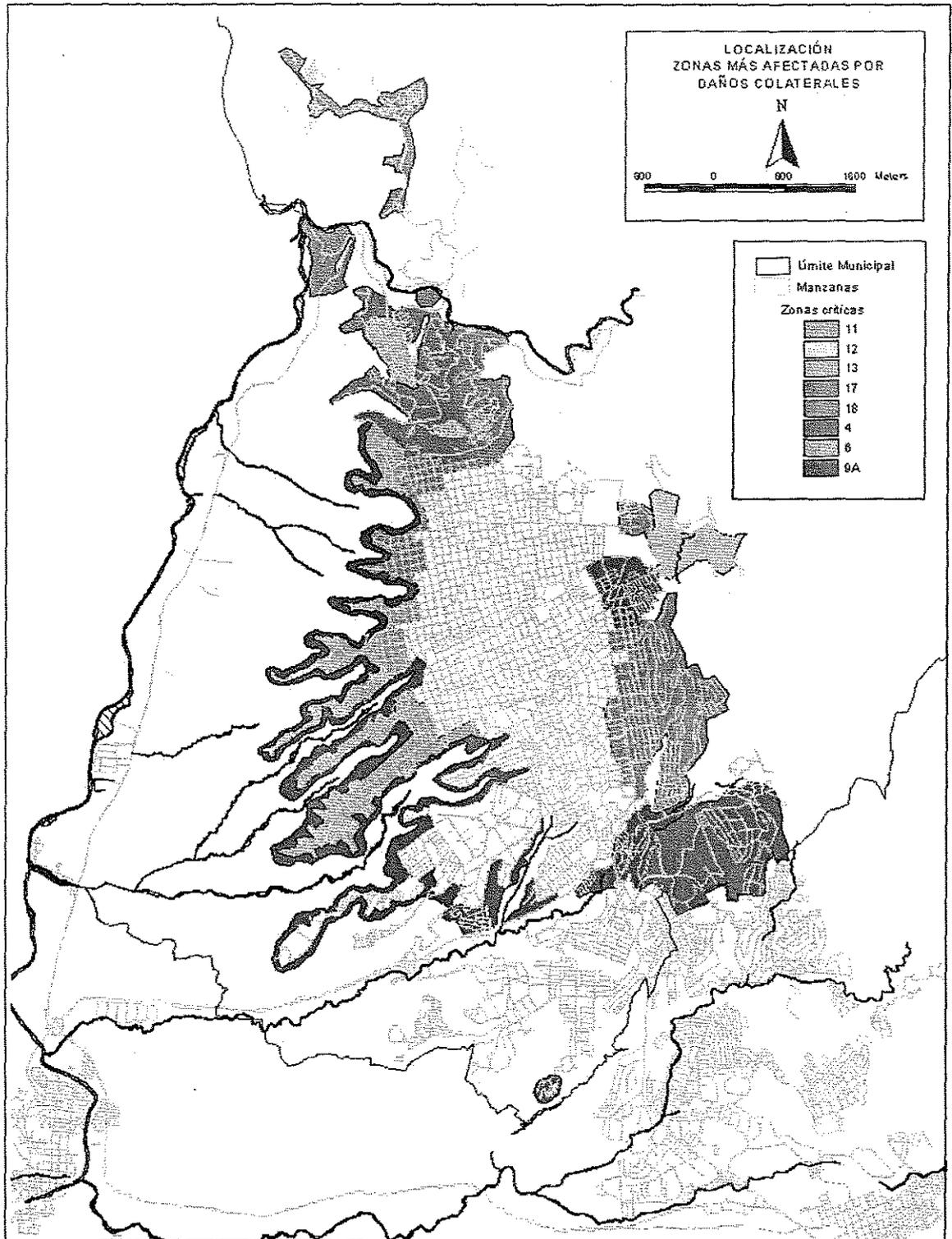


Figura 7. Localización de las zonas más afectadas por daños colaterales.

RECOMENDACIONES PARA EL PLAN DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN EN EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA

A partir del estudio realizado se identificaron las zonas del municipio más vulnerables sísmicamente y de igual manera se formularon recomendaciones para los propósitos de la planificación urbana, consideración de aspectos estructurales, edificaciones estratégicas e infraestructura vial.

PLANIFICACIÓN URBANA

Para los efectos de una posterior modificación o para los planes parciales que se prevea desarrollar se propone tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Identificar y reubicar los asentamientos que se encuentren en las zonas de alta vulnerabilidad sísmica debida a efectos colaterales de deslizamiento y ruptura de falla.
- Replantear la ubicación de las zonas de expansión del municipio, de tal manera que en sectores de arrastre de falla, de ruptura de falla o propensos a deslizamientos, estos factores sean tenidos en cuenta en el diseño y construcción de las edificaciones y obras civiles.
- Definir, dentro del Municipio, zonas en donde se pueda asentar la población desplazada que llega a la ciudad, de tal manera que no se ubiquen en áreas de alta amenaza sísmica. Estas áreas deberán contar con la infraestructura necesaria. A su vez, se debe garantizar el apoyo para el retorno a su lugar de origen o, si es del caso, para su integración dentro del aparato productivo del municipio.
- Establecer un programa gubernamental destinado a que los propietarios de las edificaciones ubicadas en las zonas Nororiente, Norte y Oriental, inicien labores de adecuación de sus estructuras o de reubicación, especialmente en el sector de Morrorrico así como del desplazamiento activo del norte de la ciudad.
- Planificar la ubicación de zonas verdes, parques o escenarios deportivos, de tal forma, que puedan servir como áreas de alojamiento temporal en caso de ocurrencia de un sismo en la ciudad.
- Definir la capacidad de alojamiento de parques, zonas verdes y escenarios deportivos que posiblemente deban ser utilizados, para incorporarlos en los planes de atención después de la ocurrencia de un terremoto.
- Proyectar la ubicación de una estación de bomberos en el Norte de la ciudad. El sector recomendado es el Barrio Kennedy.
- Estudiar la vulnerabilidad sísmica de las líneas vitales de provisión de servicios y definir la vulnerabilidad ante caso de incendio.

ASPECTOS ESTRUCTURALES

Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio de vulnerabilidad, con respecto a las edificaciones, se enuncian a continuación algunas recomendaciones generales, así:

- Las edificaciones en tapia deben ser reestructuradas para mejorar su comportamiento estructural, de tal manera que cuenten con la capacidad necesaria para resistir las fuerzas laterales que produce la acción sísmica.
- En zonas ubicadas sobre o en cercanía de la Falla Bucaramanga-Santa Marta, que presentan susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos masivos, no se recomienda el desarrollo de áreas urbanas, a no ser que las edificaciones sean diseñadas y construidas para tales condiciones.
- Se recomienda controlar el cumplimiento de las especificaciones técnicas de los materiales, mano de obra y construcción de las edificaciones absolutamente en todos los sitios de la ciudad, siguiendo los requerimientos formulados por las Normas Sismorresistente de 1998, NSR-98.
- La construcción en terrenos de ladera debe ser reglamentada de tal forma que se tenga en cuenta el efecto amplificador que le introduce la pendiente a la acción sísmica. A su vez, se debe disponer de sistemas estructurales que ofrezcan un buen comportamiento sísmico bajo las condiciones que impone la topografía.
- Se recomienda que los tanques elevados sean debidamente amarrados y asegurados a la estructura de la edificación, de manera que no actúen como masas aisladas y concentradas, unidas por elementos débiles.
- Los elementos estructurales deben ofrecer continuidad dentro de la estructura, de tal forma que permitan la transmisión de las cargas desde el punto de actuación hasta la cimentación.
- Se recomienda reducir la densificación de zonas urbanas y redefinir las topologías estructurales y número de pisos para edificaciones localizadas en áreas de alta vulnerabilidad sísmica.

- Es importante tener en cuenta que las instalaciones donde se encuentran actualmente los centros de salud y gran parte de los establecimientos educativos del municipio deben ser analizados, con la mayor brevedad posible e individualmente, frente a los lineamientos que establece la Norma Sismorresistente de 1.998 (NSR 98), haciendo que estas edificaciones cumplan con las condiciones para soportar la intensidad del sismo asumido como sismo de diseño para Bucaramanga. La misma observación se plantea para las instalaciones de las empresas de servicios públicos y las de seguridad, escenarios deportivos, supermercados, teatros, centros de convenciones, templos, escuelas y colegios.
- Con respecto a la planificación urbana del municipio, es muy importante que la Oficina Asesora de Planeación, en coordinación con las Curadurías urbanas y la Policía Nacional o la entidad que corresponda, desarrollen un efectivo control sobre las construcciones, para que cumplan las condiciones técnicas que implica desarrollar un proyecto de vivienda en una zona de amenaza sísmica alta.
- Se recomienda desarrollar un estudio que defina las eventuales pérdidas económicas, de vidas humanas y de funcionalidad del municipio, para obtener un indicador con respecto a valor económico de pérdidas y costos de reposición.
- Así mismo, estudiar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de atención a la comunidad como estaciones de bomberos, sedes de la Defensa Civil, Policía, cuarteles de las fuerzas armadas y sede de las oficinas de atención de desastres, garajes de vehículos de emergencia, estructuras y equipos de centros de atención de emergencias y las demás que la Alcaldía considere necesarias.

INFRAESTRUCTURA VIAL

Deben definirse con claridad los principales corredores viales utilizables después de la ocurrencia de un sismo, aspecto fundamental, dado que gran parte de las acciones de apoyo dependen directamente de la accesibilidad para llevarlas a los sitios donde sean necesarias. La forma de llegar a los sitios críticos depende de la disposición, señalización y estado de conservación de las vías de comunicación y de sus accesos y pasos obligados, tales como los puentes y pasos a nivel.

Con anterioridad a este estudio se han desarrollado trabajos de investigación encaminados a definir la vulnerabilidad y daño sísmico de los puentes carreteables en el Área Metropolitana de Bucaramanga (Maldonado, 1998; Maldonado et al, 2.001; Ortiz y Rugeles, 2.002; Amado y Martínez, 2.002; Gutiérrez y Rangel, 2001); así mismo, se ha realizado el inventario de los puentes peatonales (Ortiz, 2.003), estudios que se tuvieron en cuenta para formular las siguientes recomendaciones.

EDIFICACIONES ESTRATÉGICAS

Es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones y criterios, con respecto a las edificaciones consideradas estratégicas:

- Realizar un estudio detallado de la vulnerabilidad de las edificaciones donde se encuentran las oficinas de los organismos del prevención y atención de desastres, las cuales son indispensables para atender la emergencia que se presentaría en la ciudad después de ocurrido un evento sísmico.
- Hacer cumplir la norma del NSR-98 en cuanto corresponde a la obligatoriedad de realizar el estudio de vulnerabilidad sísmica y ejecutar el debido programa de mejoramiento sísmico, si se requiere, a las edificaciones indispensables como hospitales de nivel de complejidad 2 y 3, clínicas y centros de salud con servicios de urgencias y cirugía, edificaciones de centrales telefónicas y de radiodifusión, edificaciones de centrales de operación y control de líneas vitales de energía eléctrica, agua, combustible, información y transporte de personas y productos.
- Identificar los corredores viales principales, indispensables para garantizar la atención inmediata de cualquier eventual emergencia, los cuales intercomunican las zonas propuestas de evacuación, los principales centros médicos y las principales vías de acceso y salida del Municipio.
- Identificar los puentes carreteables y peatonales que inciden directa o indirectamente en los corredores viales principales, ya que al colapsar un puente peatonal se convierte en un grave obstáculo para la posterior habilitación del corredor vial.
- Estudiar la vulnerabilidad sísmica de las vías principales, consideradas como prioritarias, así como de sus estructuras complementarias, para evitar, en la ocurrencia de un sismo, la obstrucción de los corredores viales por acción del colapso de puentes peatonales y vehiculares.

CONCLUSIONES

- Este trabajo muestra la importancia que reviste el realizar estudios que permitan plantear y aplicar programas que, ante la amenaza de un sismo, contribuyan a disminuir los daños y reducir el número de personas afectas, dado que estos estudios identifican y caracterizan las zonas de mayor riesgo y las probables causas de su vulnerabilidad.
- La aplicación de la metodología usada en este estudio permite inferir el riesgo sísmico, ofreciendo elementos para la elaboración de planes de mitigación y prevención, y aporta información que pueda ser utilizada en la planificación física y urbana de la ciudad de Bucaramanga. Sin embargo, aplicando las matrices del ATC-13 para la estimación del daño de las instalaciones de la ciudad se asume que los daños sísmicos ocurridos en cada tipología y ante cada intensidad son iguales a los propuestos en la metodología del ATC-13.
- Estudios como el presente precisan de información suficiente que permita la identificación de los sistemas estructurales existentes, de los diversos tipos de edificaciones construidas en toda el área de estudio. A su vez, se debe contar con información de la amenaza sísmica, para definir los posibles escenarios; y, para la evaluación de los efectos colaterales es necesario contar con estudios de remoción de masas y estimación de lluvias.
- Debido a la incertidumbre que se presenta en estudios de esta naturaleza, especialmente en el proceso de recolección de información, inventario de las instalaciones, número de elementos expuestos y clasificación de los mismos, el alcance de este estudio y su responsabilidad técnica, están limitados al nivel indicativo.
- El estudio debe desarrollarse en varias etapas, que abarcan desde el inventario de las edificaciones, la zonificación dependiendo de los tipos estructurales predominantes, la definición del nivel de daño que pueden sufrir las edificaciones de los diferentes sectores de la ciudad, hasta la formulación de recomendaciones para mitigar el riesgo.
- Como resultado de este trabajo se obtienen mapas de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, a escala y para diferentes escenarios hipotéticos probables, los cuales, para el caso de Bucaramanga, han permitido conocer y valorar las zonas que tienen y pueden presentar problemas en la eventualidad de la ocurrencia de un sismo.

- Los resultados obtenidos en el estudio permiten asegurar que el crecimiento de los conglomerados urbanos, sin planeación de cualquier tipo, conlleva, en un municipio, a estar expuestos a un alto riesgo en el caso eventual que ocurra un sismo fuerte. El hecho de no controlarlos en la actualidad, provocará que estos crezcan cada día y de esta manera se incremente el número de personas expuestas al riesgo.
- Finalmente, el estudio denota un firme llamado a la atención de las entidades gubernamentales para que controlen el desarrollo urbano en aquellas zonas de alto riesgo sísmico, como el existente en las Zonas 12, 18 y el escarpe. A su vez, el estudio recomienda, a un mismo tiempo, impedir la construcción sin tipo alguno de reglamentación en dichas zonas, y exigir mayor control en los procesos de diseño y construcción de las viviendas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABREO, G. J. y ARGÜELLO, S. A. (2.003). Caracterización dinámica de las edificaciones ubicadas en el sector de Ciudadela Real de Minas (Bucaramanga), Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [2] AMADO, A. y MARTÍNEZ, E. (2.002). Estimación del índice de daño para una muestra representativa de los puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga, Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [3] APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL, CALIFORNIA (1.985), Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13, Redwood City, California, USA.
- [4] AMBRASEYS N.N. (1974). The correlation of intensity with ground motions, in Proc. of the 14th Conference of the European Seismological Commission, Trieste, Italy, 16–22.
- [5] ARDILA, R. y MÉNDEZA. (2.003). Caracterización dinámica de las edificaciones ubicadas en el sector de Morrorrico (Bucaramanga), Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [6] ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA (1.996). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia, Comité AIS-300 Amenaza Sísmica, Bogotá.

- [7] ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA (1.998). Normas Colombianas de Diseño y Construcciones Sismo Resistentes, NSR-98, Bogotá.
- [8] CANAS, J. A. (1.995). Estudios de ingeniería sísmológica y sísmica, Monografía CIMNE IS-13, Barcelona.
- [9] CANAS, J. A., PUJADES, C. y BANDA E. (1.994). Sismología y peligrosidad sísmica, Monografía CIMNE IS-11, Barcelona.
- [10] CARREÑO, O. y RODRÍGUEZ, R. (2.003). Caracterización estructural de edificaciones de uno y dos niveles ubicadas en la meseta de Bucaramanga, Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [11] CASTELLANOS, C. J. y GARCÍA, O. M. (2.003). Caracterización estructural de edificaciones de primer y segundo nivel ubicadas en una zona de Bucaramanga, Tesis (Ingeniería Civil), Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.
- [12] CIUDAD DIGITAL - UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (2.002). Vulnerabilidad sísmica indicativa del municipio de Bucaramanga, convenio interadministrativo no. 066/2.002.
- [13] CIUDAD DIGITAL (2.000). Cartografía Básica, Área Metropolitana de Bucaramanga. Escala 1:2.000. Bucaramanga.
- [14] CORTES, W. L. (2002). Desarrollo de una metodología para la evaluación sismorresistente de edificaciones antiguas en tapia pisada y adobe. Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [15] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA -DANE- (1.998). Cartografía Básica, Municipio de Bucaramanga. Bucaramanga.
- [16] GUTIÉRREZ, E. H. y RANGEL, R. E. (2.002). Mejoramiento sísmico de los puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga, Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [17] GUTENBERG BY RICHTER C. F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, Bull. Seism. Soc. Am. 46, 105-145.
- [18] HERSCHBERGER J. (1956). A comparison of earthquake accelerations with intensity rating, Bull. Seismol. Soc. Am. 46, 317-320.
- [19] INGEOMINAS y UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, (1.997). Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá, Convenio Interadministrativo 01-93, Bogotá.
- [20] INGEOMINAS-CDMB (2.002). Microzonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Bucaramanga.
- [21] JIMÉNEZ, J. (2.002). Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de Cuenca mediante técnicas de simulación, Tesis para optar el grado de Master en Ingeniería Estructural Sismo Resistente, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [22] MALDONADO, E., CASAS, J. R. y CANAS, J. A. (1.998). Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes, Monografía CIMNE IS-28, Barcelona, 97 pg.
- [23] MALDONADO, E., CASAS, J. R. y CANAS, J. A. (2.000). Modelo de vulnerabilidad sísmica de puentes basado en "Conjuntos Difusos", Monografía CIMNE IS-40, Barcelona, 100 pg.
- [24] MALDONADO, E., CASAS, J. R. y CANAS, J. A. (2.002). "Utilización de los conjuntos difusos en la determinación de los parámetros de vulnerabilidad sísmica en puentes". Revista Internacional de Métodos Numéricos, Centro Internacional de Métodos Numéricos para Ingeniería, Volumen 18, número 2. pg. 209-226. Barcelona.
- [25] MALDONADO, E., CASAS, J. R., CANAS, J. A. y CHIO, G. (2.001). "Evaluación Preliminar de la Vulnerabilidad Sísmica de los Puentes de la Ciudad de Bucaramanga (Colombia)", II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica", ABIS, Madrid, España.
- [26] MURPHY, J. R. Y O'BRIEN, L. J. (1977). The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters, Bull. Seism. Soc. Am. 67, 877-915.
- [27] ORTIZ, E. A. (2.003). Inventario y construcción de una base de datos para los puentes peatonales en el Área Metropolitana de Bucaramanga, Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

- [28] ORTIZ, J. y RUGELES, J. A. (2.002). Inventario y construcción de una base de datos de los puentes vehiculares del Área Metropolitana de Bucaramanga, Tesis (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [29] TRIFUNAC MD y BRADY AG (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. Bull Seismol Soc Am; 65(3):581-626.
- [30] REY, A. y BELTRÁN, R. (2.002). Comportamiento estructural asociado al sistema de fallas Bucaramanga - Santa Marta y diaclasas, para definir una red de drenaje subterráneo en el macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (Río de Oro) y Bucaramanga (Río Surata), Tesis (Geología). Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [31] YÉPEZ, F. (2.001). "Sistema automático de cálculo de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de ciudades RISMIC VS. 1.0 (Ecuador)". II Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, AEIS, Madrid, España.
- [32] YÉPEZ, F., BARBAT, A. y CANAS, J. A. (1.995). Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica en edificios de mampostería, Monografía CIMNE IS-12, Barcelona, 104 pg.