

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE PEQUEÑAS Y MEDIANAS CIUDADES. ESTUDIO DE CASO: ZONA CENTRO DE LA CIUDAD DE ARMENIA - COLOMBIA

Leonardo Cano-Saldaña¹, Hugo Monsalve-Jaramillo¹, Jairo Andrés Agudelo-Calvo¹, Fabio Mauricio Upegui-Botero y Juan Diego Jaramillo-Fernández²

Resumen: En este documento se resume el desarrollo de una metodología que permite evaluar fácil y rápidamente la vulnerabilidad indicativa de un predio y/o manzana determinada. Además se puede calcular aproximadamente las pérdidas probables (estructurales y no estructurales) que puede presentar una edificación frente a un sismo específico. La metodología puede ser usada en la evaluación del escenario de pérdidas de pequeñas y medianas poblaciones. La metodología usa como variables las características generales de la edificación tales como: año de construcción, altura, tipo de cubierta, sistema constructivo, etc. las cuales aportan un porcentaje de la vulnerabilidad indicativa. El otro porcentaje lo aporta el tipo y las características de los suelos sobre el cual está cimentada la edificación. La presente metodología es una ampliación y adaptación de la metodología PERCAL 6 para la evaluación del riesgo sísmico, desarrollada en la Universidad EAFIT de Medellín (Jaramillo, 1997), con la enorme ventaja de tener un alto grado de detalle en la obtención de las pérdidas de cada edificación. La metodología desarrollada fue utilizada en el sector de la zona centro de la ciudad de Armenia (Quindío) en Colombia, con una cantidad de 2525 predios. Éstos fueron visitados y estudiados con el fin de obtener su vulnerabilidad indicativa, utilizando como herramienta informática principal un sistema de información geográfica con el objetivo de mostrar de forma esquemática la vulnerabilidad y los posibles escenarios de daño para diferentes intensidades de un sismo.

Palabras Claves: Riesgo sísmico, riesgo sísmico en Colombia, sistema de información geográfica, vulnerabilidad sísmica.

METHODOLOGY FOR SEISMIC RISK EVALUATION OF SMALL AND MEDIUM CITIES. CASE STUDY: DOWNTOWN ARMENIA CITY-COLOMBIA

Abstract: This paper is a summary of the development of a methodology used to carry out an easy and quick evaluation of the indicative vulnerability of a previously defined building or (urban) block. Through this procedure, it is also possible to roughly calculate the probable losses (structural and non-structural) that a building can undergo when it is affected by a specific earthquake. This procedure uses as input certain general characteristics of a building such as the construction year, height, roof type, construction system, etc., which along with the soil type where the building is founded are weighed in order to set the total percentage of the indicative vulnerability. The present procedure is a revised and adapted methodology of that used in the software PERCAL 6 (software for the generation of seismic risk in urban scenarios) developed in the University EAFIT of Medellín (Jaramillo, 1997), with the enormous advantage of having a high degree of detail in obtaining the losses of each construction. The methodology developed was used to evaluate 2525 buildings in the downtown zone of Armenia (Quindio, Colombia). These buildings were checked and studied to obtain their indicative vulnerability using as main tool a geographic information system

¹ Centro de Estudios e Investigaciones, Facultad de Ingeniería – CEFI – Universidad del Quindío, Armenia (Q)-Colombia, Cra 15 # 12N. E-mail: hugom@uniquindio.edu.co

² Facultad de Ingeniería – Universidad EAFIT, Medellín-Colombia. E-mail: jjarami@eafit.edu.co

with the purpose of showing a scheme of the vulnerability and the possible damage scenarios consistent with different earthquake intensities.

Keywords: seismic risk, seismic risk in Colombia, GIS, seismic vulnerability.

INTRODUCCIÓN

La vida del hombre se ha visto marcada, a través de la historia por la ocurrencia de sismos y los efectos que ellos producen. De ahí la motivación de estudiar dichos eventos y tratar de mitigarlos. El escenario de pérdidas debido a un terremoto que afecte una ciudad, depende de muchas variables, algunas de las cuales están asociadas al fenómeno mismo (por ej., características del sismo, duración, trayectoria, distancia hipocentral, etc). También existen variables relacionadas con el entorno y ubicación de las edificaciones como tipo y característica de los suelos, topografía, etc. y otras variables directamente dependientes de las características físicas y dinámicas de las edificaciones existentes como materiales, configuración estructural y otras.

Desde este punto de vista, la evaluación del posible escenario de pérdidas por sismo en un centro urbano depende de la amenaza sísmica y de la vulnerabilidad del escenario a dicha amenaza. Específicamente, la obtención de la vulnerabilidad requiere la determinación del grado de susceptibilidad o no de ser afectado por la amenaza. Para escenarios urbanos se debe por lo tanto determinar no solamente el tipo y características de la amenaza potencial sobre la ciudad, sino también la respuesta y el nivel de daño de la misma.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

En este trabajo se plantea una metodología específica para la determinación del riesgo urbano de pequeñas y medianas ciudades. Para la determinación del riesgo sísmico se debe llevar a cabo una estimación de la amenaza sísmica y una evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

AMENAZA SÍSMICA:

La estimación de la amenaza sísmica se puede realizar mediante métodos probabilísticos (también existen metodologías determinísticas) teniendo en cuenta variables como:

- Tipo y características de las fuentes sismogénicas que pueden potencialmente producir sismos que afecten la ciudad y estudios geológicos, sismológicos y geotectónicos aportan información en este contexto.
- Sismicidad histórica de la zona
- Aspectos como magnitudes máximas de acuerdo a las fallas y longitudes de ruptura probables.
- Distribución espacio-temporal de los sismos en o cerca de la zona a estudiar.
- Atenuación de las ondas sísmicas.
- Registros acelerográficos disponibles.

Existen en la actualidad metodologías aceptadas para la evaluación de la amenaza sísmica que involucran en mayor o menor grado cada una de las variables o características anteriores. Es importante aclarar en este punto que la intensidad del sismo esperable en el sitio debe ser entendida en términos generales como los valores de aceleración, velocidad, desplazamiento o coordenadas espectrales de cualquier variable que permita inducir sobre la estructura solicitaciones que requieran su respuesta ante ella dinámicamente.

Específicamente para el estudio de caso desarrollado, se usó como variable representativa de la amenaza, la estimación de la aceleración máxima esperable en el sitio, a nivel de basamento rocoso calculada mediante el modelo de Línea Fuente (Der-Kiureghian, 1975). En términos generales, cualquier otro modelo probabilístico o determinístico puede emplearse para la estimación de la amenaza en el sitio, y aunque el programa de computador usa como dato de entrada la aceleración en el sitio, ésta puede ser sustituida fácilmente por cualquier otro parámetro que induzca a la estructura solicitaciones dinámicas (incluso registros reales o sintéticos de historias contra el tiempo de aceleraciones, velocidades, desplazamiento, demandas energéticas, etc.). De esta manera no existe limitación práctica para la aplicación de la metodología propuesta.

VULNERABILIDAD SÍSMICA

Una vez establecida la amenaza sísmica potencial sobre la ciudad, se debe evaluar la vulnerabilidad de la misma ante dicha amenaza, esto es la afectación o daño que van a tener las estructuras ante la ocurrencia del sismo.

No se puede perder de vista que lo que se está intentando predecir son las pérdidas (riesgo) de toda una ciudad debido a la ocurrencia de un sismo, por lo tanto es necesario emplear modelos simplificados que permitan “predecir” el nivel de daño de las edificaciones al presentarse el sismo.

La mayoría de los métodos para predecir pérdidas a nivel de ciudades están basados en una evaluación general de vulnerabilidad y en una globalización de los resultados de pérdidas. En la metodología planteada a continuación se calcula la pérdida (estructural y no estructural) probable de cada una de las edificaciones que componen la ciudad y el escenario final de riesgo se determina como la suma de las contribuciones particulares de pérdidas. Este enfoque filosófico presenta la ventaja de que el grado de detalle en la estimación de las pérdidas es muy alto. La desventaja principal del método es que debido a esto su campo de aplicación puede estar restringido a pequeños o medianos escenarios urbanos (entiéndase ciudades no muy grandes o subsectores de grandes ciudades), debido principalmente a lo dispendioso y costoso que puede resultar la recolección de la información primaria para ciudades de gran tamaño.

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LA ESTRUCTURA

El conocimiento obtenido en los últimos años en la ingeniería ha permitido desarrollar bases que facilitan efectuar un diseño de estructuras con razonable seguridad para la vida. Ha sido posible también aplicar criterios económicos en el diseño sismorresistente optando por estructuras menos fuertes que lo necesario y, como consecuencia, de menor costo inicial. Al ser éstas sometidas a un movimiento sísmico severo, deben sufrir daños controlados, sin colapsar. El comportamiento sísmico adecuado de una estructura depende, además de su resistencia, de su habilidad de disipar energía vibratoria a partir del instante en que sus deformaciones exceden el límite elástico. La vibración de la estructura en el rango inelástico durante sismos fuertes significa, por lo tanto, la ocurrencia de daños estructurales y no estructurales. Esto no debe confundirse con el comportamiento deficiente que una estructura puede tener frente a un sismo incluso moderado, debido a un déficit de resistencia o a una ductilidad escasa, es decir, con su vulnerabilidad.

Se acepta, en general, y así se recoge en algunas normativas, que los edificios se diseñen para resistir sismos fuertes sin colapso, aún cuando se produzcan daños estructurales severos; sismos moderados con daños estructurales moderados y no estructurales aceptables y sismos leves sin daño.

De acuerdo con lo anterior la metodología planteada para poder obtener la vulnerabilidad a partir del índice de daño global es la siguiente:

Si se tiene en cuenta que la vulnerabilidad (V) es el nivel de daño D esperado que puede presentarse sobre una clase de construcción como consecuencia de la manifestación de un sismo dado con intensidad I tenemos que V es una función probabilística P de la razón D/I :

$$V = P\left(\frac{D}{I}\right) \quad (1)$$

Se puede relacionar un índice de daño para cada intensidad del movimiento con una vulnerabilidad cualitativa asociada dependiendo del estado discreto del daño. Para tal motivo se deben escoger escenarios para un sismo leve, moderado y fuerte con el fin de comparar el índice de daño global con los estados discretos del daño en cada uno de ellos. En el estudio de caso se utilizó el sismo leve como uno lejano con período de retorno de 10 años, el sismo moderado como uno intermedio con período de retorno de 100 años y el sismo fuerte como uno cercano con período de retorno de 475 años. Sin embargo, de acuerdo a las condiciones específicas de cada ciudad lo anterior puede ser replanteado. En cualquiera de los escenarios planteados la vulnerabilidad debe ser la misma y para tal efecto se debe escoger una matriz de vulnerabilidad adecuada como se verá más adelante.

Los índices de daño con que se va a entrar a la matriz deben contener tanto el daño estructural como el no estructural (dado que en la mayoría de los casos el valor de las pérdidas no estructurales superarán a las pérdidas estructurales en varios órdenes de magnitud). Para tal efecto se calcula cada índice de daño, como se describirá mas adelante y se obtiene el índice de daño total.

Aunque la relación porcentual de aporte al índice de daños total puede variar de acuerdo a las condiciones locales de cada ciudad, se estima en términos generales que dicha distribución puede ser alrededor de:

Para estructuras aporricadas:

$$IDT = 0.3 IDE + 0.7 IDNE 60^\circ \quad (2)$$

Para estructuras en madera (Bahareque), mampostería y muros portantes.

$$IDT = IDE \quad (3)$$

donde: IDT = Índice de daño total, IDE = Índice de daño estructural, IDNE = Índice de daño no estructural.

Con estos índices de daño y con sus respectivos estados discretos del daño se puede obtener una vulnerabilidad cualitativa de acuerdo con el siguiente criterio (estos criterios también pueden ser modificados en otros contextos):

Según la normativa vigente en Colombia (NSR-98, AIS 1997), se permite que para un:

- Sismo leve: Ocurren daños leves en elementos no estructurales y ninguno en elementos estructurales.
- Sismo moderado: Ocurren daños considerables en elementos no estructurales y moderados en elementos estructurales.
- Sismo fuerte: Ocurren daños totales en elementos no estructurales y considerables en elementos estructurales sin colapso de la estructura.

De acuerdo con esto se pueden establecer los rangos de vulnerabilidad de la siguiente manera:

Si una estructura en un sismo fuerte tiene daños grandes en sus elementos estructurales pero sin colapso de la estructura, su vulnerabilidad no debería ser media o alta sino baja; pero por el contrario si una edificación en un sismo leve colapsa su vulnerabilidad lógicamente sería alta.

Este criterio permite asociar a la vulnerabilidad, además de las características físicas de la estructura, las características del suelo sobre el que está cimentada, pues se ha visto que los daños en una edificación están muy relacionados con esta variable. Con este criterio se establece claramente la vulnerabilidad como un aspecto global que involucra la estructura y su entorno.

Como se había mencionado anteriormente, para poder relacionar el índice de daños con la vulnerabilidad, necesariamente se deben asociar éstos con un estado discreto del daño que especifique de una manera cualitativa el grado de deterioro de la estructura para cada índice.

Para tal efecto se hizo uso de la matriz de daño (Tabla 1) propuesta según Mena (2002) por el EERI (1996)

Tabla 1: Matriz de daño del EERI (1996)

Nivel	Índice de Daño (%)	Estado Discreto del Daño
Ninguno	0	Sin daño
Ligero	0 – 5	Daño no estructural aislado
Moderado	5 – 25	Daño considerable no estructural y daño estructural ligero
Severo	25 – 50	Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo
Total	50 – 70	Más económico demoler que reparar
Colapso	> 70	Colapso de la estructura

De acuerdo con esta caracterización del daño se construyó la siguiente matriz de vulnerabilidad (Tabla 2):

Tabla 2: Matriz de Vulnerabilidad

Vulnerabilidad	Tipo de Sismo		
	Leve	Moderado	Fuerte
Baja	0 – 5	0 – 25	0 – 50
Media	5 – 25	25 – 50	50 – 70
Alta	25 – 100	50 – 100	70 – 100

Esta matriz relaciona el índice de daño según EERI (1996), Mena (2002) con su respectiva vulnerabilidad para cada tipo de sismo de acuerdo a la filosofía planteada.

Esta matriz puede ser modificada, usando criterios locales de daño admisible.

Teniendo en cuenta que en esta matriz están incluidos tanto los elementos estructurales como los no estructurales y sabiendo que para estructuras como: bahareque (madera-bambú), mampostería simple, confinada y muros portante, todos los elementos son estructurales, los valores de la matriz en la Tabla 2 se redujeron en un 30% para este tipo de edificaciones.

PÉRDIDAS MATERIALES

Las pérdidas materiales totales se calculan como el producto del costo de los elementos estructurales por el porcentaje de pérdidas de los elementos estructurales, más el costo de los elementos no estructurales por el porcentaje de pérdidas para los elementos no estructurales. Para este cálculo se tiene en cuenta la matriz que relaciona el costo del m² de reposición con el tipo y la edad de la construcción. Esta matriz debe ser obtenida localmente según los costos y topologías estructurales. Se asocian a esta matriz variables como: Edad de la edificación, localización, uso, tipología estructural, número de pisos y otras que puedan tener una incidencia significativa en el valor del área de construcción.

De este costo una fracción es estructural y la otra corresponde a elementos no estructurales.

Pérdidas Materiales Estructurales

Las pérdidas materiales estructurales se calculan de la siguiente manera:

$$Perd\ est = m_{const}^2 * IDE * \$/m^2 * valor\ parte\ est. \quad (4)$$

donde: *Perd est* = Pérdida estructural, *m²const* = metros cuadrados construidos, *IDE* = índice de daño estructural, *\$/m²* = costo por metro cuadrado.

Pérdidas Materiales No Estructurales

Las pérdidas materiales no estructurales se calculan de la siguiente manera:

$$Perd\ N\ est = m_{const}^2 * IDNE * \$/m^2 * valor\ parte\ No\ est. \quad (5)$$

donde: *Perd N est* = Pérdida no estructural, *m²const* = metros cuadrados construidos, *IDNE* = índice de daño no estructural, *\$/m²* = costo por metro cuadrado.

OBTENCIÓN DE LOS ÍNDICES DE DAÑO:

Como se describió anteriormente para la obtención de las pérdidas (Riesgo), es necesario evaluar individualmente los

índices de daño. En tal sentido se hace necesario evaluar los desplazamientos que tendrá la estructura y compararlos con los desplazamientos límites para cada nivel de daño.

Vulnerabilidad Física

La vulnerabilidad física se describe en términos de la aceleración basal resistente última, la aceleración basal resistente elástica, la ductilidad disponible y el período fundamental de vibración de la estructura. Cada uno de estos parámetros se calcula en función del tipo de estructura que a su vez está descrito en términos de las variables generales que la caracterizan:

- Estrato socioeconómico.
- Número de pisos.
- Tipo de estructura
- Tipo de cubierta.
- Uso.
- Período de construcción.
- Calidad de la construcción.
- Configuración estructural.

Funciones de Daños

Las funciones de daños son aquellas que relacionan las sollicitaciones que actúan sobre la estructura, ya sean aceleraciones básicas o derivas de entrepiso, con las pérdidas que éstas ocasionan (Jaramillo, 1997).

Las pérdidas estructurales se consideran como las que son ocasionadas por la aceleración basal y las pérdidas no estructurales se calculan proporcionalmente a la diferencia entre la deriva impuesta por el temblor a la estructura y la deriva elástica permisible (Jaramillo, 1997).

Daños Estructurales

Se consideran los daños ocasionados por la aceleración basal. Se calcula para cada tipo de combinación de estructura las siguientes variables:

- Período (T)
- Aceleración resistente última (A_{ru})
- Aceleración resistente elástica (A_{re})
- Sollicitación (A_s) en el espectro de respuesta de aceleraciones en el sitio.

Se calcula el índice de daño estructural definido como:

$$IDE = \frac{Ddem - 1}{UMON - 1} \quad (6)$$

donde: IDE = Índice de daño estructural, $UMON$ = Ductilidad Monotónica, $Ddem$ = Ductilidad demandada que se calcula como:

$$Ddem = \frac{A_s}{A_{re}} \quad (7)$$

donde: A_s = Sollicitación en el espectro de respuesta de aceleraciones en el sitio, y A_{re} se calcula con:

$$A_{re} = \frac{A_{ru} * \left(\frac{0.8}{FMTEC + XP - 1} + 0.2 \right)}{FRTIPO} \quad (8)$$

FRTIPO: Este factor permite calcular la aceleración basal resistente elástica, A_{re} , como una fracción de la aceleración basal resistente última (A_{ru}). Para estructuras de concreto reforzado construidas bajo especificaciones sísmicas modernas, este factor es el definido en los códigos como el factor de reducción de fuerzas.

Para estructuras de bahareque y mampostería, aceptando que hay una relación cercanamente lineal entre esfuerzo y deformación angular para todo el rango de aplicación de cargas, se debe especificar un valor para FRTIPO igual a la relación entre las derivas de fisuramiento y agrietamiento, es decir, entre 2.0 y 3.0, (Campos et al., 2000). Este valor debe aplicarse para todos los periodos de la historia en la ciudad.

UMON: Variable que describe la ductilidad máxima que puede desarrollar determinado tipo estructural. En términos de índices de daño esta variable controlaría la deformación máxima para alcanzar un índice de daño de 1.0. Considerando esta última interpretación, la variable UMON debería tomar valores tan grandes como los necesarios para representar la capacidad de deformación de las estructuras mejor concebidas del grupo de estructuras que se esté analizando. No es raro pues encontrar que para reproducir los escenarios de daños de sismos reales sea necesario recurrir a valores de esta variable tan grandes como 40 o 50, no queriendo decir lo anterior que el tipo de estructuras al que corresponden estos valores pueda desarrollar ductilidades de 40 o 50 unidades. La interpretación correcta más bien sería que partiendo de una resistencia promedio para ese tipo estructural, se hace necesario utilizar valores de la variable UMON tan altos como los propuestos, para representar algunas edificaciones de ese tipo y pertenecientes a ese grupo, que tienen no sólo mejores características estructurales, sino más resistencia que el promedio. En otras palabras, la variable UMON controla la pendiente de la curva de vulnerabilidad de los diferentes tipos estructurales, teniendo a su cargo la representación de lo mejor dentro del grupo de estructuras en estudio.

Daños No Estructurales

La fracción de daños no estructurales se calcula proporcionalmente a la diferencia entre la deriva impuesta por el temblor a la estructura y la deriva elástica permisible (0.001), límite en el que comienza a fisurarse la mampostería y hasta 0.007, deriva en la que se considera pérdida total de la mampostería (Jaramillo, 1997).

$$IDNE = \frac{DSOL - DLAST}{DCOLA - DLAST} \quad (9)$$

donde: *IDNE* = Índice de daño no estructural, *DSOL* = Deriva impuesta por el temblor, *DLAST* = Deriva elástica permisible, *DCOLA* = Deriva máxima para que se presente el daño total en los elementos no estructurales.

DLAST, DCOLA: Derivas límites

Los valores de las derivas de fisuración y de agrietamiento de la mampostería, *DLAST* y *DCOLA* respectivamente, han sido bien estudiados en muchas partes del mundo, incluyendo Colombia, con resultados muy estables y bien definidos. Sin embargo, el modelo debe considerar los valores extremos, mínimos y máximos de sus variables, y no los promedios que se han obtenidos de estas investigaciones.

Por lo anterior, los valores de estas dos variables pueden establecerse dentro del siguiente rango (Campos et al., 2000).

$$0.0007 < DLAST < 0.001 \quad 0.005 < DCOLA < 0.007$$

$$Dsol = \frac{As * 981 * Te^2 * 4}{\pi^2 * 1.57 * 1.0} \frac{1}{Xp} \quad (10)$$

donde: *TE* = Período de la estructura, *As* = Aceleración solicitada, *Xp* = Número de pisos de la edificación.

Programa de Computador Percal Versión Millenium

El programa Percal Versión Millenium, versión modificada del Percal 6.0 (Jaramillo, 1997) está transformado específicamente para realizar una evaluación de vulnerabilidad y pérdidas predio a predio; posteriormente arroja datos de vulnerabilidad y pérdidas por manzana haciendo una ponderación de pesos por área de los predios que corresponden a la manzana. El programa recibe la información por medio de tres archivos: de datos generales, de datos de los predios, y el de datos de los espectros de respuesta de cada uno de los tipos de suelo. En el archivo de datos de predios se describen las características de cada edificación: Identificación, tipo de suelo en el que se encuentra, área de la base, densidad de construcción, tipo de estructura, tipo de cubierta, uso, número de pisos, edad de construcción, estrato socioeconómico, calidad de la construcción y configuración estructural. En el archivo de espectros de respuesta se

definen los espectros de cada uno de los tipos de suelo (en total cinco, aunque es posible modificarlo para más tipos) para el sismo determinado. Dichos espectros se obtienen externamente por medio de cualquier programa para cálculo de espectros de respuesta, en nuestro caso se utilizó el programa EERA-SHAKE (Bardet et al., 2000). También en este archivo se define el coeficiente de sitio de cada suelo y el tipo de sismo (leve, moderado o fuerte), con el fin de evaluar la vulnerabilidad. En el archivo de datos generales se definen los parámetros de resistencia de las edificaciones, matrices de costo, funciones de daños, factores de corrección y matrices de vulnerabilidad que indican cuantitativamente la vulnerabilidad de cada sector para un sismo determinado.

Mapa de Vulnerabilidad Indicativa.

Para el cálculo de las vulnerabilidades totales por manzanas se realizó una sumatoria de pesos por área construida como se indica a continuación:

$$\sum_{i=1}^N \frac{IDT_i * A_i}{A_T} \quad (11)$$

donde: IDT_i = Índice de daño total de cada uno de los predios correspondientes a la manzana, A_i = Área construida de cada predio, A_T = Área total construida de la manzana.

ESTUDIO DE CASO: EVALUACION DEL RIESGO SÍSMICO PARA LA ZONA CENTRO DE LA CIUDAD DE ARMENIA - COLOMBIA.

Con el fin de aplicar la metodología adaptada y desarrollada, se evaluó el riesgo sísmico par la zona central de la ciudad de Armenia (Quindío). La ciudad de Armenia, se encuentra localizada hacia el centro occidente de Colombia a unos 300 Km al sur oeste de Bogotá D.C.

Antecedentes de estudios de vulnerabilidad en la ciudad

Para los municipios del Quindío y más específicamente para Armenia se han venido recopilando estudios de amenaza sísmica y sismicidad histórica con antecedentes relativamente recientes, de aproximadamente un siglo (Espinosa, 1996), los cuales indican la ocurrencia de sismos de intensidad superior a V y llegando incluso hasta VIII en la escala de Mercalli Modificada, como el del 4 de febrero de 1930, que afectaron de manera alarmante el desarrollo de la región y la posibilidad de consolidarse como una de las más prósperas en el ámbito nacional. En el año de 1994 el Gobierno Municipal en conjunto con la Universidad del Quindío realizó el proyecto de vulnerabilidad física para la ciudad de Armenia (Alcázar et al., 1993). A raíz del evento sísmico del 25 de Enero de 1999, en el cual perecieron más de 2000 personas y se generaron pérdidas superiores a los USD 1.500 millones, se hizo evidente la reevaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones urbanas y la realización de un estudio de microzonificación, que reglamentara la construcción de edificaciones en la ciudad, como una herramienta definitiva de los organismos y entidades gubernamentales para la planificación y prevención de desastres en la ciudad de Armenia (Quindío). Posterior al sismo, la Corporación Autónoma Regional del Quindío (C.R.Q) en conjunto con la Universidad del Quindío realizaron un segundo estudio de vulnerabilidad sísmica para la ciudad de Armenia (Cano y Alzate, 2000) tomando como base la metodología PERCAL 6.0 (Jaramillo, 1997).

En el año 2001 la Corporación Autónoma Regional del Quindío junto con la Universidad EAFIT y la empresa INTEGRAL de Medellín desarrollaron el proyecto de Riesgo Sísmico para la ciudad de Armenia (INTEGRAL, EAFIT, CRQ, 2001) utilizando el programa IE-RISS (que es una versión mejorada del programa PERCAL), en el cual se simularon posibles escenarios para la ciudad realizando un estimativo de las pérdidas materiales y de vidas que podrían ocurrir en la ciudad ante un sismo determinado.

Estos dos últimos estudios tenían como objetivo principal la determinación de pérdidas materiales ante un sismo determinado y no expresaron claramente el grado de vulnerabilidad de los sectores estudiados, excepto el primer estudio sin embargo a raíz del evento sísmico de 1999 éste quedó desactualizado, pues muchas de las construcciones tuvieron que ser demolidas y otras reforzadas cambiando notablemente el escenario planteado. Además se hizo evidente que la vulnerabilidad de las edificaciones no dependía únicamente de sus características físicas, sino también del suelo sobre la cual estuviera cimentada. Por tal motivo fue necesaria la reevaluación de la vulnerabilidad de la ciudad y por ende su riesgo con una metodología que implementara los parámetros de los suelos y que permitiera un mayor grado de exactitud y un nivel de detalle mucho mas amplio que la de los estudios anteriores, como lo es un estudio predio a predio. El software PERCAL MILLENIUM modificado especialmente para el desarrollo de este trabajo, contiene la

metodología que permite la simulación de diferentes escenarios de riesgo sísmico para pequeñas o medianas áreas urbanas con un nivel de detalle predio a predio. Estos resultados pueden ser bastante útiles para las entidades encargadas de prevenir y atender los desastres en el municipio, así como para las principales autoridades políticas y civiles encargadas de velar por la seguridad y bienestar de los habitantes de la ciudad.

Modelo de Amenaza Sísmica Regional

Un modelo de Amenaza Sísmica es aquel que va a permitir evaluar de la manera más realista, la probabilidad de ocurrencia de un evento, partiendo de un parámetro de intensidad del movimiento (la aceleración fue la unidad utilizada en este caso). La metodología usada en este trabajo para determinar la aceleración máxima esperable en un sitio determinado, es la propuesta por Der Kiureghian (1975), la cual está basada en el conocido modelo de Cornell. Estos modelos han sido utilizados ampliamente en el territorio nacional y han demostrado ser un acercamiento adecuado al problema que se está manejando. Los resultados obtenidos de aplicar la metodología son las gráficas de probabilidad de excedencia Vs Aceleración máxima probable (Figura 1). En estas gráficas se estiman las aceleraciones probables para el área de estudio que puede presentar un sismo con periodo de retorno de 10 años (umbral de daños), 100 años (sismo del 25 enero de 1999) y 475 años (periodo de retorno del sismo de diseño, según la Norma Sísmica Colombiana NSR-98).



Figura 1: Aceleración máxima esperada vs. Probabilidad de excedencia.

Espectro de Respuesta de Aceleración

Después de conocer las características del sismo con una probabilidad de ocurrencia determinada de acuerdo con los parámetros obtenidos en la amenaza, se procede a obtener las señales, ya sea sintéticamente o traídas de ambientes tectónicos similares de sismos reales que concuerden adecuadamente con el estudio de amenaza sísmica, para luego ser filtradas por el suelo y obtener la respectiva respuesta en la superficie.

Sismos Característicos Acordes a la Amenaza del Sitio

Sismo de Campo Cercano

Para modelar la respuesta sísmica del suelo ante las altísimas solicitaciones sísmicas a que eventualmente se vería sometido en el caso de presentarse un sismo cercano se utilizó el registro acelerográfico del sismo del 25 de Enero de 1999 con $M_I=6.2$, registrado en la estación de la Universidad del Quindío, al cual se le realizó una deconvolución por medio del programa EERA (Bardet, 2000) para obtener la señal que posiblemente llegó al basamento rocoso. Posteriormente, por medio de Funciones Empíricas de Green (Ordaz et al., 1995) se escaló a la aceleración esperada para un sismo fuerte de acuerdo al estudio de amenaza de 0.28 g. (Figura 2)

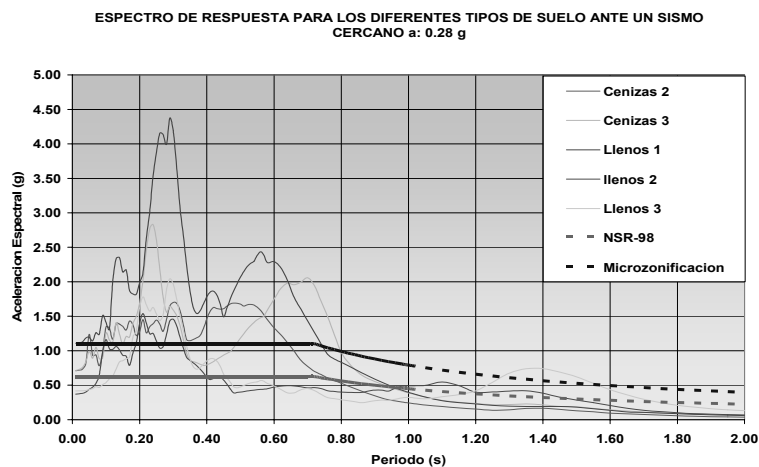
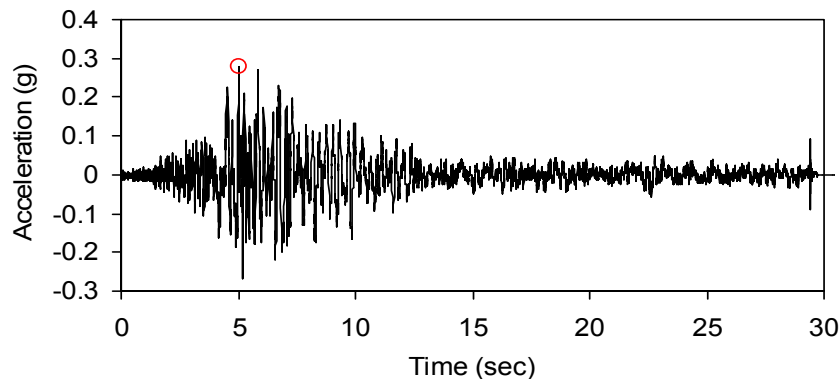


Figura 2: Señal y espectro de respuesta para cada tipo de suelo. Sismo cercano acel. máx.: 280 cm/seg².

Sismo de Campo Intermedio

Para modelar la respuesta sísmica del suelo ante las solicitaciones sísmicas a que eventualmente estará sometido en el caso de presentarse un sismo intermedio, se utilizó el registro acelerográfico del sismo del Salvador de enero del 2001 registrado en la estación Presa con una distancia epicentral de 63.1 Km., $M_I = 7.6$ y aceleración horizontal máxima en roca de 0.18 g. (Figura 3), que puede ser el sismo esperado de subducción en el eje cafetero (en roca).

Sismo de Campo Lejano

Para modelar la respuesta sísmica del suelo ante las solicitaciones sísmicas a que eventualmente estará sometido en el caso de presentarse un sismo lejano, se utilizó el registro acelerográfico del sismo del 2 septiembre de 1997, sismo catalogado como movimiento fuerte. La fuente asociada a este sismo es la de subducción con una magnitud de $M_I = 6.3$, y una distancia hipocentral de 125 Km. Se obtuvo una señal en roca en la estación de Calarcá cuya aceleración máxima registrada fue de 0.017g, la cual fue escalada a una aceleración de 0.05g (Figura 4) a partir de funciones Empíricas de Green (Ordaz et al., 1995) para simular el escenario que podría generar un sismo leve de campo lejano.

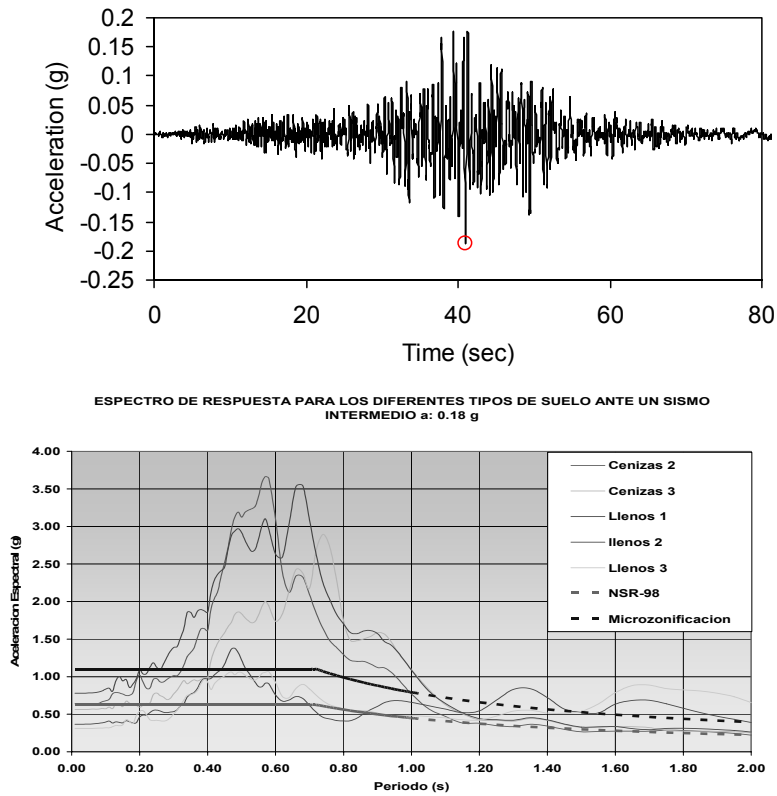


Figura 3: Señal y espectro de respuesta para cada tipo de suelo. Sismo intermedio con acel. máx. = 180 cm/seg².

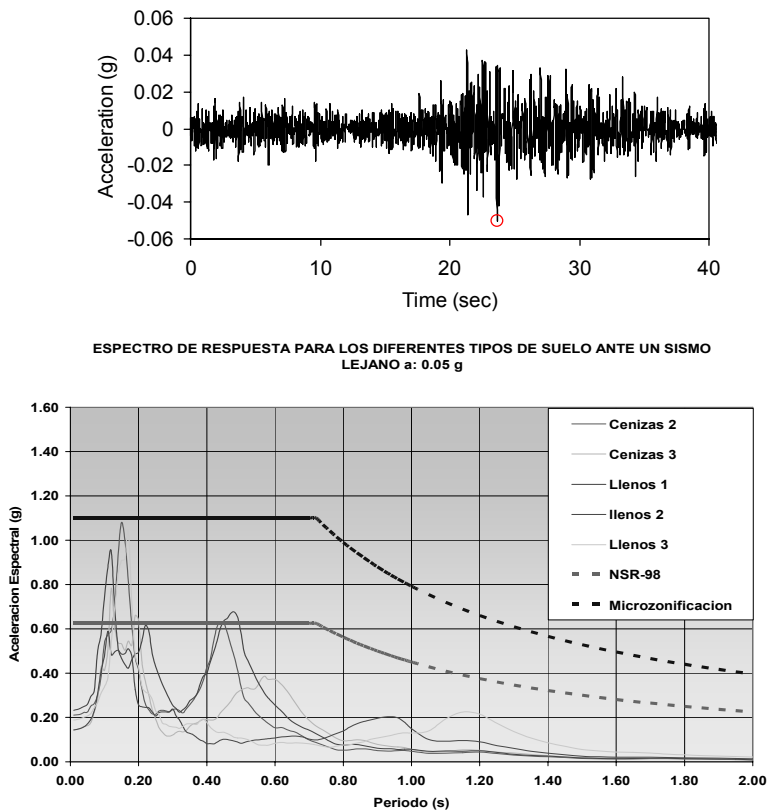


Figura 4: Señal y espectro de respuesta para cada tipo de suelo. Sismo lejano con acel. máx. = 50 cm/seg².

Evaluación de la vulnerabilidad física:

Para la evaluación de la vulnerabilidad física se recolectó en campo la información de las variables primarias descritas con anterioridad para cada una de las edificaciones que componen el sector (2525 predios). Para la recolección de la información se utilizó un formato desarrollado para tal fin.

La determinación del tipo de suelo sobre el cual está localizada cada una de las construcciones se hizo a partir del mapa de zonificación sismogeotécnica de la ciudad de Armenia (Ingeominas, 2000).

Con la información física de las edificaciones y la inclusión de la variable de tipo de suelo, se usó el programa Percal Millenium para la determinación de los índices de daño y la evaluación de la vulnerabilidad indicativa de cada uno de los predios. Un pequeño sector con los resultados típicos obtenidos se presenta en la Figura 5.

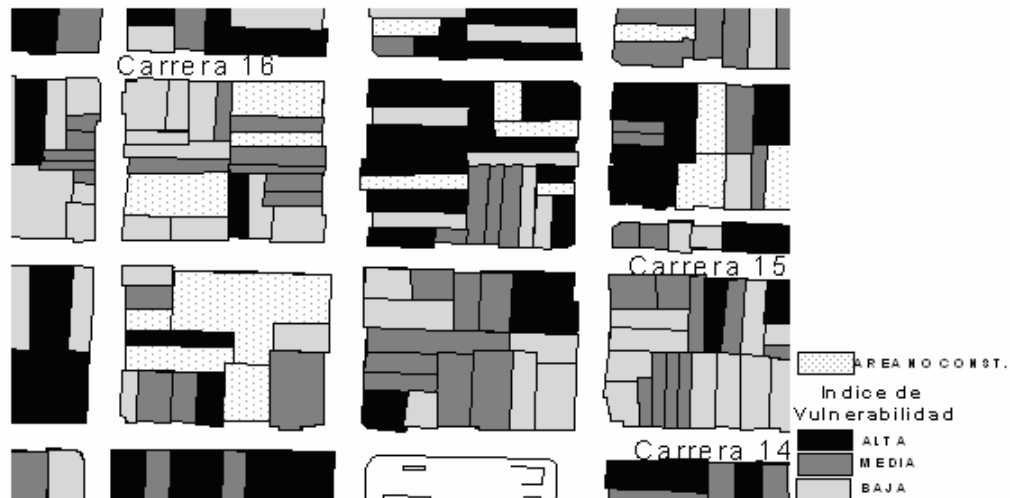


Figura 5: Vulnerabilidad indicativa por predios.

Debido a que por múltiples razones puede no ser muy conveniente presentar la información con un grado de detalle a nivel predial (edificio por edificio), los resultados de la evaluación por predios son globalizados a nivel de manzana, mediante el uso de la ponderación de acuerdo al número de metros construidos. Es muy importante aclarar, sin embargo, que la información básica se obtuvo a nivel predial (edificio por edificio) y que tanto la vulnerabilidad indicativa como la pérdida ante el sismo son obtenidas predio a predio y su presentación a nivel de manzana sólo obedece a aspectos de conveniencia. En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos para el mismo subsector mostrado en la Figura 5, pero globalizados a las manzanas de acuerdo a la ponderación por áreas descrita.

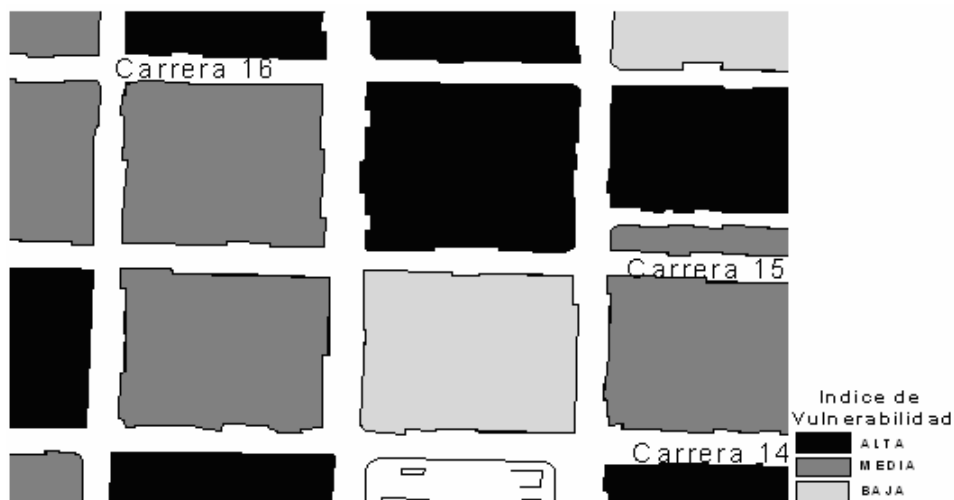


Figura 6: Obtención típica de vulnerabilidad indicativa por manzanas.

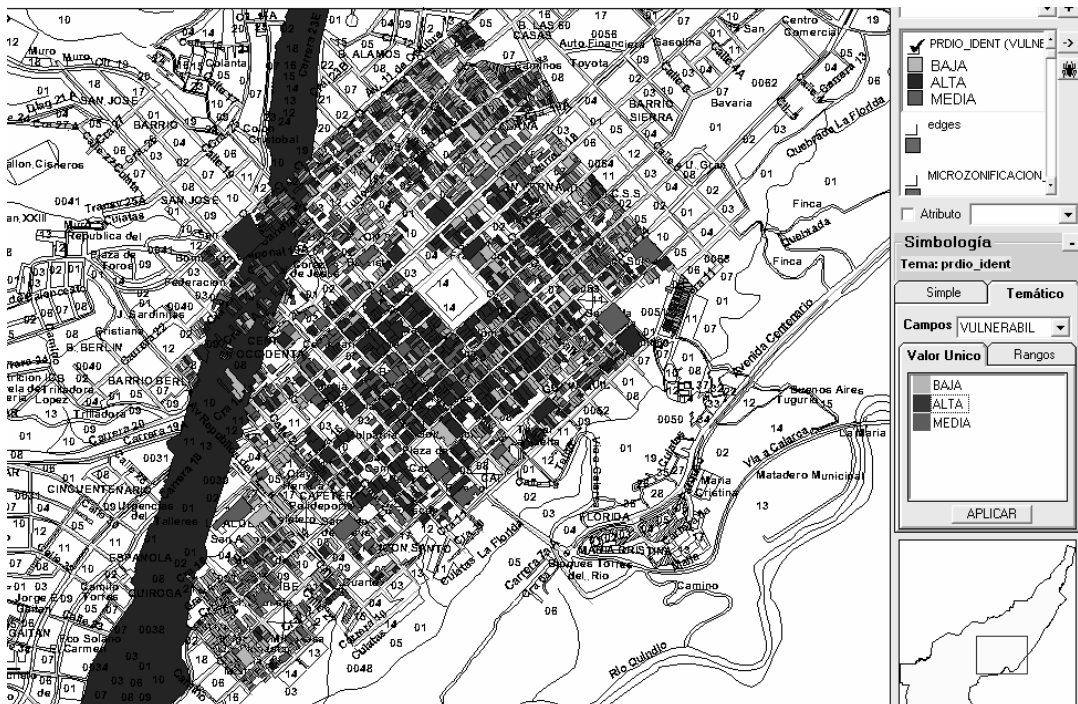
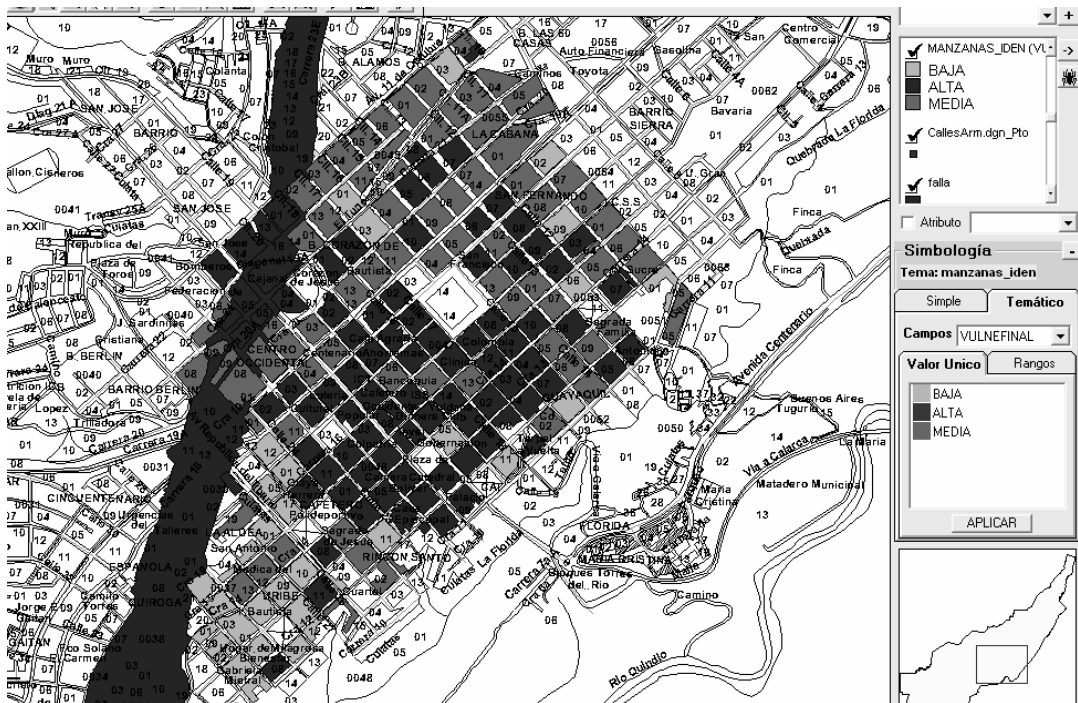


Figura 7: Mapas de vulnerabilidad indicativa por manzanas y predios (La franja oscura que atraviesa el mapa corresponde al corredor de la falla Armenia).

Con base en el número de metros cuadrados (m^2) construidos en cada predio y el nivel de vulnerabilidad evaluado en ellas, se calculó el nivel de vulnerabilidad indicativa de todas las manzanas del centro de la ciudad, obteniéndose que el 44.1% de éstas tienen un vulnerabilidad indicativa ALTA, y sólo el 17.6% presentan una vulnerabilidad BAJA.

Mapas de Riesgo

Los mapas de riesgo son el resultado final de la metodología planteada, y en ellos se resume la incidencia y el aporte tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad del escenario mismo. Estos mapas deben observarse bajo perspectivas

relativas y de comparación general, pues aportan información sobre el posible escenario de pérdidas, pero en ningún momento los resultados obtenidos son absolutos por si mismos.

Por lo tanto es muy importante tener en cuenta que los resultados obtenidos no representan de ninguna manera valores absolutos de pérdidas, sino que son tendencias y esperanzas medias de lo que eventualmente podría esperarse en el caso dado de que se genere un sismo de las características mencionadas. También vale la pena aclarar que cuando se menciona que se pierde un determinado porcentaje de área construida, se hace referencia a la pérdida global en términos de metros cuadrados o del valor de reposición y no puede interpretarse ésto como el porcentaje de edificaciones colapsadas o parcialmente colapsadas debido al sismo.

Para la cuantificación final de pérdidas económicas producto del sismo, es necesario obtener los valores estimados de reposición a nivel local. Los valores usados para este estudio de caso fueron tomados del estudio de Naranjo y Giraldo (1999) y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Valor de reposición por metro cuadrado (Valores en USD).

VALOR M² DE REPOSICIÓN A 1999 SIN LOTE (PROMEDIO) (VALORES EN USD)						
Valor Estimado por los Ing. Arturo Naranjo V. y Octavio Giraldo						
Peritos Lonja de Propiedad Raiz del Quindío						
Tipo de estructura	Uso de la edificación	N° de pisos	Edad de la edificación			
			<1959	60 - 84	85 - 98	> 98
Pórtico de Concreto	COMERCIAL	1	82	141	259	324
	Residencial	2	64	115	210	248
		3	64	115	210	248
		4	65	120	216	254
		5	65	120	216	254
		6	66	124	212	250
		7	66	124	212	250
		8	68	109	212	250
	Promedio			68	121	218
	Sótano		29	55	105	132
Mampostería Confinada	COMERCIAL	1	70	124	231	254
	Residencial	2	58	96	189	223
		3	53	96	189	223
		4	51	92	182	217
		5	49	86	182	217
	Promedio			56	99	195
	Sótano		29	57	106	123
Mampostería Simple	COMERCIAL	1	56	109	203	223
	Residencial	2	42	75	161	192
		3	42	75	161	192
		4	39	73	155	185
	Promedio			45	83	170
	Sótano		21	50	80	106
Estructura Mixta	COMERCIAL	1	50	105	193	213
	Residencial	2	37	71	150	181
		3	37	71	150	181
		4	35	69	146	177
	Promedio			40	79	160
	Sótano		21	52	80	106
Muros en Bahareque	COMERCIAL	1	37	75	139	158
	Residencial	2	15	32	77	90
		3	15	32	77	79
	Promedio			22	46	98
	Sótano		8	20	25	46

Es totalmente factible tener una estimación de las pérdidas de vidas y el número probable de heridos que se puede esperar para cada uno de los escenarios; el programa realiza estas estimaciones usando matrices de densidad ocupacional por metro cuadrado de acuerdo al uso de la edificación. En los casos en que se desea estimar el número de pérdidas de vidas (o heridos) probables debido al sismo, es muy importante también involucrar la hora del día a la que ocurre el evento, pues la densidad ocupacional de la edificación no sólo es función del uso sino que es una variable que varía significativamente con respecto a la hora (por ej., edificaciones de uso comercial, en las horas de la noche o la madrugada, bajan su densidad ocupacional).

En este estudio no se estimaron las pérdidas de vidas para los diferentes escenarios por sismo, debido a la falta de datos confiables de densidad ocupacional para el sector, lo cual lógicamente desvirtúa de hecho cualquier estimación que se haga al respecto.

Riesgo por sismo cercano

Si se llegara a presentar un sismo cercano superficial con una aceleración máxima en roca de 0.28g en una de las fallas locales (a una distancia epicentral entre 5 y 20 Km.) se podría esperar una destrucción alrededor del 70% de los metros cuadrados construidos en el centro de Armenia lo que representaría una pérdida de 110 millones de dólares y de 874780m². La distribución espacial de los daños que podrían presentarse en el centro de Armenia a raíz de un sismo cercano superficial se muestra en la Figura 8, donde se observan daños generalizados mayores del 50% en todo el sector. También en las Figuras 9 y 10 se pueden apreciar daños típicos ocurridos en el sector del centro de la ciudad durante el evento sísmico ocurrido en Armenia (Colombia) el 25 de enero de 1999.

Los mayores porcentajes de pérdidas para este sismo los presentan las estructuras aporticadas construidas en el periodo de 1960 a 1984 con entre 2 y 7 pisos de uso residencial y comercial y ubicadas en tipo de suelo llenos1 (lleno natural).

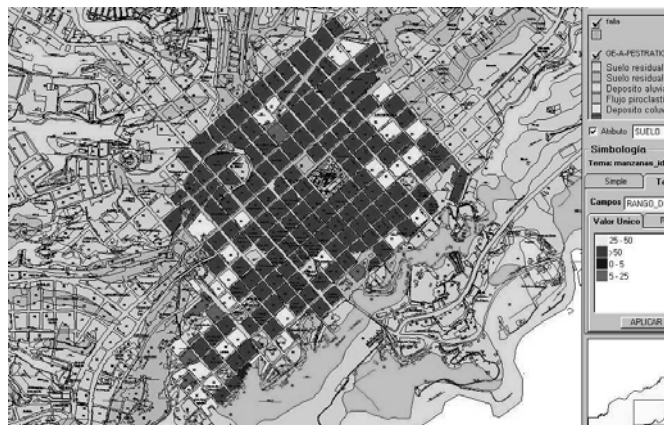


Figura 8: Índice de pérdidas producidas por un sismo cercano.



Figura 9: Colapso de edificaciones en la zona centro de la ciudad, producidas por el sismo de enero de 1999 (sismo cercano).



Figura 10: Colapso de edificaciones en zonas aledañas al centro de la ciudad, producidas por el sismo de enero de 1999 (sismo cercano).

Riesgo por sismo intermedio

En la eventualidad de la ocurrencia de un sismo como los que se presentan en la zona de subducción (más precisamente en la zona de Benioff) a profundidades entre 80 y 150 Km con una aceleración máxima en roca de 0.18g, se podría esperar una pérdida cercana al 60% en el centro de Armenia lo que representaría una pérdida de 99 millones de dólares y de 770165 m².

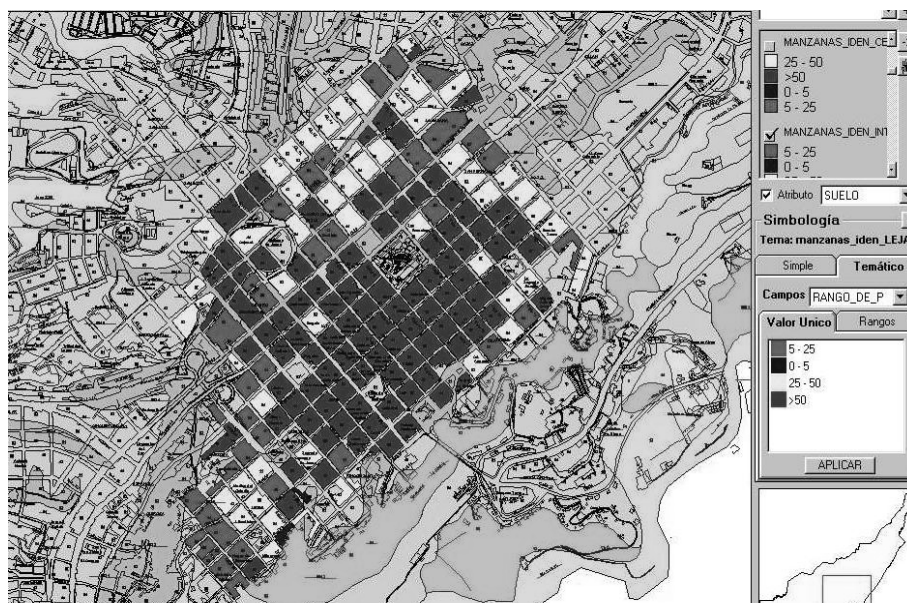


Figura 11: Índice de pérdidas producidas por un sismo intermedio.

La distribución espacial de los daños que podrían presentarse en el centro de Armenia a raíz de un sismo intermedio se muestra en la Figura 11. Se observan daños muchos mayores en el sector comprendido entre las carreras 13 y 19 y las calles 14 y 23.

Los mayores porcentajes de pérdidas para este sismo los presentan las estructuras aporricadas construidas en el periodo de 1960 a 1984 entre 5 y 7 pisos de uso residencial y comercial y ubicadas en tipo de suelo llenos1 (llenos naturales)

Riesgo por sismo lejano

Si se llegara a presentar un sismo en la zona de subducción a una distancia de 180 Km en línea recta hasta la zona de estudio, se podría esperar una pérdida cercana aproximada del 20% de los metros cuadrados en el centro de Armenia lo que representaría una pérdida de 25 millones de dólares y de 226784 m².

Los mayores porcentajes de pérdidas para este sismo los presentan las estructuras aporricadas construidas en el periodo de 1960 a 1984 con entre 2, 5 y 7 pisos de uso residencial y comercial y ubicadas en tipo de suelo llenos1 (llenos naturales).

La distribución espacial de los daños que podrían presentarse en el centro de Armenia a raíz de un sismo lejano se muestra en la Figura 12. Se observa allí que las pérdidas no son muy significativas.

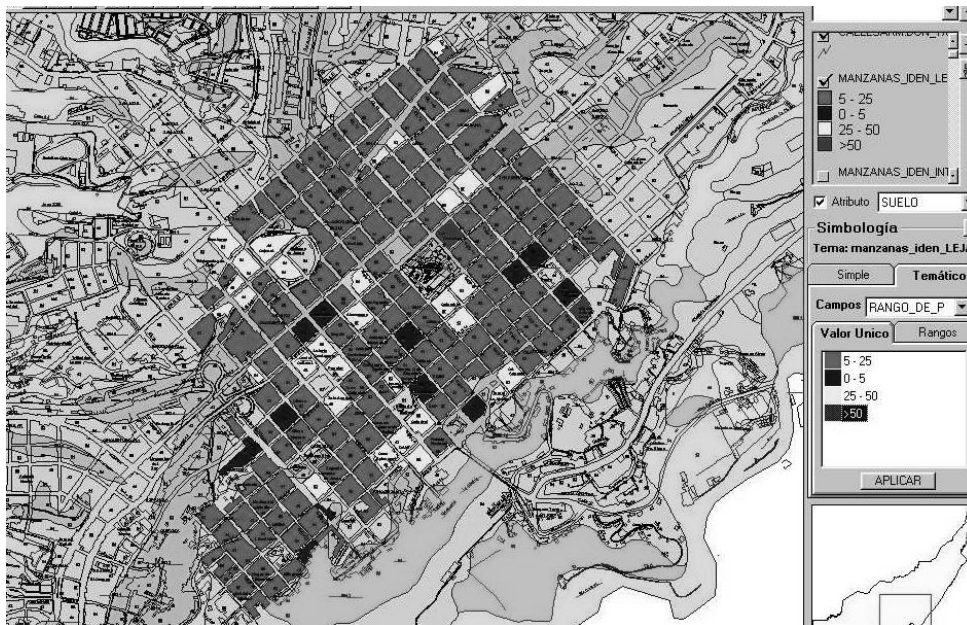


Figura 12: Índice de pérdidas producidas por un sismo lejano.

Conclusiones

La metodología planteada para el cálculo de vulnerabilidad de edificaciones tiene aplicación directa en la evaluación de los posibles escenarios de pérdidas de pequeños y medianos escenarios urbanos, con una baja inversión de costos en el proyecto, convirtiéndose en una herramienta muy útil para las entidades de defensa civil en los proyectos de mitigación del riesgo sísmico urbano.

La vulnerabilidad de una edificación no depende únicamente de sus características físicas sino que también, como se pudo observar en este estudio, está fuertemente influenciada por el tipo de suelo sobre el cual está cimentada.

Específicamente, para el caso la ciudad de Armenia las estructuras más afectadas en el caso de presentarse cualquiera de los cuatro sismos estudiados serían los pórticos de concreto de 2, 5 y 7 pisos construidos en el periodo entre 1960 y 1984 y ubicados sobre el perfil de suelos llenos1.

La zona más vulnerable y por consiguiente la que presenta mayor riesgo, es el sector ubicado sobre el perfil de suelo denominado llenos1 (llenos naturales), ya que este suelo presenta grandes amplificaciones a las aceleraciones sísmicas.

Es muy importante para la administración del riesgo mantener los inventarios de edificaciones y de sus usos y mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de los suelos y las estructuras.

Agradecimientos

Se expresan sinceros agradecimientos al Comité Local de Atención de Desastres CLOPAD-Alcaldía de Armenia, por la financiación parcial del proyecto, y de igual manera a la Universidad del Quindío por la cofinanciación del mismo.

Igualmente se agradece la colaboración de la Sociedad de Ingenieros del Quindío a través del Ing. Guillermo J. Arcila por el apoyo y la información suministrada.

Fotografías: Ing. Jorge Ivan Carmona (SIQ).

Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, (1997). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98*, Ley 400 de 1997. Bogotá D.C., Colombia.
- Alcázar, E. F., Henao, N. y Ruiz, R. E. (1993). “Evaluación del Escenario de Pérdidas en Caso de Terremoto para la Ciudad de Armenia”. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Quindío, Colombia.
- Barbat, A. H., Yépez, M. F. y Canas, J. (1996). “Damage Scenarios Simulation for Seismic Risk Assessment in Urban Zones”, *Earthquake Spectra*, Vol. 12, No. 3, pp. 371-394.
- Bardet, J. P., Ichii, K. y Lin, C. H. (2000). “EERA (SHAKE) A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits”. Department of Civil Engineering. University of Southern California, Los Angeles.
- Campos, A. et al. (2000). “Proyecto para la Mitigación del Riesgo Sísmico para Pereira, Dosquebradas Santa Rosa de Cabal”. CARDER. Pereira, Colombia.
- Cano, L. y Alzate, O. (2000). *Proyecto de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica del Municipio de Armenia, Método PERCAL Versión 6.0*. Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (CEIFI), Universidad del Quindío, CRQ.
- CRQ, SIQ. (2004). *Patrones de Daño y Pérdidas para el Sismo del 25 de Enero de 1999..*
- Der Kiureghian, A. y Ang H-S, A. (1975). “A line source model for seismic risk analysis”. University of Illinois at Urbana-Champaign, Civil Engineering Department.
- Espinosa, A. (1996). *Sismicidad histórica del área Pereira-Dos Quebradas-Santa Rosa de Cabal*. Informe final sismicidad histórica, Proyecto de Mitigación de Riesgo Sísmico de Pereira - Dos Quebradas y Santa Rosa de Cabal. CARDER.
- Ingeominas (2000). *Zonificación Sísmogeotécnica de la Ciudad de Armenia, Quindío, Colombia*. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá D.C., Colombia.
- INTEGRAL, EAFIT, CRQ (2001). “*Riesgo Sísmico para la Ciudad de Armenia*”.
- Jaramillo, J. D. (1997). “*PERCAL ver. 6 Programa para el cálculo de pérdidas por Sismo*”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia.
- Mena, U. (2002). “*Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas*”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Naranjo, A. y Giraldo O. (1999). “Valores de Reposición de Construcción para Armenia – 1999”. Lonja de Propiedad Raíz del Quindío. Quindío, Colombia.
- Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, S. (1995). “A Scheme of Random Summation of an Empirical Green’s Function to Estimate Ground Motions from Future Large Earthquakes”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 6, pp. 1635-1647.