

EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DEL FONDO HABITACIONAL DE LAS CIUDADES GUARENAS Y GUATIRE

GRISEL MOREJÓN¹, OSCAR ANDRÉS LÓPEZ², YELENA BERENGUER¹, KENIA LEYVA¹, MADELÍN VILLALÓN¹, JOSÉ GREGORIO RENGEL³, O'LEARY GONZÁLEZ¹, LEONARDO ÁLVAREZ¹, MICHAEL SCHMITZ³

¹ Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas CENAIS. grisel@cenais.cu

² IMME- FI- UCV. Asesor de FUNVISIS. oalsf@yahoo.com

³ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. FUNVISIS. mschmitz@funvisis.gob.ve

Recibido: octubre 2013

Recibido en forma final revisado: marzo 2014

RESUMEN

Las ciudades Guarenas y Guatire constituyen la principal zona de expansión de población del área Metropolitana de Caracas y están expuestas a la posible ocurrencia de un sismo de moderada a gran intensidad, por ello evaluar la respuesta sísmica estructural del fondo habitacional de estas ciudades ante estos constituye un objetivo de gran importancia para su población y autoridades. El resultado de este trabajo permitió, utilizando la información estructural existente, determinar la vulnerabilidad y estimar las pérdidas materiales de las tipologías constructivas existentes y estimar las pérdidas humanas, además de proponer medidas generales de reforzamiento estructural, para continuar de manera sostenible el desarrollo urbanístico de estas ciudades. Entre sus resultados más notables se destacan que solo el 40% de la población de ambos municipios vive en edificaciones formales, más del 50% de estas edificaciones formales y el total de las edificaciones no formales de ambas ciudades se evalúan como de una vulnerabilidad alta. Toda esta información aparece cartografiada en un SIG para su uso por parte de las autoridades.

Palabras clave: Vulnerabilidad, Riesgo sísmico, Índice de priorización, Daños estructurales, Pérdidas humanas.

SEISMIC RISK ASSESSMENT OF THE HOUSING BUILDINGS OF THE CITIES GUARENAS AND GUATIRE

ABSTRACT

The Guarenas and Guatire cities are the main development area of the metropolitan region of Caracas, and are exposed to the possible occurrence of an earthquake of moderate to high intensity. For this reason, the evaluation of the structural seismic response of buildings housing in these cities plays an important role in the sustainable development. According to the existing structural information, the result of this work allowed assessing the vulnerability and estimating the material losses of the existing building typologies as well as the human losses. Additionally, it proposes guidelines of structural reinforcement, for the sustainable urban development in these cities. Among the most notable results are that only 40% of the population of both municipalities live in formal buildings, more than 50% of these formal buildings and the total of the non-formal structures of both cities are evaluated as high vulnerable. All this information is mapped into a GIS for use by the authorities.

Keywords: Vulnerability, Seismic risk, Prioritization index, Structural damage, Causalities.

INTRODUCCIÓN

Guatire conforma, conjuntamente con Guarenas, una región con una superficie ocupada de unas 6073 hectáreas y alberga en la actualidad unos 397000 habitantes (INE, 2013), se encuentran a 25 kilómetros al este de la ciudad de Caracas y constituyen ciudades de primera jerarquía a nivel subregional. Esta región viene a ser la principal zona de expansión de población y actividades económicas del Área

Metropolitana de Caracas por lo que posee un alto ritmo de crecimiento.

La zona que ocupa las ciudades Guarenas y Guatire ha sido afectada, en mayor o menor grado, por los efectos de cuatro terremotos: uno en el siglo XVIII (1766), dos en el siglo XIX (1812 y 1900) y uno en el siglo XX (1967). De estos eventos, el sismo del 29 de octubre de 1900 ha sido el más destructor con 27 muertos y 93 heridos en Guatire, y más

de 300 casas afectadas; mientras que en Guarenas hubo 9 muertos, 117 heridos y más de 500 casas afectadas (Leal *et al.* 2012).

El norte de Venezuela está caracterizada por una moderada a elevada amenaza sísmica (Molnar & Sykes, 1969), la tectónica activa de Venezuela está relacionada con la interacción entre las placas Caribe, Suramérica y Nazca e igualmente con otros bloques continentales de menores dimensiones entrampados entre las placas antes indicadas (Audemard *et al.* 2000). La sismicidad está asociada con las principales fallas de la región (San Sebastián, El Ávila y la falla Sur Guarenas), confinada en general a los primeros 20 kilómetros de profundidad. Para la evaluación de la amenaza sísmica se realizó una evaluación neotectónica de estas fallas cercanas a la cuenca de Guarenas-Guatire (Audemard *et al.* 2000).

Debido al desarrollo urbanístico acelerado que han tenido estas ciudades en los últimos años, la respuesta sísmica estructural de las diferentes tipologías constructivas presentes en el fondo habitacional no ha sido puesta a prueba ante la ocurrencia de sismos de moderada a gran magnitud. Razón por la cual resulta imprescindible realizar estudios de vulnerabilidad para determinar la capacidad real y el riesgo sísmico de las mismas, con el propósito de elaborar un conjunto de ordenanzas municipales complementarias a la Norma COVENIN (2001) sobre la base de la planificación, reordenamiento urbano y gestión local de riesgo.

El estudio del fondo habitacional de estas ciudades requiere de un conocimiento de las características constructivas, materiales y normas de diseño de las diferentes tipologías constructivas existentes para posteriormente analizar su comportamiento ante sismos. Las construcciones que se encuentran en las ciudades objeto de estudio presentan características estructurales y arquitectónicas, técnicas constructivas, materiales y edades diversas en dependencia del período en que fueron construidas. Este fondo habitacional está dividido en tres grandes grupos: casco histórico, urbanizaciones y barrios, todos con características diversas que se exponen a continuación.

Casco Histórico: Predominan las edificaciones tradicionales en las cuales, se encuentran diversas tipologías constructivas, que van desde el período colonial caracterizado por construcciones simples de bloques de adobe, bahareque y techos de tejas y cañas, edificaciones de cuje, mampostería y madera hasta edificios de pórticos de concreto armado de varios niveles.

Se observa que se han perdido gran parte de las edificaciones

coloniales y republicanas con el desarrollo urbanístico de los últimos años. Dentro de Guatire se encuentra Araira, la capital de la parroquia Bolívar, la cual se encuentra a 45 kilómetros al este de Caracas y fue fundada a fines del siglo XIX, cuenta con 36000 habitantes (INE, 2013), y presenta características constructivas similares al Casco Histórico de Guatire.

Urbanizaciones: Comenzaron a construirse desde principios de la década del 80 hasta la actualidad, por lo que en su diseño se utilizaron las normas vigentes en cada época. Básicamente predominan las edificaciones de concreto armado de diferentes alturas, existiendo, aunque en menor grado, edificaciones de pórticos de acero y de mampostería confinada o sin confinar.

Barrios: Las edificaciones que se encuentran en estas zonas son construidas con medios propios por personas por lo general de bajos ingresos, por tanto presentan variedad de materiales estructurales y mala calidad de construcción; se caracterizan por ser edificaciones de mampostería sin reforzar o de pórticos de concreto armado mal detalladas, de varios niveles (Guasch *et al.* 2011).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de las edificaciones del fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire, fue necesario elaborar una metodología, apoyada en diferentes procedimientos de cálculo, según la información estructural disponible, la tipología estructural utilizada y el nivel de diseño de la edificación. Una descripción de la metodología se presenta a continuación.

1. Estudios de campo

Con el objetivo de obtener los datos necesarios para la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico del fondo habitacional se realizaron un conjunto de tareas que se detallan a continuación.

- **Inspecciones técnicas:** realizadas al fondo habitacional de cada una de las ciudades con el objetivo de clasificar y seleccionar las estructuras representativas y hacer una evaluación cualitativa de las tipologías estructurales presentes en el área de estudio. Las inspecciones se hicieron con ayuda de la “Planilla de Inspección de Edificaciones” (López *et al.* 2011), en las cuales se vaciaron los resultados de cada inspección realizada.
- **Búsqueda de documentación técnica de proyecto:** se realizaron búsquedas en los departamentos de

Ingeniería Municipal de cada municipio, con el objetivo de compilar los proyectos estructurales de las edificaciones representativas en la región para su posterior modelación estructural.

- Levantamientos: se realizaron con el fin de verificar la veracidad de la información de proyecto así como las posibles modificaciones realizadas al proyecto técnico por los usuarios de las edificaciones. Igualmente, se ejecutaron para levantar información para los casos para los cuales no se disponía de información del proyecto.

2. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural

Para el caso de las edificaciones formales (edificaciones que se encuentran en las urbanizaciones) se seleccionaron dos métodos de análisis para la determinación de la vulnerabilidad estructural en dependencia de la información existente.

a) Edificios con información estructural suficiente (que representan el 59,4% del total de las edificaciones): Se conformaron modelos de análisis tridimensionales en dependencia de los elementos resistentes de cada uno de los sistemas modelados con ayuda del programa SAP2000 (CSI, 2009), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Las cargas gravitatorias transmitidas por los sistemas de piso fueron modeladas como cargas uniformemente distribuidas sobre las vigas, se incorporaron las cargas permanentes que incluye, en el caso de entrepiso, el peso de las losas, la terminación de piso, los elementos divisorios y, en el caso de la cubierta, los impermeabilizantes y la solución de cubierta. Además se consideró la carga variable, teniendo en cuenta el uso del local. La masa de cada piso se generó teniendo en cuenta el peso de todos los elementos modelados así como la masa generada por el 100% de la carga permanente y el 25% de la carga variable.

Se considera que las dos componentes horizontales del movimiento sísmico están definidas por el mismo espectro. Los efectos de las dos componentes sísmicas horizontales se combinan según el criterio de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados dado en la sección 8.6 de la norma COVENIN 1756 (2001). Los efectos de la componente sísmica vertical se toman en cuenta según lo estipulado en la sección 8.6 de la norma COVENIN 1756 (2001).

Se modelaron las uniones de las estructuras de concreto armado con un 50% de longitud de brazo rígido en los extremos de vigas y columnas. Como hipótesis

simplificadora se asumió un empotramiento perfecto de las columnas en el nivel del terreno de fundación.

La determinación de las cargas sísmicas se realizó mediante un análisis dinámico - espacial de la estructura, se consideraron todos los modos representativos (traslacionales y de torsión). El método de cálculo utilizado fue el análisis modal con espectro de respuesta, utilizando como fórmula de superposición modal la CQC (Combinación Cuadrática Completa), resolviendo el problema de los valores propios por el método de los vectores Ritz (CSI, 2009).

Aún cuando las normas nacionales (FONDONORMA 1753 (2006)) especifican el uso de las secciones gruesas de los elementos estructurales, se considera conveniente incorporar factores de reducción de la rigidez de los mismos en el análisis estructural a fin de tomar en cuenta el agrietamiento que sufren durante la respuesta a los sismos especificados en la norma, tal como lo prescriben las normas modernas. En la Tabla 1 se muestran los valores utilizados en el análisis de los edificios.

Tabla 1. Factores para multiplicar las propiedades de la sección gruesa

	Vigas	0,35
Flexión (inercia)	Columnas	0,70
	Muros	0,50
Corte (área)		0,40*
Fuerza Axial (área)		1,00*

*Utilizar el mismo factor multiplicador para todos los elementos

Para establecer los valores límites de deriva normalizada la norma sismorresistente nacional (COVENIN, 2001) (Artículo 10.2) establece un valor de 0,018 (18 0/00) para edificios de apartamentos de ocupación menor a 3000 personas (Grupo B2) con elementos no-estructurales susceptibles de sufrir daño por deformaciones de la estructura. Estas limitaciones normativas están dirigidas a estructuras que satisfagan los criterios estipulados en las normas asociadas para el diseño (FONDONORMA 1753 (2006)). En el caso de estructuras existentes construidas con normas más antiguas y con procedimientos y detallados de elementos menos exigentes a los estipulados en las normas modernas, se fijaron límites de deriva acordes con la capacidad de deformación de dichas construcciones. En vista de que la norma venezolana no establece límites de deriva de construcciones hechas con normas antiguas, se utilizó como referencia la experiencia internacional (FEMA, 2003) y sobre esta base se tomaron los valores de la Tabla 2 como deriva normalizada admisible para edificios de cualquier altura, considerando tres etapas constructivas

asociadas con los cambios de norma sísmica que ocurrieron en el país en 1967 y en 1998.

Tabla 2. Valores límites utilizados de Deriva Normalizada (0/00)

Tipo	Año de construcción		
	Antes 1967	1967-1998	Después 1998
PCA	8	13	18
PCARP	7	11	15
MCA	7	11	15

PCA: Estructura de pórticos concreto armado

PCARP: Estructura de pórticos concreto armado llenos con paredes

MCA: Estructura de muros concreto armado

Se revisaron los elementos comprometidos con la respuesta de la estructura ante las acciones sísmicas. Para la evaluación de la capacidad portante de estos elementos, se construyeron los diagramas de interacción para cada una de las secciones, que abarcaron todos los dominios de la flexocompresión y de la flexotracción. Luego se determinó el momento (M) y la carga específica (N) en cada elemento para cada estado de carga y se agregaron dichos puntos sobre el gráfico del diagrama de interacción, para los efectos de determinar los cocientes entre la demanda y la capacidad.

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica estructural se tomaron las siguientes consideraciones:

- Vulnerabilidad BAJA: edificaciones que cumplen los criterios de resistencia y los valores de deriva admisible.
- Vulnerabilidad MEDIA: edificaciones que cumplen los criterios de resistencia y que no cumplen con las derivas admisibles en al menos un nivel, siendo la excedencia no mayor a un 50%.
- Vulnerabilidad ALTA: edificaciones en las cuales no se cumplen los requisitos de resistencia y las que excedan la deriva admisible en más de 50%.

b) Edificios sin información estructural suficiente (que representan el 40,6% del total de las edificaciones): en aquellas edificaciones en las que no fue posible obtener planos estructurales, se utilizó la metodología descrita en “Índices de Priorización de Edificios para la Gestión del Riesgo Sísmico”, realizada por López *et al.* (2011). Este procedimiento se basa en inspecciones de corta duración que permiten determinar índices de priorización y seleccionar las edificaciones más críticas para estudios detallados. La metodología es aplicable tanto a edificaciones formales, diseñadas y construidas atendiendo a las normas técnicas nacionales, como a edificaciones populares

construidas sin el cumplimiento de tales normativas (López *et al.* 2011).

El procedimiento propuesto se acompaña con una planilla de inspección especialmente diseñada para la recolección de datos sobre las características sismorresistente de una edificación, de un instructivo para su aplicación y de recomendaciones para la digitalización y procesamiento de la información (López *et al.* 2011). Para el cálculo del Índice de Priorización de Edificios se consideran los siguientes aspectos: amenaza sísmica del sitio, uso de la edificación, importancia y fecha de la construcción, características de la estructura, altura de la edificación, grado de deterioro y topografía del sitio.

El Índice de Priorización (IP) se calcula según la ecuación (1), donde: IA es el índice de amenaza, IV el de vulnerabilidad e II el índice de importancia.

$$IP = I_A I_V I_I \quad (1)$$

Para estimar la vulnerabilidad en estas edificaciones se utilizaron los siguientes rangos del índice de vulnerabilidad (IV):

- Vulnerabilidad BAJA: edificaciones con $IV \leq 30$.
- Vulnerabilidad MEDIA: edificaciones con $30 < IV < 45$.
- Vulnerabilidad ALTA: edificaciones con $IV \geq 45$.

c) Edificaciones populares (viviendas que se encuentran en los barrios): en este caso también se utilizó la metodología de los índices de priorización descrita previamente (López *et al.* 2011). Este procedimiento permitió conocer, al igual que en el caso anterior, cuáles edificaciones resultaban más vulnerables mediante la obtención del índice de vulnerabilidad. Se compararon estos valores con los resultantes para edificaciones afectadas por sismos pasados.

3. Evaluación del riesgo sísmico estructural

El concepto de riesgo está relacionado con las pérdidas humanas y monetarias. El riesgo depende de la densidad de población, del desarrollo económico, del grado de preparación que se tenga ante un sismo pero, sobre todo, de la peligrosidad de la zona y de la vulnerabilidad de los bienes expuestos (Cardona & Barbat, 2000; Carreño *et al.* 2006). La metodología seguida para la estimación de las pérdidas se presenta a continuación.

a) Para edificios con información estructural suficiente se construye la curva de capacidad resistente mediante un análisis estático no lineal. Esta curva representa

el desplazamiento lateral de un punto en el tope de la edificación como una función de la fuerza lateral aplicada en la estructura y reducida al cortante basal.

El comportamiento de los elementos estructurales luego de la cedencia, se incorpora al modelo mediante patrones de articulaciones plásticas de forma tal que se tomen en cuenta las características principales del comportamiento no lineal de las secciones transversales de los elementos. Se definieron articulaciones plásticas del tipo P-M-M (articulaciones que toma en cuenta la flexión compuesta analizando momento y diagrama de interacción Momento – Fuerza axial) para considerar la flexo - compresión en los extremos de las columnas y del tipo V-V (articulación que considera el cortante). En las vigas se consideraron articulaciones para los efectos de flexión del tipo M3 (articulación que considera el momento alrededor del eje 3).

La respuesta no lineal de elementos estructurales de concreto armado bajo las acciones sísmicas, es compleja e incluye incertidumbres; la mayor de ellas está relacionada con los modelos de los materiales utilizados. Para definir las propiedades de las articulaciones plásticas en el análisis estático no lineal, se requiere la construcción de los diagramas momento – curvatura para cada uno de los elementos modelados, siendo imprescindible esta relación para encontrar la rigidez de cada una de las ramas del diagrama histerético que se utiliza para definir la no linealidad del material. Este diagrama es función de los modelos constitutivos que se utilizan para determinar la relación esfuerzo – deformación del concreto y del acero, por tanto para este estudio se utilizó el modelo de concreto confinado de Mander *et al.* (1988) que contempla el incremento de resistencia y ductilidad por el confinamiento del refuerzo transversal y un modelo de acero que contempla endurecimiento post-cedencia, obteniéndose valores más altos de ductilidad por curvatura que son más cercanos a la realidad.

Para obtener el espectro de capacidad de una estructura, se necesita transformar (punto a punto) la curva de capacidad a coordenadas espectrales. El espectro de capacidad es la representación de la curva de capacidad en un espacio de coordenadas espectrales conocido como ADRS (aceleración – desplazamiento – espectro de respuesta).

Una vez obtenida la curva de capacidad en ordenadas espectrales “Espectro de Capacidad” (desplazamientopectral vs. aceleración espectral) considerando tres casos de cargas: gravitatorias sobre la estructura, carga horizontal en la dirección del eje X y carga horizontal en

la dirección del eje Y, se puede obtener una representación bilineal, siguiendo los criterios de la FEMA-253 (1996). Este diagrama está definido por el punto de cedencia y el punto último. El punto de cedencia representa el desplazamiento en el que la respuesta del edificio empieza a ser fundamentalmente no lineal y viene definido por (S_{dy} , S_{ay}). El punto de capacidad última representa el desplazamiento en el que el sistema estructural global ha alcanzado el mecanismo de colapso, definido por (S_{du} , S_{au}). El diagrama bilineal se determina mediante un método de balance de energía (método de los trapecios).

Este análisis finaliza cuando se alcanza el desplazamiento máximo (S_{du}). El cociente entre este desplazamiento último y el desplazamiento de cedencia (S_{dy}) representa la ductilidad global de la estructura, como una primera aproximación. El valor de la ductilidad obtenida del análisis numérico se acotó como se muestra en la Ecuación 2, con el propósito de resolver inconsistencias numéricas y tomando en cuenta la experiencia nacional, siendo μ la ductilidad obtenida del modelo y $\mu_{teórica}$ la ductilidad de control:

$$0,75\mu_{teórica} \leq \mu \leq 1,3\mu_{teórica} \quad (2)$$

En la Tabla 3 se presentan los valores que multiplican los valores de Say y Sau para tomar en cuenta el efecto de las paredes de relleno sobre la resistencia.

Tabla 3. Factor multiplicador para considerar el efecto de las paredes

Altura de la edificación	Factor multiplicador
Altos (15-21 niveles)	1,25
Medios (6-14 niveles)	1,50
Bajos (3-5 niveles)	2,00

El espectro de demanda es la representación de la acción sísmica y se basa en el espectro de diseño de la zona de estudio, reducido en este trabajo por la capacidad dúctil de la estructura definida como $\mu=0,8R$. Para reducir el espectro de diseño se utilizaron las ecuaciones propuestas en Hernández *et al.* (2011).

El punto clave de la estimación del daño esperado en un edificio sometido a una acción sísmica es la intersección entre el espectro de capacidad y el de demanda. Este punto es conocido como punto de desempeño (PD) y representa el máximo desplazamiento estructural esperado para el terremoto de demanda.

En este estudio se redujo el espectro por ductilidad (μ). Este método tiene un amplio uso para el caso de edificaciones existentes, las cuales frecuentemente no

han sido construidas para resistencia sostenida a través de muchos ciclos de respuesta dentro del rango inelástico (Fajfar, 2000). Este proceso es iterativo, comenzando con el espectro de demanda elástico ($\mu = 1$), posteriormente se va reduciendo el espectro de demanda y se busca la intersección con el espectro de capacidad, el punto de desempeño de la estructura se obtiene cuando $\mu \approx \mu_o$.

b) Edificios sin información estructural suficiente: para la realización del análisis estático no lineal se usaron parámetros estructurales obtenidos del levantamiento realizado y la experiencia internacional, obteniéndose una curva de capacidad por métodos aproximados (Coronel & López, 2013). A continuación se muestran las principales ecuaciones para la obtención del diagrama bilineal (Ecuaciones 3-6).

$$\frac{V_y}{W} = \Omega_y C_s f_w \quad (3)$$

$$U_y = \frac{\alpha_1}{\beta_1} \frac{V_y}{W} g \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{V_u}{W} = \Omega_u \frac{V_y}{W} \quad (5)$$

$$U_u = \lambda \mu U_y \quad (6)$$

donde:

V_y, V_u : Fuerzas de diseño asociadas con la cedencia y la resistencia última respectivamente.

U_y, U_u : Desplazamientos topes asociados con la cedencia y la resistencia última respectivamente.

W : Peso de la edificación.

Ω_y, Ω_u : Factor de sobre resistencia que escala la fuerza de diseño a la fuerza asociada con la cedencia y la resistencia última respectivamente, adoptados con ayuda de FEMA 2003 (Tabla 4).

C_s : Coeficiente sísmico según norma de diseño.

f_w : Factor de corrección del peso (Tabla 5).

α_1 : Factor de participación del modo fundamental.

T_e : Período efectivo de la estructura, se consideró un incremento del 30% para edificios construidos antes de 1982.

β_1 : Fracción de la masa participativa del modo fundamental.

g : Aceleración de la gravedad.

λ : Coeficiente que permite llevar el desplazamiento hasta el estado último o de daño completo (Tabla 6).

μ : Factor de capacidad dúctil global (Tabla 6).

Tabla 4. Factores de sobre resistencia

Antes 1967		1967-1982		Después 1982	
Ω_y	Ω_u	Ω_y	Ω_u	Ω_y	Ω_u
1,75	1,50	1,90	1,50	2,10	1,50

Tabla 5. Factores de corrección del peso para cada norma venezolana

Norma	1939	1947	1955	1967	1982	Después 1998
f_w	1,18	1,00	0,82	0,91	0,91	1,00

Tabla 6. Valores de μ y λ (tomados de FEMA 1999 y adaptados por los autores)

Tipo	Valores de μ según año de construcción				λ
	Antes 1967	1967-1982	1982-1998	Después de 1998	
PCARP	1,5	2,5	3,0	3,5	2,25
MCA	1,5	1,5	3,0	3,5 (ND3)	2,50
Mixto	1,5	1,5	1,5	1,5	2,00

El diseño para determinados niveles de desempeño requiere de la conexión entre los determinados límites estructurales y su probabilidad de ocurrencia; una de las formas más utilizadas para representar el funcionamiento de las estructuras son las curvas de fragilidad. Las construcciones de estas curvas requieren de un entendimiento completo de los mecanismos de respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de la demanda sísmica. Son funciones logarítmicas que representan la probabilidad de alcanzar o exceder estados de daños. Estas curvas pueden ser obtenidas a partir de observaciones después de ocurrido un sismo o mediante métodos matemáticos (FEMA, 1999).

En este estudio se obtienen a partir de un análisis numérico, debido a la ausencia de observaciones posteriores a la ocurrencia de un sismo. Para construir estas curvas es necesario definir medidas objetivas que indiquen cuándo el daño de una estructura pasa de un estado a otro. Estas medidas son conocidas como umbrales de daños.

En este método, cada curva está caracterizada por los valores medios y de desviación estándar logarítmica normal (β) de la demanda sísmica del suelo. Para daños estructurales, dado el desplazamiento espectral S_d , la probabilidad de alcanzar o exceder el estado de daño (ds) se muestra en la Ecuación 7.

$$P\left[\frac{ds}{S_d}\right] = \phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_d}{S_{d,ds}}\right)\right] \quad (7)$$

donde:

$S_{d,ds}$: Valor medio de desplazamiento espectral para el cual la edificación alcanza el estado de daño límite (ds).

β_{ds} : Logaritmo natural de la desviación estándar del desplazamiento espectral para el estado de daño (ds), obtenidos según FEMA (1999) y ajustados a los cambios de código sísmico en Venezuela.

ϕ : Función de la distribución normal estándar acumulativa.

Se suponen cuatro estados de daño diferentes del estado de daño nulo (sin daño), ligero, moderado, severo y completo. Los umbrales de daño o valores medios de la distribución de probabilidad de las curvas de fragilidad se determinan a partir de los parámetros S_{dy} y S_{du} definidos en la representación bilineal de la curva de capacidad, los que se presentan en las Ecuaciones 8-11.

$$\bar{S}_{D1} = 0,75S_{dy} \quad (8)$$

$$\bar{S}_{D2} = S_{dy} \quad (9)$$

$$\bar{S}_{D3} = S_{dy} + 0,25(S_{du} - S_{dy}) \quad (10)$$

$$\bar{S}_{D4} = S_{du} \quad (11)$$

donde:

\bar{S}_{D1} : Daño ligero (DL)

\bar{S}_{D2} : Daño moderado (DM)

\bar{S}_{D3} : Daño severo

\bar{S}_{D4} : Daño completo

A partir de las curvas de fragilidad es posible obtener la posibilidad de ocurrencia de cada estado de daño y construir matrices de probabilidad de daño, éstas se obtienen a partir del punto de desempeño y usando las curvas de fragilidad correspondientes. Para esto es necesario entrar en las curvas de fragilidad con el parámetro que representa la respuesta estructural (en este caso el desplazamiento espectral) y obtener las probabilidades correspondientes a cada estado de daño.

Para la estimación de las pérdidas se empleó la metodología del proyecto HAZUS (FEMA, 1999). Este método se basa en la suposición de que existe una fuerte correlación entre el daño del edificio y el número y la gravedad de las víctimas, proporcionando sólo las víctimas causadas por los daños a las construcciones.

La metodología proporciona la información necesaria para realizar la estimación de las pérdidas humanas en tres horarios del día, horarios de mayor y menor permanencia de personas en las edificaciones (FEMA, 1999), estos tres horarios son:

- Escenario nocturno: 2:00 AM.
- Escenario diurno: 2:00 PM.
- Escenario de viaje: 5:00 PM.

4. Cartografía del riesgo sísmico

Para cumplir esta tarea nos apoyamos en el Sistema de Información Geográfico ArcGIS (ESRI, 2009), mediante el mismo se confeccionó una base de datos geoespacial en la cual se incluyeron todos los atributos que fueron empleados en los cálculos de la vulnerabilidad y del riesgo de todos los elementos expuestos que se analizaron. Esta digitalización tiene gran importancia para la gestión local de riesgo o en la mitigación de desastres, puesto que sirven como apoyo para la priorización en la toma de decisiones.

RESULTADOS

Vulnerabilidad de edificaciones

Como ya se mencionó el fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire está formado por diferentes tipologías de edificaciones (Figura 1).



Figura 1. Algunas tipologías constructivas de las urbanizaciones. (a) edificios de muros de concreto armado en una dirección, (b) edificios de pórticos de concreto armado, (c) viviendas de 3 niveles de pórticos de concreto armado y (d) edificios de pórticos de acero arriostrados

El 46% de las edificaciones del fondo habitacional que se encuentran en las urbanizaciones (edificaciones formales) corresponden a la tipología de muros de concreto armado en una dirección, el 30% de ellas son de pórticos de concreto armado y solo el 24% representan otras tipologías (pórticos de acero, muros de concreto armado en dos direcciones y mampostería) (Figura 2).

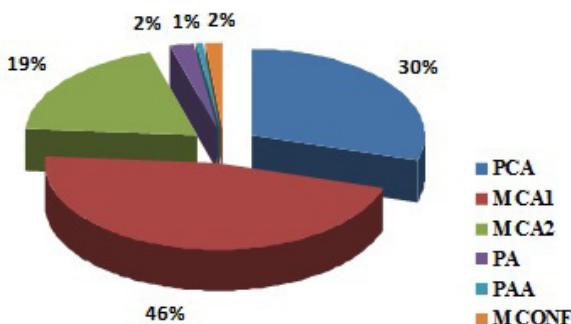


Figura 2. Tipología estructural de las edificaciones

MCA1: Muros concreto armado en una dirección

MCA2: Muros concreto armado en dos direcciones

PCA: Pórticos concreto armado

PA: Pórticos de acero

MCONF: Mampostería confinada

PAA: Pórticos de acero arriostrados

En cuanto a la fecha de proyección de estas edificaciones se observa que sólo el 23% han sido proyectadas con la norma COVENIN 1756:2001, el 56% se proyectaron entre 1982 y 1998 (COVENIN 1756:82 y COVENIN 1756:98) y el 18% con normas provisionales de construcción (MOP 1967) (Figura 3). Igualmente, en la Figura 4 se muestra la distribución de la población por tipología constructiva de las urbanizaciones.

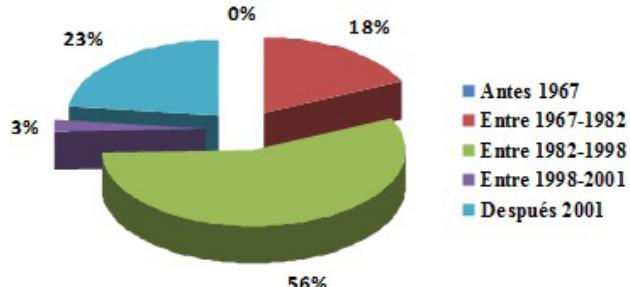


Figura 3. Período de construcción de las edificaciones en Guarenas y Guatire

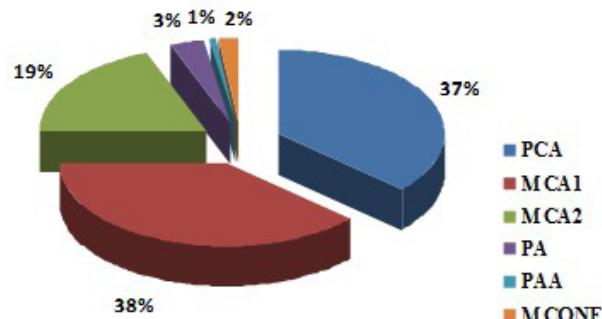


Figura 2. Distribución de población por tipología constructiva de las edificaciones en Guarenas y Guatire

En la ciudad de Guatire se pudo acceder a mayor cantidad de información estructural, por lo que la estimación de la vulnerabilidad en el 60,4% de las edificaciones se realizó mediante análisis dinámicos con la metodología para tal caso.

Como resultado de este análisis, se puede apreciar que un gran porciento (50%) de las edificaciones formales en la ciudad de Guatire presentan una vulnerabilidad alta, estas edificaciones se corresponden con la tipología de muros de concreto armado en una dirección, aunque el 4% de esta tipología presenta una vulnerabilidad media, este 4% está representado por viviendas unifamiliares de uno y dos niveles estructurales (Figura 5).

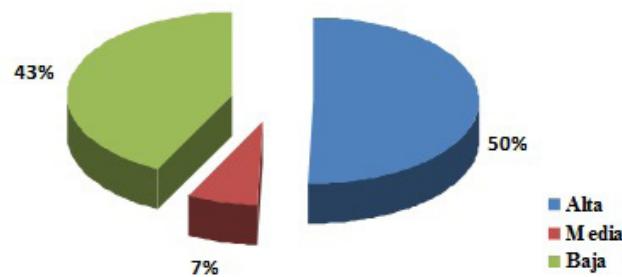


Figura 5. Vulnerabilidad de las edificaciones formales de la ciudad de Guatire

Es necesario destacar que el 44% de la población que se encuentra en las urbanizaciones, se localiza precisamente en estas edificaciones, por lo que deben tomarse de inmediato medidas de reforzamiento estructural, unas propuestas generales se presentarán posteriormente.

En el caso de Guarenas no se pudo contar con información estructural suficiente para la realización de modelos estructurales de cada una de las tipologías presentes en las

edificaciones formales del fondo habitacional; no obstante, se realizaron inspecciones visuales para realizar una estimación aproximada de la vulnerabilidad.

Como resultado de este análisis se determinó que el 26% de las edificaciones formales presentan una vulnerabilidad alta (Figura 6). Estas edificaciones se corresponden con la tipología de muros de concreto armado en una dirección y los edificios altos (de más de ocho niveles) de pórticos de concreto armado construidos antes de 1998.

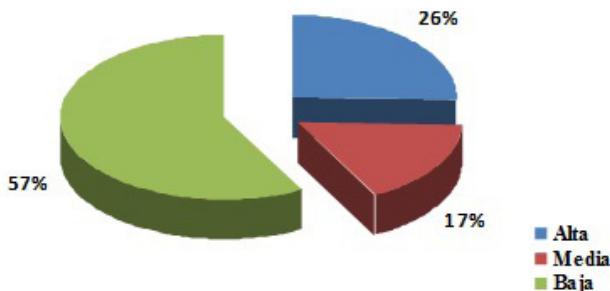


Figura 6. Vulnerabilidad de las edificaciones formales de la ciudad de Guarenas

En el caso de las edificaciones que se encuentran en los barrios, se construyen sin planificación ni normas de diseño, por lo que presentan serios problemas estructurales y de configuración. En las inspecciones realizadas en los barrios de las ciudades Guarenas y Guatire, se identificaron los siguientes problemas estructurales que afectan la vulnerabilidad de estas edificaciones:

- Presencia de columnas cortas.
- Elementos estructurales con secciones inadecuadas y refuerzos insuficientes.
- Discontinuidad de ejes de columnas en los niveles superiores.
- Adosamiento entre edificaciones aledañas.
- Ausencias de vigas altas en una dirección.
- Fuertes asimetrías de masas o rigideces en planta y elevación.

Además, debido a la falta de mantenimiento, presentan gran deterioro de su estado técnico, lo cual también incide de forma negativa en la vulnerabilidad sísmica de estas edificaciones, y se refleja en:

- Agrietamiento de elementos estructurales y paredes de relleno.
- Oxidación del acero de refuerzo en elementos estructurales.

- Filtraciones en cubierta y paredes.

Se realizaron 170 inspecciones de viviendas populares en Guatire y 121 en Guarenas. En la Figura 7 se observa que la vulnerabilidad de estas edificaciones es alta, pues sus índices de vulnerabilidad superan en gran medida el índice de vulnerabilidad de una edificación diseñada con las normas actuales de diseño sismorresistente, además algunas de ellas superan los índices de vulnerabilidad de edificaciones colapsadas durante terremotos pasados.

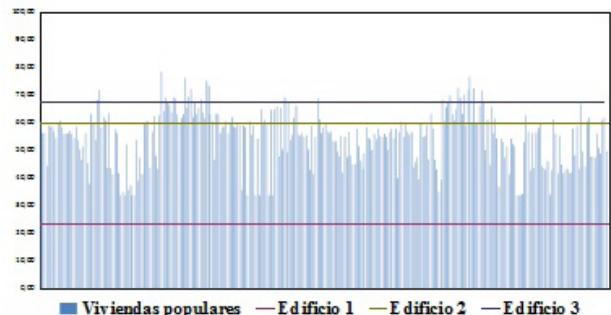


Figura 7. Índices de vulnerabilidad de viviendas populares inspeccionadas en Guarenas y Guatire

Donde:

Edificio 1: Es una edificación de pórticos de concreto armado, diseñada de acuerdo con la norma COVENIN 1756 (2001).

Edificio 2: Es una edificación escolar similar a la escuela Valentín Valiente que se derrumbó durante el sismo de Cariaco en el año de 1997 (López *et al.* 2011), pero localizada en Caracas, en la Macrozona Norte sobre terreno plano (sin efectos topográficos).

Edificio 3: Edificio Mijagual colapsado en Los Palos Grandes durante el terremoto de Caracas del año 1967 (López *et al.* 2011); era una edificación residencial de 11 niveles.

Riesgo

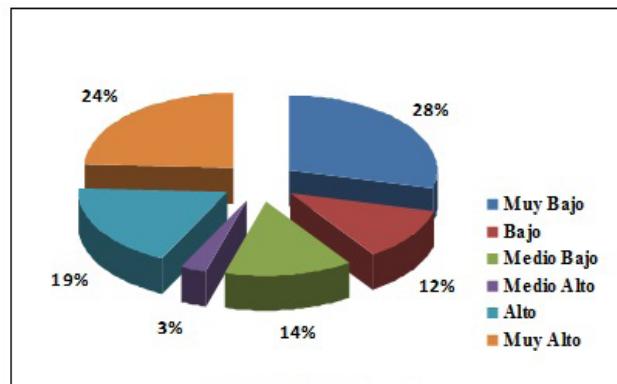
La estimación de las pérdidas materiales de las edificaciones formales en las ciudades Guatire y Guarenas (edificaciones de pórticos o muros de hormigón armado, pórticos de acero y mampostería) se calculó en función del índice de pérdida, pues no fue posible contar con los costos reales de construcción en cada uno de los conjuntos residenciales.

En la Figura 8(a) se puede observar que el 24% y el 19% de las edificaciones formales del fondo habitacional de la

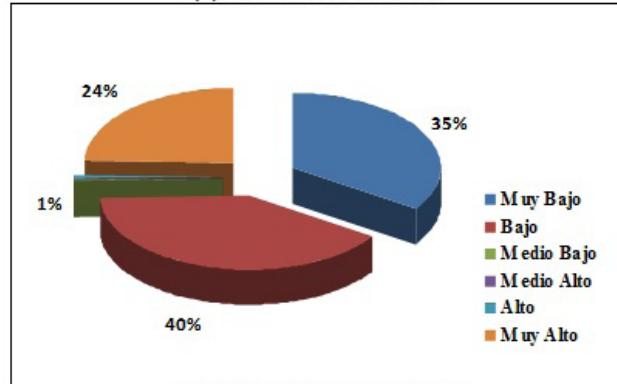
ciudad de Guatire tienen un riesgo sísmico de alto a muy alto. Este porcentaje corresponde a las edificaciones que presentan una alta vulnerabilidad que, a su vez, coinciden con la tipología de muros de concreto armado en una dirección. Sólo el 40% de las edificaciones presenta un riesgo sísmico de muy bajo y bajo. En la Figura 8(b) se observa que en el caso de Guarenas sólo el 24% de las edificaciones presentan un riesgo sísmico alto y el 75% de las edificaciones presentan un riesgo de bajo a muy bajo.

Tabla 7. Pérdidas humanas. Edificaciones formales

Pérdidas	Guatire		
	2:00 AM	2:00 PM	5:00 PM
Muertos	15 143	8 200	5 478
Heridos	28 273	31 027	27 777
Pérdidas	Guarenas		
	2:00 AM	2:00 PM	5:00 PM
Muertos	4 111	2 184	1 456
Heridos	5 336	7 183	7 738



(a) Ciudad de Guatire.



(b) Ciudad de Guarenas.

Figura 8. Evaluación del riesgo sísmico

Aunque hay que destacar que en esta ciudad no fue posible contar con la información estructural necesaria para la realización de estimaciones precisas, por lo que estos rangos pueden variar cuando se realicen análisis más exactos.

En la Tabla 7 se muestra una estimación de las pérdidas humanas en las urbanizaciones del fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire. Hay que destacar que la cantidad de personas existentes en las edificaciones se estimó en dependencia de las áreas construidas y la clase social, con ayuda del proyecto HAZUS (FEMA, 1999).

En el caso de las edificaciones informales se determinó que el riesgo sísmico es muy alto, teniendo en cuenta los resultados de las estimaciones de vulnerabilidad realizadas anteriormente, las características constructivas y el estado técnico de ellas. Por esta razón se espera que en la zona donde se encuentran estas edificaciones ocurran las mayores pérdidas humanas y materiales.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se identifican los sistemas vulnerables, los cuales precisan de estudios de reforzamiento estructural. Estos sistemas son los siguientes:

- Edificios de muros de concreto armado en una dirección (MCA1). Estos sistemas poseen una baja resistencia en la dirección larga, además tienen escasa capacidad de deformación inelástica (sistema de ductilidad limitada), debido a que están estructuradas por muros delgados de hormigón armado, por lo que resulta imposible confinar los bordes con estribos, sumado a esto la existencia de una sola malla de refuerzo de acero trefilado (Figura 9a).
- Edificios altos de pórticos de concreto armado. En general estas edificaciones se proyectaron antes de la norma COVENIN 1756 (2001), no cumplen con las exigencias de cuantías y disposición del refuerzo, tanto longitudinal como transversal establecidos por los reglamentos internacionales actuales para las construcciones erigidas en zonas de alta peligrosidad sísmica. Por ejemplo, la utilización de grandes concentraciones de refuerzo en grupos de barras, bajas cuantías de refuerzo transversal y espaciamientos de este refuerzo, que no garantizan el confinamiento del núcleo de hormigón y la estabilidad de las barras longitudinales. Esto trae como consecuencia baja capacidad de los elementos para desarrollar zonas de disipación de energía y, por tanto, un bajo nivel de ductilidad del conjunto estructural y un inadecuado mecanismo de fallo (Figura 9b).

Mapa de riesgo

La cartografía del riesgo sísmico consiste en la representación de las pérdidas humanas y materiales



Figura 9. Tipologías vulnerables. (a) Edificios de muros de concreto armado en una dirección. (b) Edificios altos de pórticos de concreto armado proyectados antes de la norma COVENIN 1756 (2001)

a través de mapas, en los cuales se asocian los atributos contenidos en las bases de datos con la ubicación espacial de los elementos expuestos. En el caso de este trabajo, se cartografiaron las áreas construidas dedicadas al fondo habitacional (viviendas formales e informales).

Se digitalizaron 170 polígonos entre conjuntos residenciales y barrios, en la Tabla 8 se muestran los atributos y resultados de la evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmicos.

Tabla 8. Atributos digitalizados para la evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico

Atributo	Descripción
Id	Identificador único de cada polígono
Coord X,	Coordenada X UTM de REGVEN
Coord Y	Coordenada Y UTM de REGVEN
Ciudad	Perteneciente a Guarenas o a Guatire
Urbanización	Urbanización incluye también el barrio
Conjunto Residencial	Nombre del Conjunto o barrio
N_Niveles	Número de niveles de las edificaciones
N_Viv_Apto	Número de viviendas o apartamentos
Descripción	Tipo de estructura predominante
Fech_Con	Año o período de construcción
Uso	Referido solo a uso residencial
Vulnerab	Grado de vulnerabilidad sísmica
Tipo_daño	Tipo de daño más probable
Ind_pérd	Índice de pérdida (%)
Muert_2am, Muert_2pm, Muert_5pm	Pérdidas humanas (muertes) en escenarios temporales, madrugada, tarde y en horario de viaje
Her_2am, Her_2pm, Her_5pm	Pérdidas humanas (heridos) en escenarios temporales, madrugada, tarde y en horario de viaje
Riesgo	Grado de riesgo sísmico
N_Person	Número de personas

Las autoridades de las Alcaldías, de Protección Civil, Catastro e Ingeniería Municipal pueden disponer de diversa variedad de mapas, como la distribución espacial de las tipologías más vulnerables, la cantidad de residentes en cada Conjunto Residencial, en fin, pueden tener representados espacialmente todos los atributos contenidos en la base de datos. De aquí se deriva otra importante aplicación práctica del uso de SIG, porque permiten obtener información con alto valor agregado. En el caso de la gestión local de riesgo o en la mitigación de desastres, sirven como apoyo para la priorización en la toma de decisiones, tanto en la mitigación como en el manejo de emergencias. Por ejemplo, en la asignación de recursos para mitigar la vulnerabilidad de las edificaciones con una mirada rápida al mapa de riesgo sísmico para la ciudad de Guatire (Figura 10), se puede observar dónde se encuentran los conjuntos residenciales con mayor riesgo que deben ser atendidos, que en este caso corresponden a conjuntos residenciales en los cuales predominan los edificios de muros de concreto armado en una sola dirección, más conocidos como tipo túnel.

Reforzamiento

A continuación se proponen dos variantes de reforzamiento para los edificios de muros de concreto armado en una sola dirección, la primera es la colocación de muros longitudinales (dirección larga) en ambos extremos del edificio a modo de contrafuerte, lo cual no afecta el funcionamiento de la edificación durante el proceso de reforzamiento estructural. Según los cálculos realizados, el comportamiento adecuado del edificio se logra colocando tres muros de 7,00 m de longitud en ambos extremos del edificio. Estos muros deben tener las mismas características de espesor y armado de los muros originales del edificio. Esta solución tiene el inconveniente que necesita un adecuado espacio entre los edificios para la colocación de los contrafuertes, aunque se pueden proyectar varias variantes de contrafuertes teniendo en cuenta las limitaciones de espacio. Otra variante de reforzamiento sería la colocación de arriostres de acero (Hernández, 2010).

CONCLUSIONES

1. El fondo habitacional de las ciudades Guarenas y Guatire está dividido en tres grandes grupos (Casco histórico, urbanizaciones y barrios), los cuales presentan características, técnicas constructivas, materiales y edades diversas, predominando las construcciones de concreto armado de varios niveles en las áreas formales y las de mampostería y concreto armado de baja calidad en los barrios.

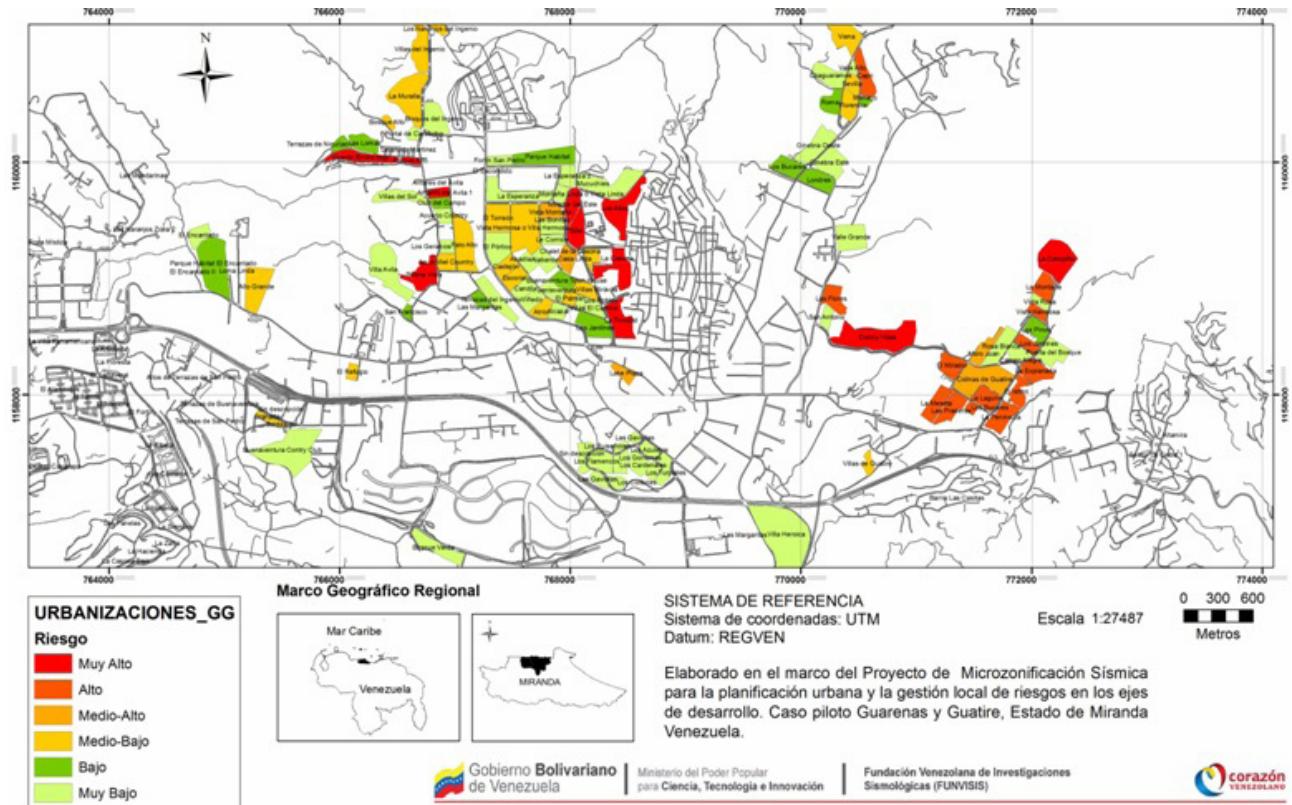


Figura 10. Mapa de riesgo sísmico de las urbanizaciones de Guatire, municipio Zamora, Estado Miranda, Venezuela

2. El 38% de la población que vive en las urbanizaciones se encuentra localizada en las edificaciones de muros de concreto armado y el 37% viven en edificaciones de pórticos de concreto armado, proyectados con las normas vigentes en cada caso.
3. El 50% de las edificaciones formales de la ciudad de Guatire presentan una vulnerabilidad alta. En general, estas edificaciones corresponden con la tipología de muros de concreto armado en una dirección (MCA1).
4. El 58% de las edificaciones formales de la ciudad de Guarenas presentan una vulnerabilidad alta. Estas edificaciones se corresponden con la tipología de muros de concreto armado en una dirección (MCA1) y los edificios altos (de más de ocho niveles) de pórticos de concreto armado construidos antes de 1998.
5. En el caso de las edificaciones informales, la vulnerabilidad en todos los casos se evalúa como alta, pues los índices de vulnerabilidad superan en gran medida el índice de vulnerabilidad de una edificación diseñada con las normas actuales de diseño sismorresistente; además, algunas de ellas superan los índices de vulnerabilidad de edificaciones colapsadas durante terremotos pasados.
6. En el caso de la ciudad de Guatire el 24% y el 19% de las edificaciones formales tienen un riesgo sísmico de alto a muy alto, respectivamente. Estos porcentajes corresponden a las edificaciones que presentan una alta vulnerabilidad y sólo el 40% de las edificaciones presenta un riesgo sísmico de muy bajo a bajo.
7. En la ciudad de Guarenas sólo el 24% de las edificaciones inspeccionadas presentan un riesgo sísmico alto y el 75% de las edificaciones presentan un riesgo de bajo a muy bajo. Aunque hay que destacar que en esta ciudad no fue posible contar con la información estructural necesaria para la realización de estimaciones precisas por lo que estos rangos pueden variar cuando se realicen análisis precisos.
8. De la estimación de las pérdidas humanas en las edificaciones formales, se concluye que las mayores pérdidas para un sismo con una aceleración pico en roca cercana a 0,3g (19254 muertos y 33609 heridos) se producirán en el horario de la madrugada, horario de mayor permanencia de personas en las edificaciones. Hay que destacar que la cantidad de personas se estimó en dependencia de las áreas construidas y la clase social.
9. Se concluye que en todos los casos el riesgo sísmico

- de las edificaciones informales es muy alto, teniendo en cuenta los resultados de las estimaciones de vulnerabilidad.
10. La cartografía del riesgo sísmico permitió determinar las zonas de mayor riesgo sísmico, lo que permite a las autoridades dirigir los recursos necesarios para la reducción del mismo; pero, además, permitiría conocer de antemano hacia dónde dirigir las fuerzas de rescate, ante el escenario de ocurrencia de un terremoto de gran magnitud en la zona
 11. Se concluye que los edificios de muros de concreto armado en una dirección (MCA1) son muy vulnerables y hay que proponerle medidas urgentes de reforzamiento estructural para mejorar su comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Estudio realizado con fondos de la VII y X Comisión Mixta Cuba-Venezuela en el marco del proyecto de Microzonificación sísmica de Guarenas y Guatire.

A los estudiantes de la Universidad Central de Venezuela por su participación en las inspecciones técnicas realizadas (Alban, Ch., De Abreu, J., Morales, J., Pompei, R., Yaselli, O., Gil, C.A., Villamizar, Y., Mandujano, M., Soto, D., López, I., Henríques, C., Araujo, Y.)

REFERENCIAS

- AUDEMARD, F. A., MACHETTE, M., COX, J., DART, R., HALLER, K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions. US Geological Survey Open-File Report 00-0018. Include map at scale 1:2,000,000 and 78-page report.
- CARDONA, O. D. & BARBAT, A. H. (2000). El riesgo sísmico y su prevención. Calidad Siderúrgica, Madrid, España.
- CARREÑO, M., CARDONA, O., MARULANDA, M., BARBAT, A. (2006). Evaluación del riesgo sísmico: un enfoque holístico. Revista internacional de Ingeniería de Estructuras, 11 (1), 45-76; <http://idea.unalmz.edu.co>.
- CSI (2009). SAP2000 Advanced Versión 14.1. Structural Analisys Program. Computer and Structures Inc. Berkeley, California, USA.
- CORONEL, G. & LÓPEZ, O. A. (2013). Metodología para la Estimación de Daños Por Sismos en Edificios Escolares de Venezuela Mediante Curvas de Fragilidad. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV, Vol. 28, N° 2, 2013.
- COVENIN (1982). Edificaciones Antisísmicas. Norma COVENIN 1756:82. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas, Venezuela.
- COVENIN (1998). Edificaciones Sismorresistentes. Norma COVENIN 175698. Comisión Venezolana de Normas Industriales, COVENIN, FONDONORMA, MINDUR y FUNVISIS. Caracas, Venezuela.
- COVENIN 1756. (2001). Edificaciones Sismorresistentes. Comisión Venezolana de Normas Industriales, Caracas. FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas, Parte 1: Requisitos, Parte 2: Comentarios.
- ESRI (2009). ArcMap 9.2. ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESOURCE INSTITUTE, ESRI, Redlands, California.
- FAJFAR, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. Earthquake Spectra. Vol.16, No.3, pp.573-592.
- FEMA-253 (1996). NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA, (1999). Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUSMH MR4, Advance Engineering Building Module, Technical and User's Manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C.
- FEMA, (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology; Earthquake Model, HAZUS-MH MR4, Technical Manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C.
- FONDONORMA 1753 (2006). Proyecto y Construcción de Obras en Concreto Estructural. Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad, Caracas.
- GUASCH, F., RODRÍGUEZ, L., VEGA, I., MORALES, C., SCHMITZ, M., MIRÓ, C., VIETE, H., RADA, F., GONZÁLEZ, M., NODA, F., AMARIS, E. (2011). Diagnóstico situacional con fines de gestión de riesgo en las ciudades de Guarenas y Guatire, estado Miranda, Venezuela. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, 26 (2), 33-48.
- HERNÁNDEZ, J. J., SCHMITZ, M., DELAVAUD, É., CADET, H., DOMÍNGUEZ, J. (2011). Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas considerando efectos de sitio 1D,

2D Y 3D. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, 26 (2), 49–66.

HERNÁNDEZ, R. (2010). Evaluación y adecuación sismorresistente de edificios tipo túnel. Tesis de Maestría no publicada. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela.

INE (2013). XIV CENSO NACIONAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA, Resultados por Entidad Federal y Municipio del Estado Miranda. Gerencia General de Estadísticas Demográficas, Gerencia de Censo de Población, Instituto Nacional de Estadística (INE).

LEAL, A., RODRÍGUEZ, J., AUDEMARD, M. (2012). A prueba de temblores. Reflexiones sobre construcciones y sismorresistencia en la Venezuela de 1900. El caso del sismo de San Narciso. VI Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica, Caracas.

LÓPEZ, O., MARINILLI, A., BONILLA, R., FERNÁNDEZ, N., DOMÍNGUEZ, J., CORONEL, G., BALOA, T., VIELMA, R. (2010). Evaluación sismorresistente de edificios

escolares en Venezuela. Revista de la Facultad de Ingeniería UCV, v.25 n.4, pp. 81-94.

LÓPEZ, O., CORONEL, G., ASCANIO, W., ROJAS, R., PAEZ, V., OLBRICH, F., RENGEL, J. Y GONZÁLEZ, J. (2011). Índices de Priorización de Edificios para la Gestión del Riesgo Sísmico. Informe Técnico Final. Misión Ciencia. FUNVISIS. Caracas. Venezuela.

MANDER, J.B., PRIESTLEY, M., PARK, R. (1988): Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering. ASCE, 114(8). 1804-1826.

MOP (1967). Norma Provisional para Construcciones Antisísmicas. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios. Caracas, Venezuela.

MOLNAR, P. & SYKES, L. (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. Geol. Soc. Am. Bull., 80:1639-1684.

NTCDF (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. Norma Mejicana