Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10

Seismic Hazard Assessment in Colombia. Updates and Useage in the New National Building Code NSR-10

Mario A. Salgado[a], Gabriel A. Bernal[b], Luis E. Yamín[c], Omar D. Cardona[d]

PALABRAS CLAVES

Amenaza sísmica, espectro de amenaza uniforme, microzonificación sísmica, normas de diseño y construcción.

RESUMEN

La disponibilidad de modelos y técnicas de cálculo más refinadas para la evaluación de la amenaza sísmica, así como la existencia de una mayor cantidad de registros de eventos sísmicos, permiten realizar una actualización de los estudios de amenaza sísmica a nivel nacional. Este artículo describe la nueva metodología utilizada para estimar diferentes intensidades sísmicas esperadas para diseño y construcción de edificaciones sismorresistentes en el territorio colombiano. Se presentan los resultados de intensidad obtenidos para diferentes períodos de retorno y ordenadas espectrales para edificaciones de diferentes períodos estructurales, los cuales, además de servir para establecer los valores de diseño en las nuevas Normas NSR-10, también son un insumo necesario para la realización de estudios de microzonificación y de riesgo sísmico dentro del territorio nacional de la República de Colombia.

KEY WORDS

Building codes, seismic hazard, seismic microzonation, uniform hazard spectrum.

ABSTRACT

The use of more refined models and computational techniques for seismic hazard evaluation and the availability of more data related to seismic events have allowed the updating of national seismic hazard studies. This paper summarizes the new methodology used to estimate the expected seismic intensities for design and construction of earthquake resistant structures in the country. Seismic intensities are obtained for different return periods and spectral ordinates, for the different heights of buildings. This data is useful in establishing design values in the new national building code NSR-10 and for the development of seismic microzonation studies.

a MSc. en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. ✉ m-salgad@uniandes.edu.co

b MSc. en Ingeniería Civil. Investigador, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. ✉ ga-berna@uniandes.edu.co

c MSc. in Civil Engineering, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. ✉ lyamin@uniandes.edu.co

d PhD. Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. ✉ odcardonaa@unal.edu.co,

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Para la creación de las primeras normas sismo resistentes en el país [1] fue necesario realizar el primer estudio general de amenaza sísmica de Colombia [2]. En el año de 1996 dicho estudio fue actualizado en el marco del Comité AIS-300, con la participación de la Universidad de Los Andes, el Ingeominas y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [3]. En ese momento, se contaba con una mejor información acerca de la tectónica de Colombia y con el registro de eventos sísmicos recientes, como resultado de la puesta en funcionamiento de la Red Sismológica Nacional a principios de los años 90. Dicho estudio sirvió de base para definir los parámetros para diseño sismo resistente para edificaciones, establecidos en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente en 1998 [4].

Para la actualización de las normas de diseño y construcción sismo resistente, en el año 2010, se consideró conveniente actualizar el estudio de amenaza sísmica nacional, dada la disponibilidad de modelos y técnicas de cálculo más refinadas para la evaluación de la amenaza sísmica, así como la existencia de una mayor cantidad de registros de eventos sísmicos para realizar dicha evaluación. Los estudios de amenaza sísmica son de especial importancia para el desarrollo del país, debido a la necesidad de diseñar y construir las nuevas edificaciones e infraestructura así como reforzar la ya existente acorde con el nivel de amenaza adecuado. Sólo de esta manera se puede controlar el nivel de vulnerabilidad de las construcciones colombianas, lo cual, ante el incontrolable aumento de la población y la exposición, se convierte en la única manera viable para controlar el riesgo y sus consecuencias en términos de impacto físico, económico, social y ambiental.

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

La evaluación de la amenaza sísmica se llevó a cabo a partir de la teoría sismológica clásica teniendo en cuenta las características de sismicidad de las fuentes, las relaciones de atenuación de la energía con la distancia y la integración probabilista de las intensidades sísmicas deseadas. De esta manera, es posible calcular la amenaza sísmica para los puntos deseados dentro del territorio nacional y para diferentes intensidades sísmicas (aceleración, velocidad o desplazamiento).

METODOLOGÍA

La metodología utilizada consiste en: identificar y modelar cada una de las fallas o fuentes sismogénicas a nivel nacional, agrupándolas en segmentos de grandes familias de fallas locales; asignar mediante ubicación geográfica los eventos sísmicos que se consideran asociados a cada uno de los segmentos, utilizando para ello los catálogos sísmicos nacionales; caracterizar cada una de las fuentes sísmicas mediante parámetros estadísticos relevantes, tales como magnitud mínima, máxima y frecuencias de eventos para diferentes rangos de magnitudes; realizar el análisis de amenaza sísmica utilizando el programa CRISIS V7.2 [5]; y, finalmente, interpretar y depurar los resultados para su utilización en el diseño de infraestructura y en otras aplicaciones.

IDENTIFICACIÓN Y MODELACIÓN DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS

Se realizó una revisión exhaustiva de los diferentes estudios relacionados con el tema [6, 7, 8 y 9] y se encontraron similitudes en los lineamientos de los diferentes sistemas de fallas a nivel nacional. Se modelaron 38 fuentes sismogénicas, de las cuales 30 corresponden a fuentes corticales y 8 a fuentes profundas (ver Figuras 1 y 2).

VERIFICACIÓN Y DEPURACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO NACIONAL

Existen a nivel nacional diferentes catálogos de eventos sísmicos recopilados por diferentes instituciones (Ingeominas, ISA, Instituto Geofísico de los Andes,

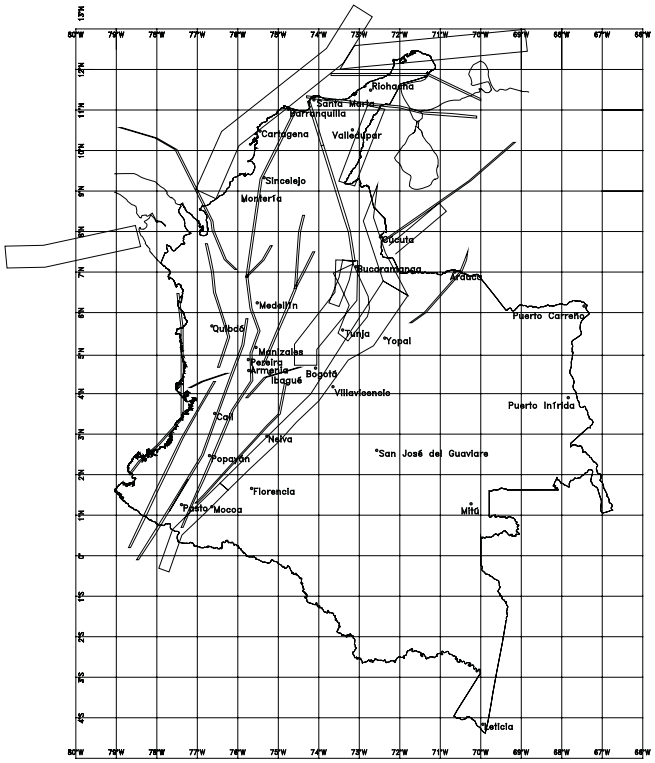

Figura 1. Fuentes corticales

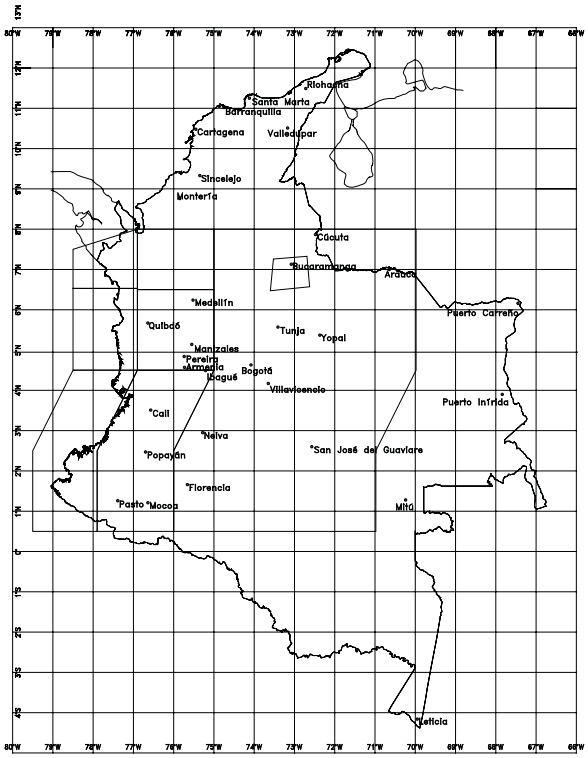

Figura 2. Fuentes subducción y profundas

OSSO). Luego de una verificación detallada de cada uno de los catálogos, se generó un catálogo unificado correspondiente a 7401 eventos con magnitud superior o igual a 4.0 (M_o, magnitud umbral utilizada en el estudio) y con magnitudes homologadas a magnitud de momento (M_W).

ASIGNACIÓN DE EVENTOS

Definidos la geometría de cada una de las fuentes y el catálogo de eventos a nivel nacional, se procedió a la asignación de los sismos mediante la definición de volúmenes de 30 km de ancho a cada lado a partir de la proyección en planta de cada una de las fuentes. Se asignaron a las fuentes corticales todos los eventos en dichos volúmenes con profundidades iguales o menores a 60 km. Los eventos con profundidades superiores fueron asignados a las fuentes profundas (ver Figuras 3 y 4).

MODELOS DE SISMICIDAD

Se utilizó el modelo de sismicidad de Poisson, en el cual la actividad de cada fuente sísmica se calcula con base en la tasa de excedencia de las magnitudes generadas por cada fuente. Dicha tasa mide la frecuencia con que se generan en cada fuente sismos con una magnitud igual o superior a la definida como magnitud umbral. La sismicidad, entonces, se puede definir de la siguiente manera [10]:

$$\lambda(M) = \lambda O \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}, \; M_0 \le M \le M_U \qquad (1)$$

donde $\lambda(M)$ es la frecuencia de ocurrencia de eventos con magnitud igual o mayor que M; M_o es la magnitud umbral, λo, β y M_U son los parámetros calculados para cada una de las fuentes y M es la variable aleatoria general que representa la magnitud de la fuente.

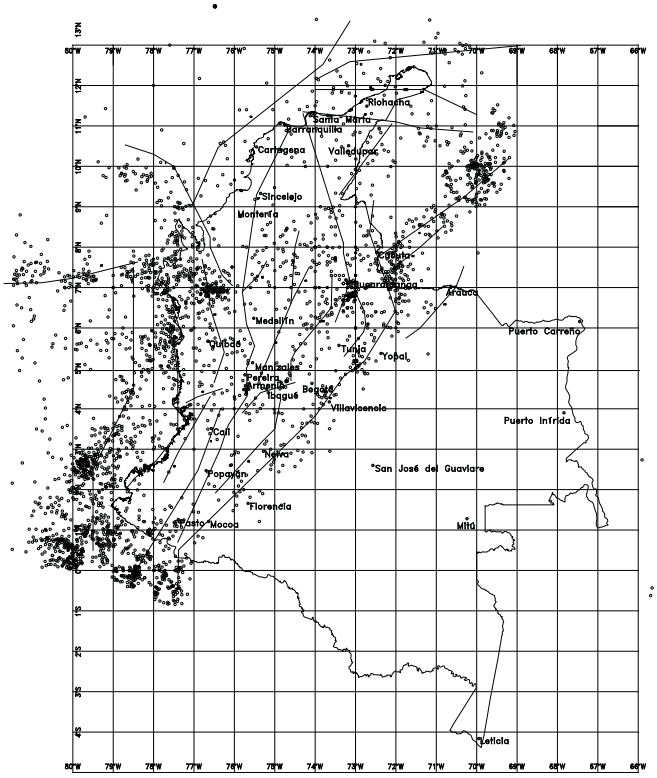

Figura 3. Eventos asignados a fuentes corticales

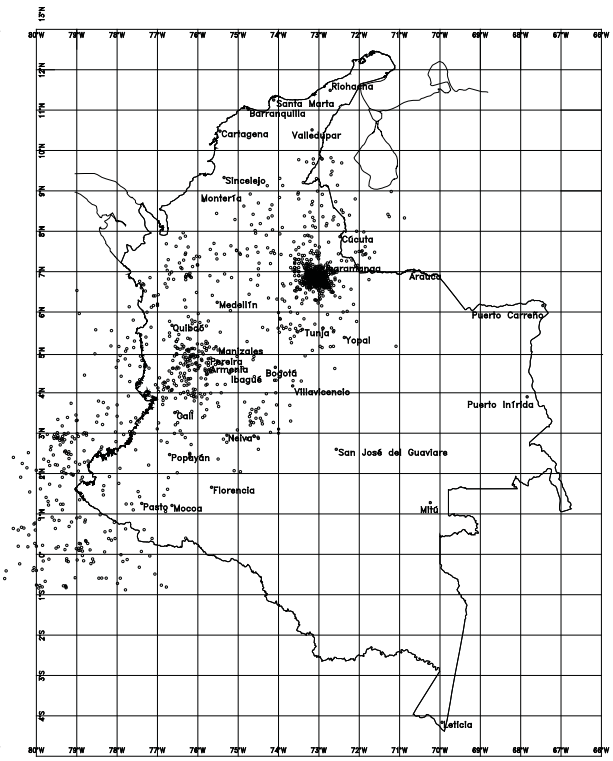

Figura 4. Eventos asignados a fuentes profundas

PARAMETRIZACIÓN DE LAS FUENTES

Para poder llevar a cabo la evaluación de la amenaza sísmica es necesario caracterizar cada una de las fuentes sismogénicas. El proceso se llevó a cabo siguiendo el método de máxima verosimilitud [11]; el cual, luego de definir el valor de M_o, permite calcular la tasa media anual de eventos con magnitud igual o superior a ésta (parámetro λ_o), así como la pendiente de la curva de recurrencia β, que define para cada fuente la capacidad de producir eventos de magnitudes altas o bajas. Adicionalmente a lo anterior, se estimó la magnitud última esperada que puede generar cada fuente (M_U) a partir de la longitud de ruptura y de sus características morfotectónicas. Por último, para dar un tratamiento adecuado al valor β, por ser este valor imperfectamente conocido, se le asignó un coeficiente de variación (CV) para que de esta manera dicho valor en adelante se le siga tratando como una variable aleatoria dentro de la propagación de la incertidumbre.

RELACIONES DE ATENUACIÓN DE LA ENERGÍA

Para el presente estudio se seleccionaron relaciones de atenuación sísmica espectrales que consideran atenuaciones diferentes para ondas con diferente contenido frecuencial. Con el fin de seleccionar la relación o ley de atenuación más adecuada para las condiciones nacionales, se realizó una evaluación de sesgos y desviaciones estándar para diferentes ordenadas espectrales, se calcularon los valores residuales entre las intensidades obtenidas usando la ley correspondiente y los espectros de respuesta calculados para los diferentes registros acelerográficos disponibles para varios eventos ocurridos en el territorio nacional (ver Figuras 5 a 10). Dicha evaluación permitió determinar que las relaciones de atenuación que mejor se adaptan al medio colombiano son Campbell Strike [12] para las fallas superficiales, Campbell Reverse [12] para la zona de subducción y García et al. [13] para la zona de Benioff. También se encontró que la relación de

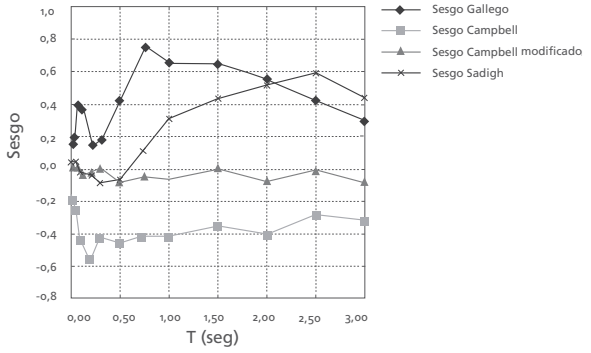

Figura 5. Comparación sesgos zona cortical

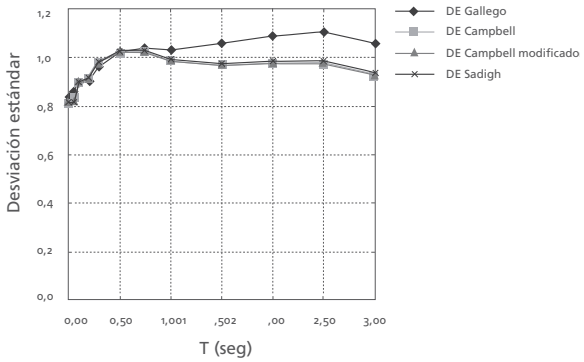

Figura 6. Comparación desviaciones estándar zona cortical

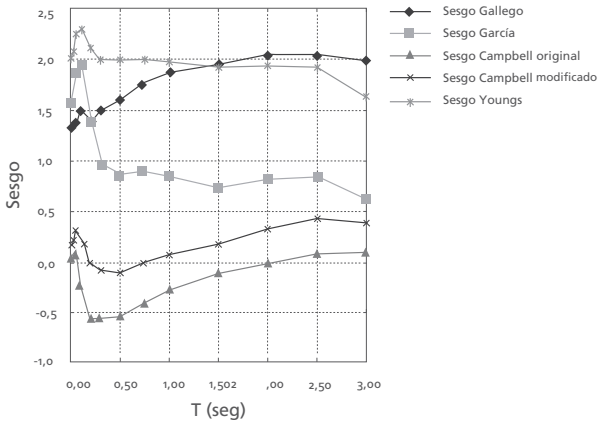

Figura 7. Comparación sesgos zona subducción

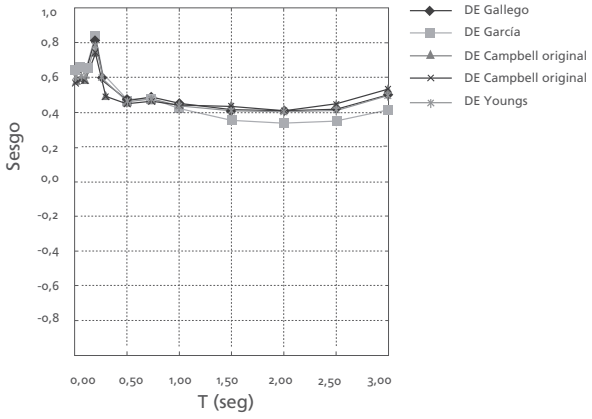

Figura 8. Comparación desviaciones estándar zona subducción

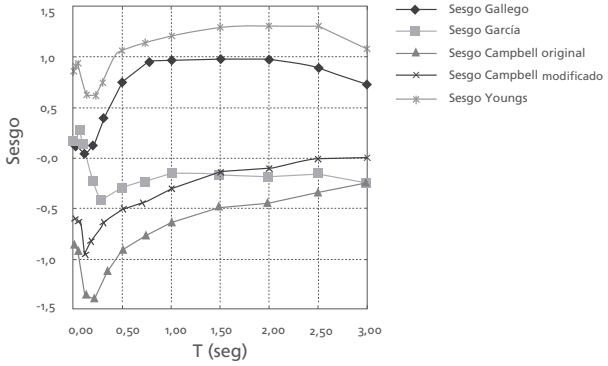

Figura 9. Comparación sesgos zona de Benioff

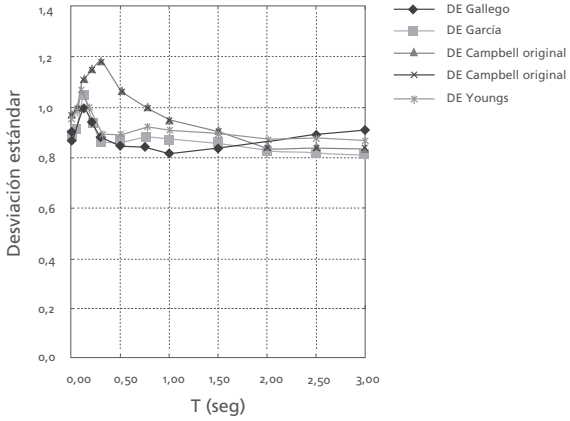

Figura 10. Comparación desviaciones estándar zona de Benioff

atenuación de energía de Gallego [14] arroja resultados aceptables, por lo cual se decidió incluirla en las evaluaciones de manera comparativa.

MODELO DE PLANO FUENTE

Para dar un manejo más adecuado a las incertidumbres inherentes a la localización tanto en planta como en profundidad de las fuentes sísmicas, se utilizó el modelo de plano fuente. En éste, las fuentes se modelan como unas áreas a través de vértices unidos con líneas que tienen coordenadas en las tres dimensiones (x, y, z). Con lo anterior, es posible definir la profundidad mínima y máxima de las fuentes y su buzamiento. Dentro de cada una de estas áreas se supone una actividad sísmica uniforme por unidad de área.

CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA

Una vez definidos los parámetros de sismicidad para cada una de las fuentes, así como las relaciones de atenuación de la energía propagada a partir de cada una de ellas, es posible calcular la amenaza sísmica en un lugar específico al integrar los efectos de las 38 fuentes sísmicas y la distancia entre el sitio de la evaluación y la fuente. La amenaza se calcula a partir de la siguiente expresión [15]:

$$v(a) = \sum_{n=1}^{N} \int_{M_o}^{M_U} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \, Pr(A > a \,|\, M, R_i) dM \qquad (1)$$

Donde a es la intensidad sísmica seleccionada, R_i es la distancia, N es el número total de fuentes sísmicas y $Pr(A>a\,|\,M,R_i)$ es la probabilidad de que la intensidad sea excedida dada la magnitud de un sismo y la distancia entre la i-ésima fuente y el punto, R_i.

RESULTADOS

Los resultados de la evaluación de la amenaza sísmica se visualizan en el presente caso mediante mapas nacionales de aceleración máxima del terreno (PGA) para diferentes períodos de retorno (ver Figuras 11 a 14). También las Figuras 15 a 22 presentan las curvas de amenaza en términos de aceleración máxima del terreno (PGA) en gal (cm/s^2) y los espectros de amenaza uniforme en términos de aceleración para cuatro ciudades diferentes y para los mismos períodos de retorno. Con propósito comparativo, también se grafica el espectro para 475 años, calculado con la relación de atenuación de Gallego. Además, se incluyen en las mismas figuras los coeficientes sísmicos de diseño (475 años) adoptados por la Comisión Asesora Permanente de la NSR-10 [16] con base en los resultados de este estudio [17].

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de actualización de la amenaza sísmica de Colombia, versión 2010 permite plantear las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES

- El país cuenta en el momento con un estudio de amenaza sísmica a nivel nacional actualizado y moderno, no sólo en términos de los modelos analíticos utilizados sino considerando la mejor información sismotectónica disponible.
- Los resultados del estudio de amenaza se han integrado a las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10) mediante la determinación de los valores A_a, A_v, A_e, A_d adoptados por dicha normativa y la adopción de los mapas nacionales oficiales de zonificación sísmica.
- La metodología utilizada permite obtener espectros de amenaza uniforme que son de especial beneficio para una evaluación consistente dentro de estructuras y edificaciones con diferentes períodos de vibración.
- Los resultados encontrados en el presente estudio son a nivel de roca firme, los cuales sirven como dato de entrada para estudios detallados de microzonificación sísmica o estudios de sitio para edificaciones en las cuales se desea un análisis más

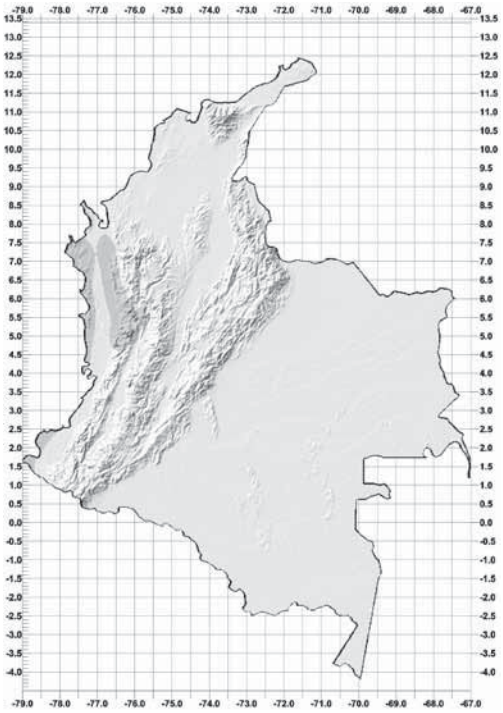

Figura 11. PGA 31 años

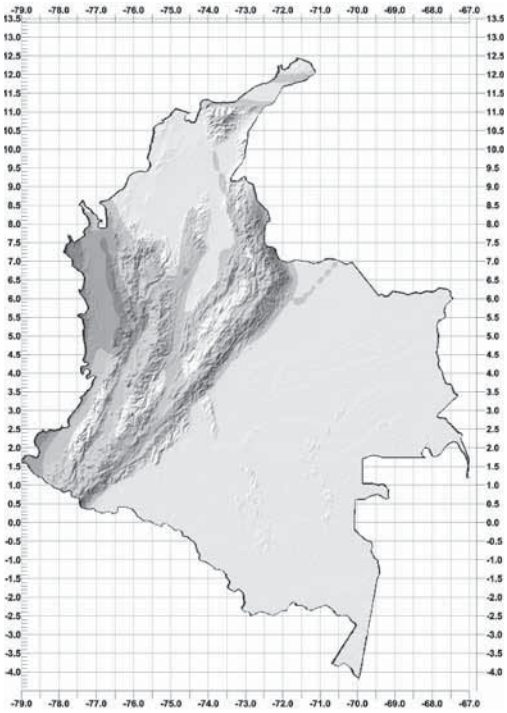

Figura 12. PGA 225 años

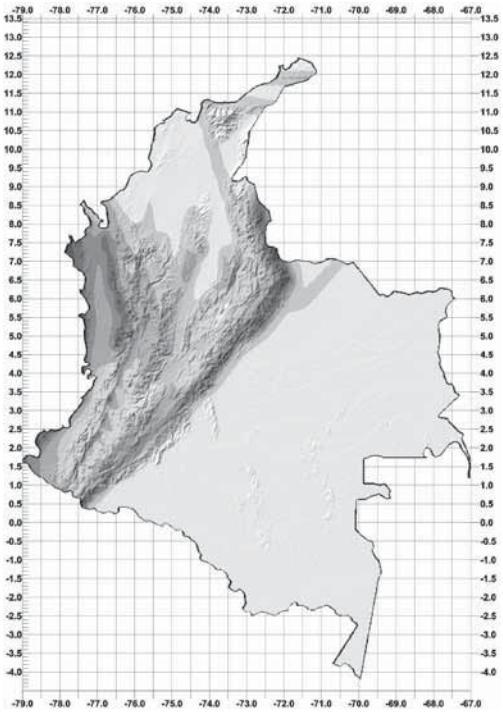

Figura 13. PGA 475 años

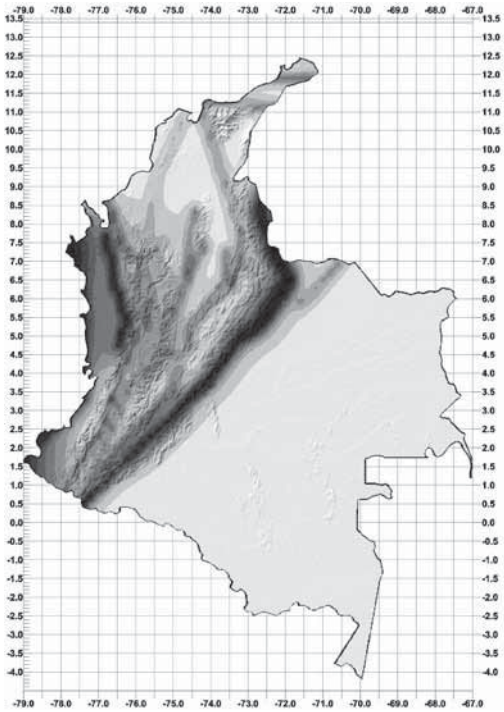

Figura 14. PGA 2500 años

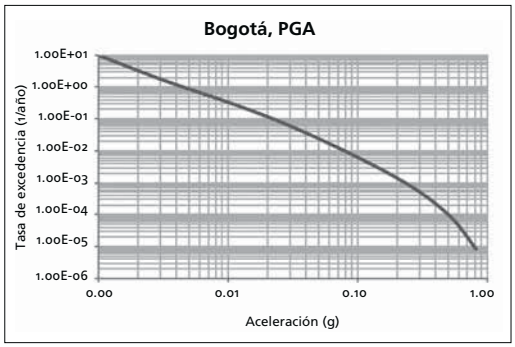

Figura 15. Curva de amenaza PGA Bogotá

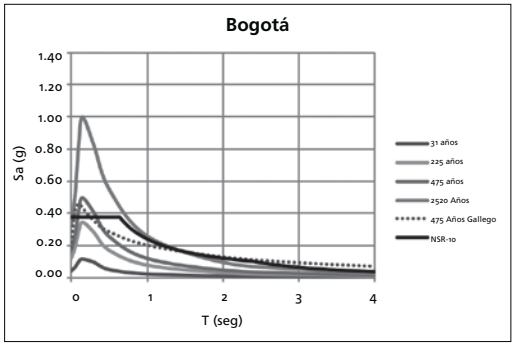

Figura 16. Espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno Bogotá

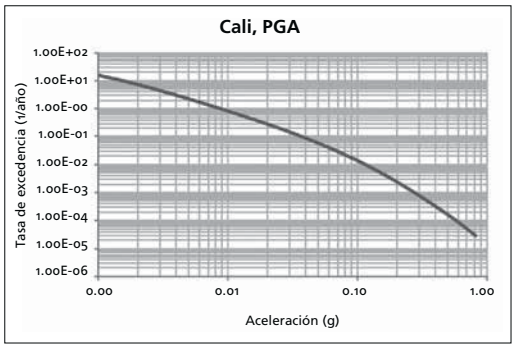

Figura 17. Curva de amenaza PGA Cali

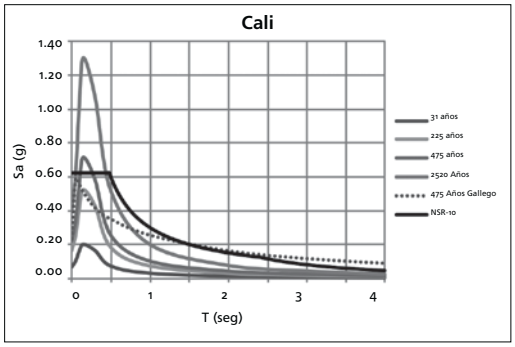

Figura 18. Espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno Cali

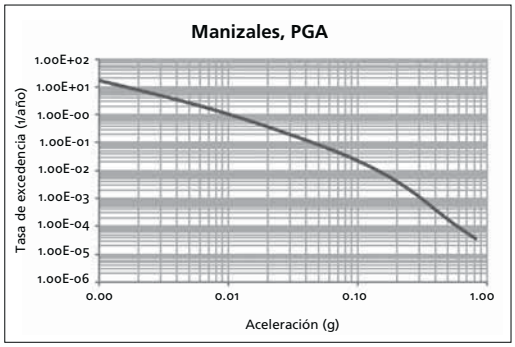

Figura 19. Curva de amenaza PGA Manizales

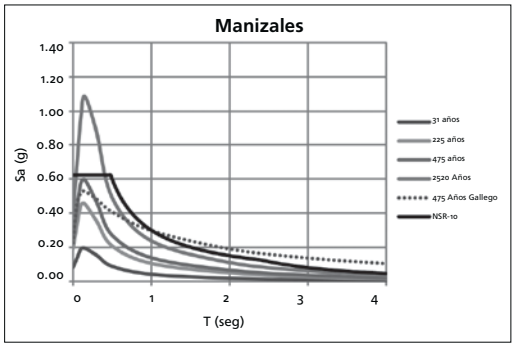

Figura 20. Espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno Manizales

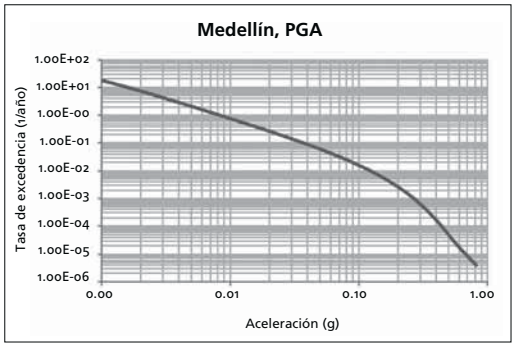

Figura 21. Curva de amenaza PGA Medellín

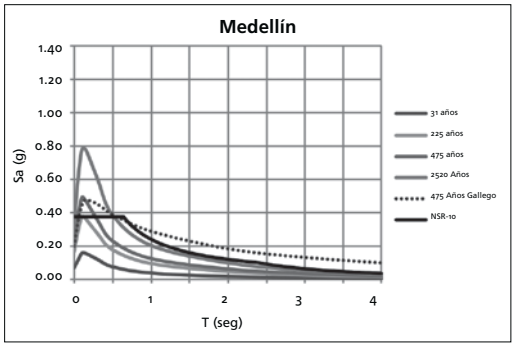

Figura 22. Espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno Medellín

detallado de la demanda sísmica, considerando los efectos de la respuesta dinámica del suelo local.

- Con los resultados obtenidos es posible, en cualquier ciudad del país, impulsar, entre otros, actividades de reducción y mitigación del riesgo sísmico en edificaciones existentes que deben ser reforzadas para mejorar su seguridad sísmica; así mismo, plantear las bases para estudios de microzonificación sísmica a nivel local y estudiar escenarios de daño y riesgo para efectos de planes de atención de emergencias.

RECOMENDACIONES

- Los estudios de amenaza sísmica del país deben mantenerse en continua actualización mediante las siguientes actividades:
  - Estudios de neotectónica a nivel de fallas locales.
  - Instrumentación sísmica.
  - Actualización y depuración del catálogo sísmico.
  - Estudio y propuesta de nuevas leyes de atenuación.
  - Calibración de modelos de cálculo.
- La nueva información disponible, al igual que las metodologías de análisis de cálculo de respuesta sísmica de estructuras y suelos, deben incorporarse a las normas de diseño y construcción con el objeto de aumentar la confiabilidad general de los diseños sismo resistentes de edificaciones e infraestructura en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
Norma AIS 100-83, Requisitos sísmicos para edificaciones. Bogotá, Colombia: AIS, 1983.

[2] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
Estudio general del riesgo sísmico de Colombia. Bogotá, Colombia: AIS, 1983.

[3] Comité AIS-300.
Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1996.

[4] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98. Bogotá, Colombia: AIS, 1998.

[5] M. Ordaz, A. Aguilar, J. Arboleda.
CRISIS, Program for computing seismic hazard. México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

[6] A. Taboada, L.A. Rivera, A. Fuenzalida, A. Cisternas, H. Philip, H. Bijwaard, J. Olaya, C. Rivera.
"Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia)". *Tectonics*. Vol 19, No. 5, 2000, pp. 787-813.

[7] G. Paris, M. Machette, R. Dart, K. Haller.
Map and database of quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions. United States Geological Survey (USGS), Open file report, 00-0284, 2000.

[8] J.N. Kellogg, V. Vega.
"Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: Constraints from global positioning system geodetic studies and gravity". *Geological Society of America*. Special Paper, 295, 1995, pp. 75-90.

[9] Proyecto Multinacional Andino.
"Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes". *Publicación geológica multinacional*, No.7, Canadá, 2009.

[10] A. Cornell
"Engineering Seismic Risk Analysis". *Bulletin Seismological Society of America*. Vol. 58, No. 5, October 1968, pp. 1583-1606.

[11] R. McGuire.
Seismic hazard and risk analysis. Oakland CA, USA: EERI, 2004, pp. 41-52.

[12] Campbell, K.W. (1997).
"Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 154-179.

[13] K. Campbell.
"Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo-absolute response spectra". *Seismological Research Letters*. Vol. 68, 1997, pp. 154-179.

[14] D. García, S. K. Singh, M. Herráiz, M. Ordaz and J. F. Pacheco.
"Inslab earthquakes of Central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra". *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 95, No. 6, December 2005, pp. 2272-2282.

[15] M. Gallego.
Estimación del Riesgo Sísmico en la República de Colombia. Tesis de Maestría, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.

[16] M. Ordaz.
Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.

[17] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
"Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10". Bogotá, Colombia: AIS, 2010.

[18] Comité AIS-300.
"Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009". Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010.

Recibido 29 de abril de 2010, aprobado 29 de octubre de 2010.