

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/263887709>

# IMPLICACIONES EN LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE BOGOTÁ COMO RESULTADO DE UNA NUEVA INTERPRETACIÓN SISMO-TECTÓNICA

Conference Paper · May 2013

---

CITATION

1

---

READS

23

4 authors:



[Daniela Zuloaga Romero](#)

Illinois Institute of Technology

20 PUBLICATIONS 32 CITATIONS

SEE PROFILE



[Mario A. Salgado-Gálvez](#)

Polytechnic University of Catalonia

40 PUBLICATIONS 56 CITATIONS

SEE PROFILE



[Omar Dario Cardona](#)

National University of Colombia

167 PUBLICATIONS 1,440 CITATIONS

SEE PROFILE



[Luis E. Yamin](#)

Los Andes University (Colombia)

52 PUBLICATIONS 183 CITATIONS

SEE PROFILE

## IMPLICACIONES EN LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE BOGOTÁ COMO RESULTADO DE UNA NUEVA INTERPRETACIÓN SISMO-TECTÓNICA.

Zuloaga D.<sup>1</sup>, Salgado M.A.<sup>2</sup>, Cardona O.D.<sup>3</sup> y Yamín L.E.<sup>4</sup>

### RESUMEN

El mapa de amenaza sísmica nacional de Colombia fue actualizado en 2010; sin embargo, una reciente interpretación tectónica que incluye una nueva fuente sismogénica denominada Caldas Tear ha sido tenida en cuenta para identificar los potenciales cambios en los resultados del riesgo sísmico para Bogotá. Se presentan los resultados de riesgo para la ciudad a partir de la consideración del modelo oficial (AIS) y alternativo (con la Caldas Tear) de sismo-tectónica usando un enfoque probabilista e incluyendo además los efectos de sitio, el inventario de elementos expuestos a nivel de resolución predio a predio y sus asociadas funciones de vulnerabilidad. Los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico fueron realizados utilizando los módulos de la plataforma CAPRA. Los resultados que se presentan son expresados en términos de pérdidas máximas probables (PML) para diferentes períodos de retorno y de pérdidas anuales esperadas (AAL) obtenidas a partir de la curva de excedencia de pérdidas (LEC); estas métricas se consideran como medidas de estado del arte para la evaluación probabilista de riesgo.

**Palabras claves:** Análisis de riesgo, riesgo sísmico, Bogotá

### ABSTRACT

The official seismic hazard map in Colombia was updated in 2010; however, a recent tectonic interpretation, which includes an additional seismic source called Caldas Tear has been taken into account to identify the potential change in the seismic risk results for Bogotá, the capital of Colombia. This paper presents the city's risk results obtained from the consideration of the current and alternative seismic-tectonic models, using a probabilistic approach, considering the local site effects, the inventory of exposed assets and their associated vulnerability functions. The hazard, vulnerability and risk analysis were conducted using the CAPRA platform modules. Results are expressed in terms of probable maximum losses (PML) and average annual losses (AAL) obtained from the loss exceedance probability curve (LEC); these metrics are considered state of the art metrics for probabilistic risk assessment.

**Keywords:** Risk assessment, seismic risk, Bogotá

El presente artículo hace parte de las memorias del Vi Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, organizado por la Universidad Industrial de Santander (UIS), UPB Seccional Bucaramanga y la Asociación de Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bucaramanga, 29 al 31 de mayo de 2013.

<sup>1</sup> Illinois Institute of Technology, [dzuloaga@hawk.iit.edu](mailto:dzuloaga@hawk.iit.edu)

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, [msalgado@cimne.upc.edu](mailto:msalgado@cimne.upc.edu)

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, [odcardonaa@unal.edu.co](mailto:odcardonaa@unal.edu.co)

<sup>4</sup> Universidad de los Andes, [lyamin@uniandes.edu.co](mailto:lyamin@uniandes.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

Últimamente los desastres naturales han atraído cada vez más la atención de la población debido a los efectos que éstos tienen en la sociedad, incluyendo tanto efectos físicos y económicos en la infraestructura como efectos directos sobre la población. En el caso particular de países en desarrollo, como Colombia, investigación relacionada con la evaluación de las amenazas y la mitigación de riesgos son elementos clave e indispensables para construir una necesaria cultura de la gestión del riesgo de desastres. Este artículo presenta un estudio probabilista de riesgo sísmico realizado para la ciudad de Bogotá D.C en el cual fue posible estimar las pérdidas físicas esperadas. Se utilizaron dos modelos de amenaza diferentes y se realizó una evaluación probabilista de riesgo para el portafolio completo de elementos expuestos de la ciudad, considerando efectos de sitio locales y funciones de vulnerabilidad para caracterizar el daño esperado en cada tipo estructural. Dado que se siguió una metodología probabilista, los resultados se expresaron en términos de pérdidas anuales esperadas y pérdidas máximas probables con diferentes períodos de retorno. Adicionalmente, con los resultados de ambos modelos de amenaza también fue posible calcular pérdidas globales y agrupadas de acuerdo al sistema estructural, el uso y la edad.

## METODOLOGÍA

Los modelos de amenaza y vulnerabilidad, y los cálculos de riesgo fueron realizados con la plataforma CAPRA, la cual permite realizar análisis multi-amenaza. La metodología empleada se compone de tres módulos de entrada y un módulo de resultados. La amenaza (sísmica en este caso), los elementos expuestos y su respectiva vulnerabilidad (ERN-AL, 2009a; 2009b; 2009c) son la entrada y el riesgo asociado a estos tres factores es el resultado. El programa CAPRA-GIS calcula las pérdidas económicas asociadas a los daños esperados en los elementos expuestos, basado en el valor de reposición de los mismos y las funciones de vulnerabilidad que relacionan la intensidad del movimiento sísmico con el porcentaje promedio de daño. Siguiendo esta metodología (CAPRA, 2012), el primer paso a seguir fue la construcción de una base de datos que caracteriza los elementos expuestos con una resolución a nivel de manzana. La información recopilada acerca de cada edificación incluye el sistema estructural, uso y fecha de construcción. Una vez se completó esta base de datos, se asignaron funciones de vulnerabilidad a cada sistema estructural identificado, proporcionando así un comportamiento en términos de daños esperados para cada tipo. A continuación se realiza una comparación de dos modelos de amenaza sísmica disponibles para Colombia, considerando los efectos de sitio a través del uso de funciones de transferencia espectrales tomadas del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá más reciente. Posteriormente, se realiza el cálculo de riesgo para ambos modelos de amenaza. La Figura 1 ilustra el procedimiento general de la metodología.

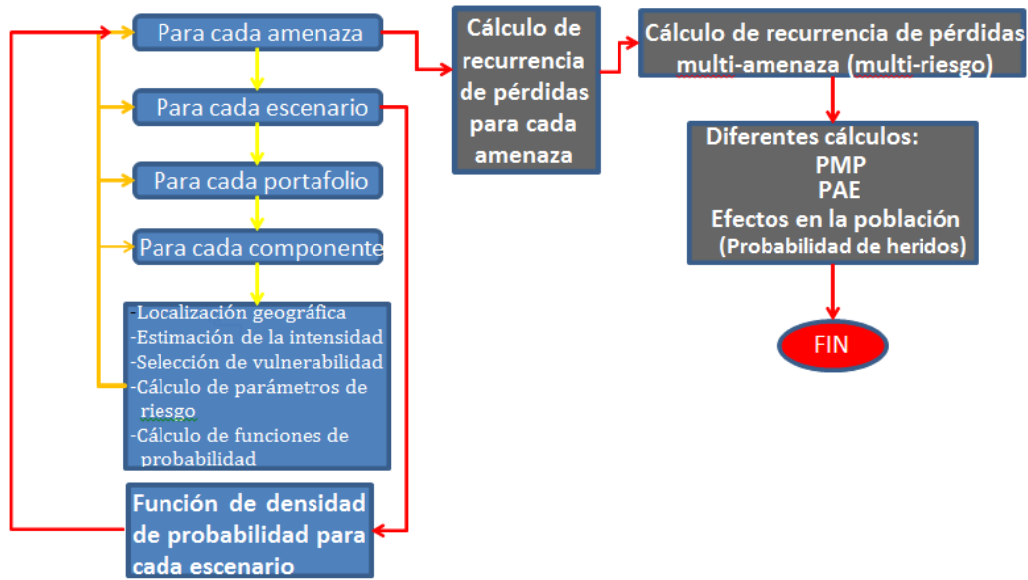


Figura 1. Metodología seguida para el análisis de riesgo (CAPRA, 2012)

## AMENAZA SÍSMICA

### Amenaza en roca

El objetivo de este trabajo es comparar los resultados de riesgo obtenidos para dos modelos de amenaza sísmica disponibles para Colombia. Uno de los modelos utilizados corresponde al modelo en roca incluido la Normas de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010; Salgado et al., 2010), mientras que el otro corresponde a una nueva interpretación tectónica para Colombia. Esta nueva interpretación considera una fuente sismogénica en sentido este-oeste a la altura de la ciudad de Manizales llamada Caldas Tear (Vargas y Mann, 2013; Salgado et.al, 2011). La inclusión de esta fuente en el modelo nacional de amenaza sísmica genera diferencias en el nivel de amenaza en el territorio; en algunos lugares este modelo resulta en un nivel de amenaza más bajo mientras que en otros resulta en niveles más altos. La Figura 2 muestra el cambio generado en el espectro de amenaza uniforme para un período de retorno de 475 años en la ciudad de Bogotá.

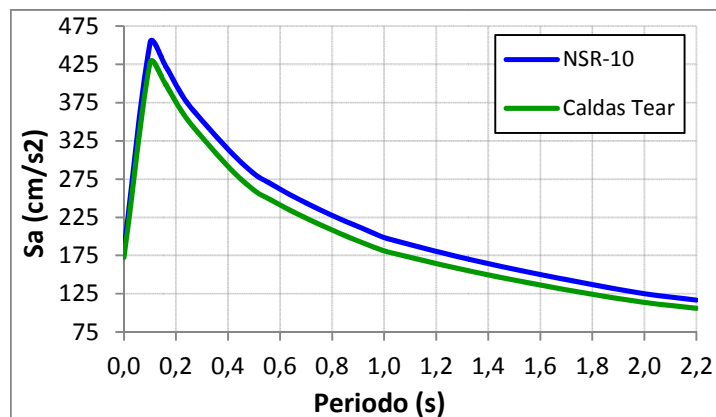


Figura 2. Espectro de amenaza uniforme para un período de retorno de 475 años para Bogotá (Salgado et al., 2011)

## Efectos de sitio

Además de los dos modelos de amenaza nacional en roca también se incluyeron los efectos de sitio locales de la ciudad. El estudio de microzonificación de Bogotá divide la ciudad en 45 zonas, cada una caracterizada por una función de transferencia espectral la cual considera cuatro niveles de intensidad, de manera que se tiene en cuenta el comportamiento inelástico del suelo. La consideración de los efectos de sitio es un aspecto clave para la ciudad de Bogotá dado que existe una presencia importante de suelos blandos, lo que puede generar efectos de amplificación (CEDERI-Universidad de los Andes, 2006). La Figura 3 presenta un ejemplo de tres zonas que corresponden a diferentes clases de suelo.

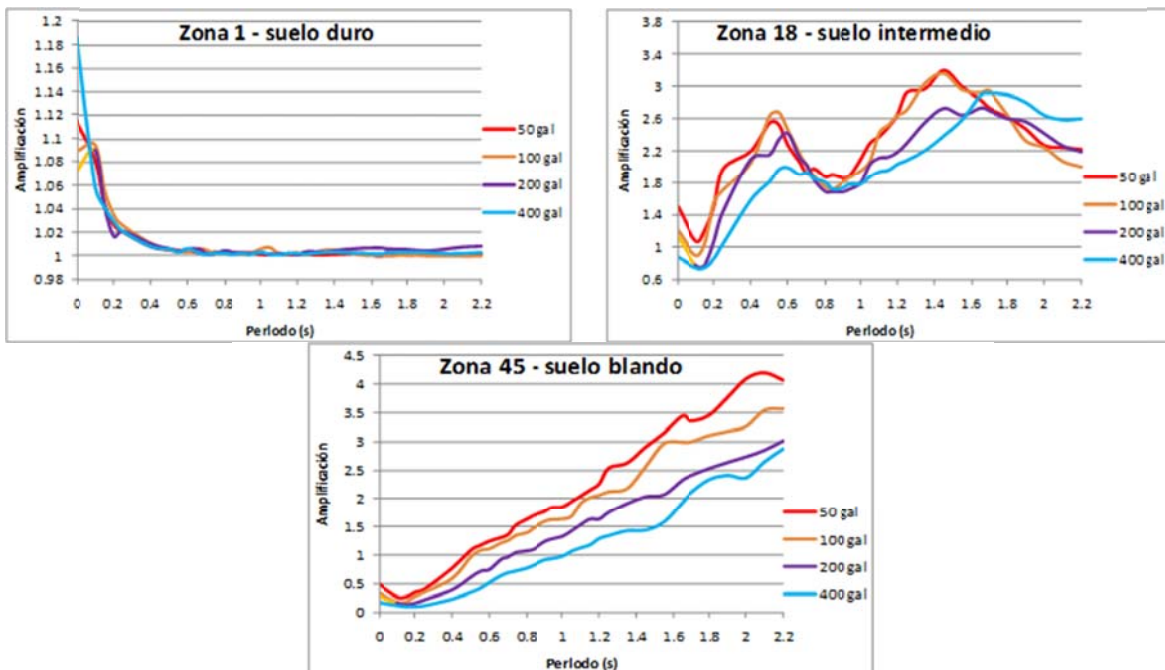


Figura 3. Funciones de transferencia para tres tipos de suelo: duro, intermedio y blando

## ELEMENTOS EXPUESTOS

El nivel de resolución disponible para los elementos expuestos es el nivel de manzana. Es necesario que la base de datos cuente con un mínimo de información acerca de los elementos expuestos para que la ciudad pueda ser caracterizada de forma adecuada. Esto es crucial en el sentido en que los resultados de riesgo que se obtienen describen únicamente la información que haya sido introducida como parte de la base de datos y el objetivo de este tipo de estudio es que los resultados proporcionen información pertinente y útil. Como mínimo es necesario conocer el valor de reposición y el tipo constructivo de los elementos. En este caso también se logró recolectar información del uso actual y la fecha de construcción.

### Valoración económica de los elementos expuestos

El valor económico de reposición de las edificaciones de la ciudad se encuentra agrupado a nivel de localidades y de manzanas, como se muestra en la Figura 4.

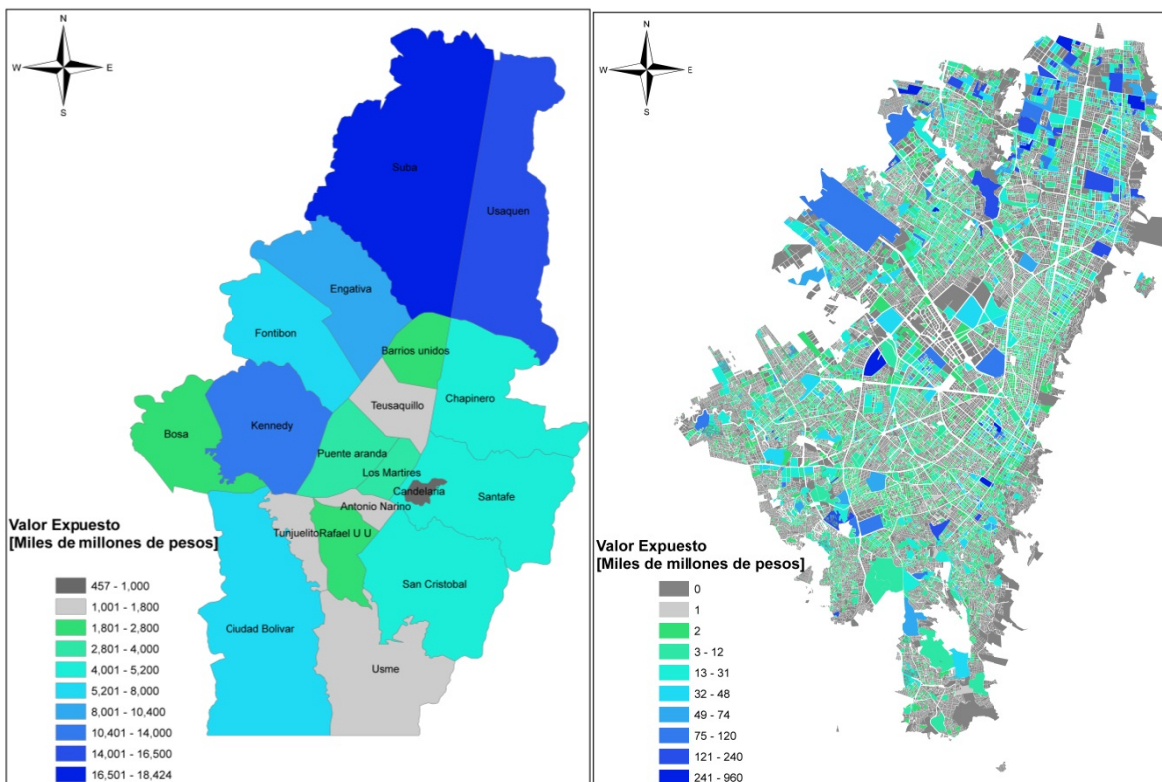


Figura 4. Izquierda: valor de reposición por localidad. Derecha: valor de reposición por manzana.

### Caracterización por sistema estructural

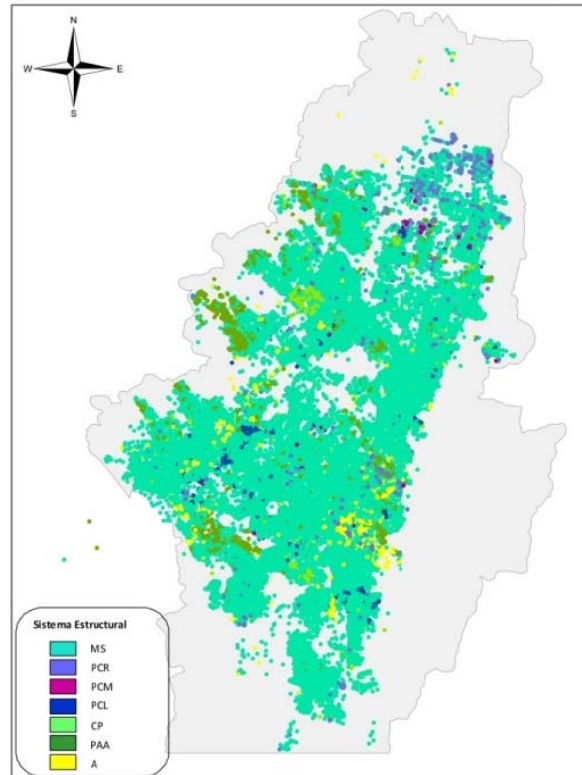
El portafolio completo fue agrupado en siete sistemas estructurales principales: mampostería, pórticos de concreto reforzado resistentes a momento, sistema dual en concreto, pórticos de concreto losa-columna, concreto prefabricado, pórticos en acero de cubierta ligera no rigidizada (construcciones industriales) y adobe. La Tabla 1 muestra la distribución de estos sistemas tanto en cantidad como en valor expuesto.

Tabla 1. Caracterización por sistema estructural

| Sistema Estructural                           | Código | Distribución |                            |             |
|---|--------|--------------|----------------------------|-------------|
|   |        | %            | Miles de millones de pesos | %           |
| Mampostería simple                            | MS     | 88%          | 42.451,4                   | 42%         |
| Pórticos concreto resistentes a momentos (RM) | PCR    | 4%           | 42.833,5                   | 43%         |
| Pórticos y muros concreto                     | PCM    | 0%           | 3.702,2                    | 4%          |
| Pórticos concreto losa columna                | PCL    | 1%           | 4.290,6                    | 4%          |
| Concreto prefabricado                         | CP     | 1%           | 398,2                      | 0%          |
| Industrial cubierta ligera, no rigidizada     | PAA    | 3%           | 6.125,6                    | 6%          |
| Adobe   | A      | 3%           | 514,54                     | 1%          |
| <b>Total</b>                                  | -      | <b>100%</b>  | <b>\$100.316,1</b>         | <b>100%</b> |



La Figura 5 ilustra la distribución espacial de esta categorización. Las construcciones de mampostería se encuentran distribuidas bastante uniformemente en toda la ciudad, lo que corresponde a construcciones de tipo residencial. Por otro lado, las construcciones de adobe están concentradas mayormente hacia el centro y sur de la ciudad, correspondiente al sector histórico y a las áreas más pobres de la ciudad. Ocurre lo opuesto con los pórticos de concreto reforzado RM los cuales están concentrados en los sectores nororientales de la ciudad, consecuente con el sector socio-económico más alto. Con respecto a los pórticos en acero correspondientes a las bodegas industriales, estos se encuentran en su mayoría en el centro y occidente de la ciudad.

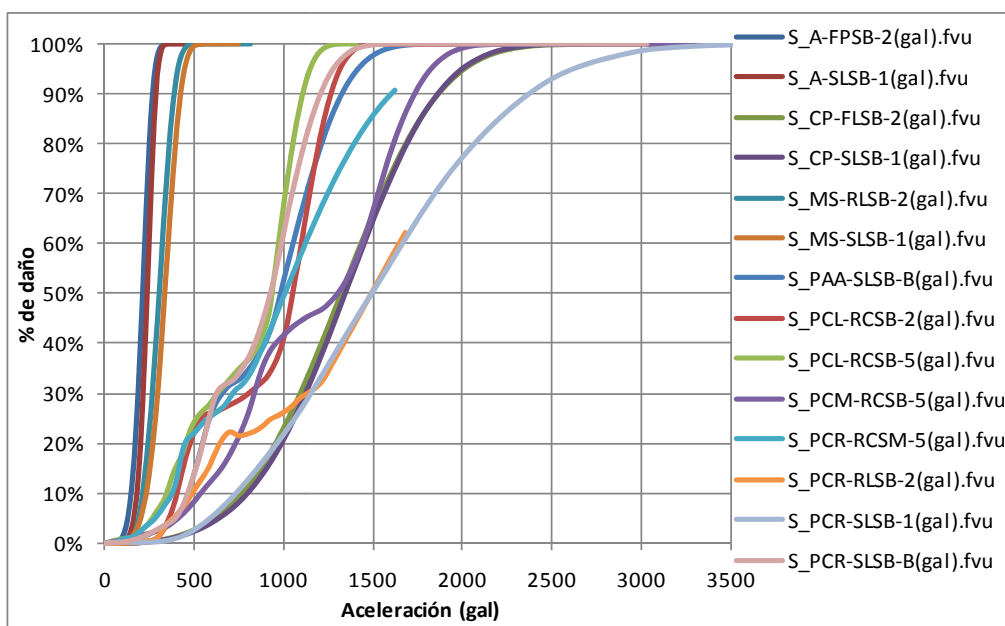


**Figura 5. Distribución de edificaciones por sistema estructural  
VULNERABILIDAD DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS**

Como se mencionó en previamente en la metodología, las funciones de vulnerabilidad relacionan la amenaza (en términos de intensidad, que en este caso es la aceleración espectral) con los elementos expuestos a través de las curvas asignadas individualmente de acuerdo al tipo constructivo. Para este trabajo se utilizaron 14 funciones diferentes, las cuales obedecen a los siete sistemas estructurales existentes y diferentes elevaciones, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Funciones de vulnerabilidad**

| Sistema Estructural                       | Código | # Pisos | Código de la curva |
|---|--------|---------|--------------------|
| Mampostería simple                        | MS     | 1       | MS-SLSB-1          |
|   |        | 2+      | MS-RLSB-2          |
| Pórticos concreto RM                      | PCR    | 1       | PCR-SLSB-1         |
|   |        | 2-4     | PCR-RLSB-2         |
|   |        | 3-5     | PCR-SLSB-B         |
|   |        | 5+      | PCR-RCSB-5         |
| Pórticos y muros concreto                 | PCM    | 5+      | PCM-RCSB-5         |
| Pórticos concreto losa columna            | PCL    | 1-4     | PCL-RCSB-2         |
|   |        | 5+      | PCL-RCSB-5         |
| Concreto prefabricado                     | CP     | 1       | CP-SLSB-1          |
|   |        | 2+      | CP-FLSB-2          |
| Industrial cubierta ligera, no rigidizada | PAA    | B       | PAA-SLSB-B         |
| Adobe                                     | A      | 1       | A-SLSB-1           |
|   |        | 2       | A-FPSB-2           |



**Figura 6. Curvas de vulnerabilidad utilizadas**

Como se puede observar en la Figura 6, existe una clara diferencia entre tres grandes grupos estructurales, los sistemas estructurales de concreto, la mampostería y el adobe, siendo éste último el más susceptible a sufrir daños. Para una aceleración aproximada de  $500 \text{ cm/s}^2$  la mampostería y el adobe alcanzan un daño del 100%, mientras que los sistemas en concreto alcanzan únicamente el 25% en el peor de los casos.

### RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de riesgo sísmico. Cabe resaltar que éstos consideran el conjunto completo de escenarios estocásticos generados en la



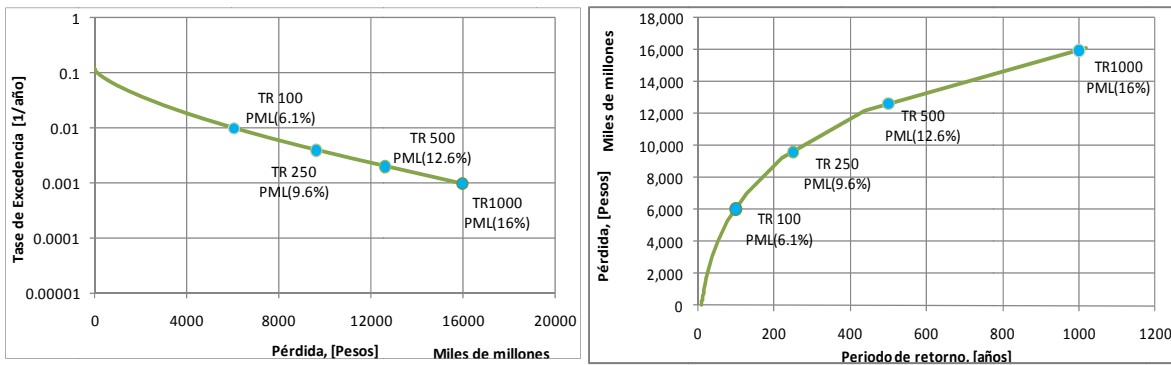
amenaza sísmica y la malla de efectos de sitio. Los resultados se presentan para diferentes niveles de resolución y en términos de pérdidas esperadas. También se presenta la comparación entre los dos modelos de amenaza: el modelo incluido en las Normas de Construcción (NSR-10) y el modelo que incluye una fuente adicional (Caldas Tear).

### Resultados con el modelo de la NSR-10

La Tabla 3 y la Figura 7 muestran los resultados generales obtenidos. Estos incluyen la pérdida anual esperada (PAE) tanto en términos monetarios absolutos como en términos relativos, y los valores de las pérdidas máximas probables (PMP) para diferentes períodos de retorno también expresados en términos absolutos y relativos. La PAE es de aproximadamente 252 mil millones de pesos que corresponden al 2.5‰ del valor total expuesto y al 0.18% del PIB de la ciudad en el 2010 (DANE, 2011).

**Tabla 3. Resultados para el modelo de la NSR-10**

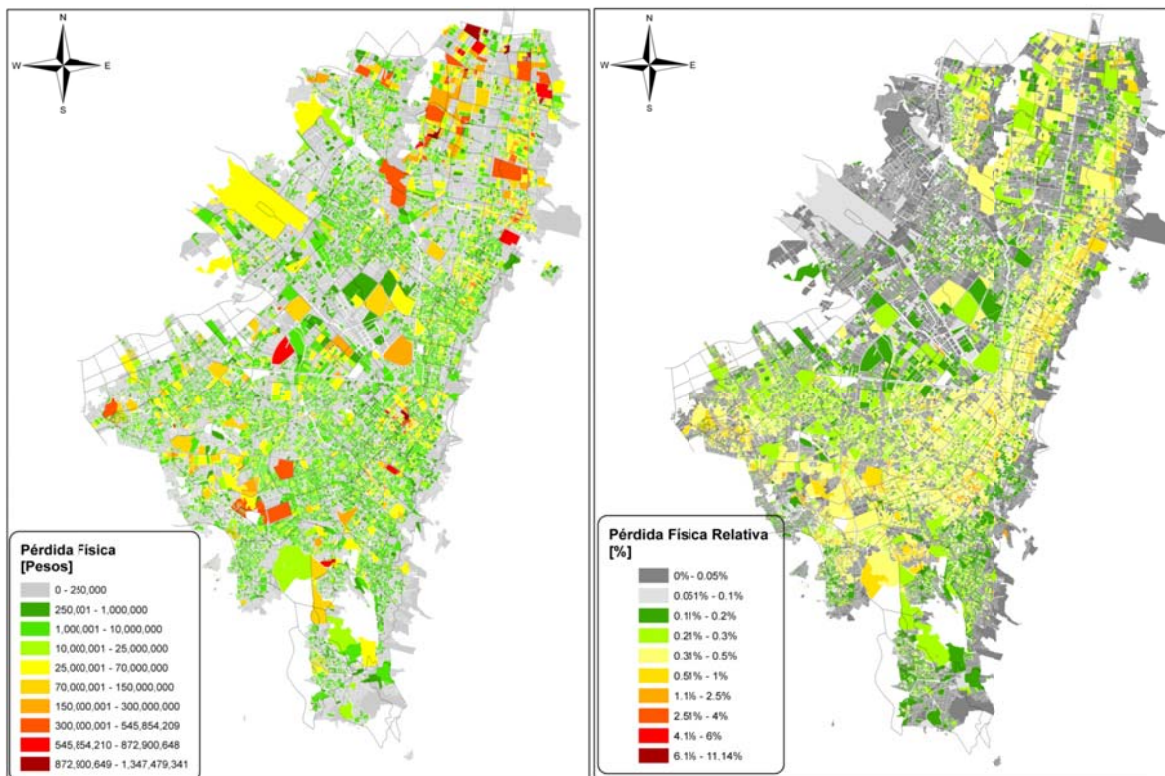
| Resultados             |                          |             |
|------------------------|--------------------------|-------------|
| Valor Expuesto         | Pesos\$ x10 <sup>6</sup> | 100,316,000 |
| Pérdida anual esperada | Pesos\$ x10 <sup>6</sup> | 252,350,3   |
|                        | ‰                        | 2.516       |
| PML                    |                          |             |
| Periodo retorno        | Pérdida                  |             |
| años                   | Pesos\$ x10 <sup>6</sup> | %           |
| 100                    | \$6,041,077.6            | 6.02        |
| 250                    | \$9,617,823.3            | 9.59        |
| 500                    | \$12,623,800.9           | 12.58       |
| 1000                   | \$15,970,367.4           | 15.92       |



**Figura 7. Izquierda: Curva de Excedencia de Pérdidas. Derecha: Curva de PMP (NSR-10)**

La Figura 8 presenta las pérdidas esperadas por manzanas expresadas primero en términos absolutos (millones de pesos) y segundo en términos relativos (porcentaje de pérdida con respecto al valor de reposición). En el mapa de pérdidas absolutas los valores más altos (rojo) se encuentran hacia el norte de la ciudad en las zonas de estratos más altos. Sin embargo, este mapa individualmente no es suficiente para identificar sectores críticos, razón por la cual es necesario ilustrar las pérdidas relativas al valor expuesto. Como se puede ver en el mapa de pérdidas relativas la distribución de colores cambia significativamente, indicando que las pérdidas relativas

más altas ocurren hacia el sur de la ciudad, donde se encuentran los sectores más pobres y de construcciones más vulnerables. Estos mapas muestran el hecho de que a pesar de que se espera que el sector norte tenga las pérdidas económicas más grandes. Estas se deben principalmente a que las construcciones de este sector tienen un valor expuesto alto y, en realidad, las pérdidas no representan un valor relativo elevado. En el sur ocurre lo opuesto: a pesar de que las pérdidas son las más bajas, los elementos expuestos tienen un valor muy bajo y por lo tanto las pérdidas representan un alto valor relativo. Este análisis proporciona un panorama más claro de la situación real de la ciudad: las áreas verdaderamente vulnerables son aquellas con tasas de pérdida/valor expuesto más altas, las cuales se concentran en el centro y sur de la ciudad.



**Figura 8. Pérdidas económicas por manzanas (NSR-10). Izquierda: en pesos. Derecha: en porcentaje del valor de reposición.**

#### *Resultados por uso.*

Los resultados generales fueron agrupados por sistema estructural para así identificar el comportamiento de cada tipo. Este análisis indica que las edificaciones de uso residencial son las que concentran el mayor valor de reposición, el mayor valor absoluto de pérdida y el mayor valor relativo de pérdida. Por otro lado, el sector comercial representa el segundo mayor valor expuesto y valor absoluto de pérdida, pero tiene uno de los valores de pérdida relativos más bajos; después del sector institucional y de salud. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4. Resultados por uso (NSR-10)**

| Uso           | Distribución | Valor Expuesto             |             | Pérdida                    |             |             |
|---------------|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|
|               | [%]          | Miles de millones de pesos | %           | Miles de millones de pesos | [%o]        | %           |
| Comercial     | 2.6%         | 11,636.4                   | 11.6%       | 24.3                       | 2.09        | 9.6%        |
| Educación     | 0.4%         | 1,666.7                    | 1.7%        | 3.9                        | 2.34        | 1.5%        |
| Industrial    | 2.3%         | 4,031.4                    | 4.0%        | 6.8                        | 1.68        | 2.7%        |
| Institucional | 1.2%         | 6,605.7                    | 6.6%        | 15.8                       | 2.39        | 6.2%        |
| Salud         | 0.0%         | 439.8                      | 0.4%        | 0.74                       | 1.69        | 0.3%        |
| Residencial   | 86.1%        | 70,112.3                   | 69.9%       | 187.4                      | 2.67        | 74.3%       |
| Otros         | 7.5%         | 5,823.9                    | 5.8%        | 13.5                       | 2.32        | 5.3%        |
| <b>TOTAL</b>  | <b>100%</b>  | <b>\$100,316.1</b>         | <b>100%</b> | <b>\$252.35</b>            | <b>2.52</b> | <b>100%</b> |

*Resultados por sistema estructural*

Un análisis similar con respecto a los sistemas estructurales indica que los pórticos de concreto RM representan el mayor valor expuesto y pérdida absoluta, a pesar de que en cantidad éstos representan un porcentaje pequeño y la pérdida relativa es de las bajas. Por otro lado, las construcciones de mampostería representan el 88% de toda la exposición y por ende concentran el segundo mayor valor expuesto y pérdida absoluta. Con respecto a las pérdidas relativas, los pórticos de concreto MR, pórticos losa-columna, sistemas duales y la mampostería tienen valores medios, mientras que el valor más bajo corresponde al concreto prefabricado y los pórticos ligeros en acero, y el valor más elevado corresponde al adobe con un valor significativamente mayor a los demás sistemas. La Tabla 5 muestra estos resultados.

**Tabla 5. Resultados por sistema estructural (NSR-10)**

| Sistema Estructural                       | Distribución | Valor Expuesto             |             | Pérdida Esperada           |            |             |
|---|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|------------|-------------|
|   | %            | Miles de millones de pesos | %           | Miles de millones de pesos | [%o]       | %           |
| Mampostería simple                        | 88%          | 42.451,4                   | 42%         | 91,8                       | 2,2        | 36%         |
| Pórticos concreto RM                      | 4%           | 42.833,6                   | 43%         | 123,6                      | 2,9        | 49%         |
| Pórticos y muros concreto                 | 0%           | 3.702,2                    | 4%          | 7,97                       | 2,2        | 3%          |
| Pórticos concreto losa columna            | 1%           | 4.290,6                    | 4%          | 12,9                       | 3,0        | 5%          |
| Concreto prefabricado                     | 1%           | 398,2                      | 0%          | 0,26                       | 0,7        | 0%          |
| Industrial cubierta ligera, no rigidizada | 3%           | 6.125,6                    | 6%          | 9,5                        | 1,5        | 4%          |
| Adobe                                     | 3%           | 514,5                      | 1%          | 6,3                        | 12,3       | 3%          |
| <b>Total</b>                              | <b>100%</b>  | <b>\$100.316,1</b>         | <b>100%</b> | <b>\$252,35</b>            | <b>2,5</b> | <b>100%</b> |

### Resultados por fecha de construcción

La Tabla 6 muestra los resultados por fecha de construcción de los elementos expuestos. En este caso se han definido tres grupos para diferenciar las prácticas de construcción que se han dado a raíz de las ediciones de la norma de construcción sismo resistente en Colombia:

Hasta 1983: período anterior a la publicación de la primera normativa de construcción sismo resistente en Colombia.

1984-1998: período de vigencia de la norma sismo resistente CCCSR-84.

1998-2008: período de vigencia de la norma sismo resistente NSR-98.

Las edificaciones construidas antes de 1984 representa la mayoría con un 43%, sin embargo, el mayor valor expuesto y pérdida le pertenece al período entre 1984 y 1998 (37% y 37% respectivamente) dado que el valor de las edificaciones del primer grupo no es tan alto. Con respecto a las pérdidas relativas, el valor más alto sí corresponde al período hasta 1983 (2.71) seguido del período 1984-1998 (2.52) y finalmente el período 1998-2008 (2.37). Estos resultados están acorde con lo esperado, considerando que hasta 1984 no existía un código de construcción sismo resistente y en consecuencia las edificaciones no contaban con las medidas apropiadas.

**Tabla 6. Resultados por fecha de construcción (NSR-10)**

| Fecha de construcción | Distribución | Valor Expuesto             |             | Pérdida                    |             |             |
|-----------------------|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|
|                       | [%]          | Miles de millones de pesos | %           | Miles de millones de pesos | [‰]         | %           |
| 1900-1983             | 41%          | 27.133,2                   | 27%         | 73.5                       | 2,71        | 29%         |
| 1984-1998             | 36%          | 37.310,8                   | 37%         | 93.9                       | 2,52        | 37%         |
| 1999-2008             | 23%          | 35.872,1                   | 36%         | 85                         | 2,37        | 34%         |
| <b>TOTAL</b>          | <b>100%</b>  | <b>\$100.316,1</b>         | <b>100%</b> | <b>\$252.35</b>            | <b>2,52</b> | <b>100%</b> |

### Resultados con el modelo de Caldas Tear

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el modelo de Caldas Tear. Estos se presentan de la misma manera en que fueron presentados en la sección anterior. Para este modelo las pérdidas totales son en general menores a las obtenidas para el modelo de la NSR-10. En este caso la PAE es de aproximadamente \$194 miles de millones de pesos o el 1.9‰ del valor expuesto. Si se compara este valor con el PIB de Bogotá del 2010 éste representa el 0.14% (DANE 2011). Adicionalmente se espera que ocurran pérdidas del 4.9% un promedio de 0,01 veces al año, del 8.1% aproximadamente 0.004 veces al año, del 10.9% 0,002 veces al año y del 13.9% 0.001 veces al año. Estos valores ilustran la frecuencia con la que se espera que ocurran distintos valores de pérdidas, y se resumen en la Tabla 7 y la Figura 9.

Tabla 7. Resultados generales para el modelo Caldas Tear

| Resultados             |                          |             |
|------------------------|--------------------------|-------------|
| Valor Expuesto         | Pesos\$ x10 <sup>6</sup> | 100.316.000 |
| Pérdida anual esperada | Pesos\$ x10 <sup>6</sup> | 194.005,88  |
|                        | ‰                        | 1,934       |
| PML                    |                          |             |
| Periodo retorno        | Pérdida                  |             |
| años                   | Pesos\$ x10 <sup>6</sup> | %           |
| 100                    | \$4,921,600              | 4.91        |
| 250                    | \$8,102,421.56           | 8.08        |
| 500                    | \$10,958,365.,58         | 10.92       |
| 1000                   | \$13,973,153.67          | 13.93       |

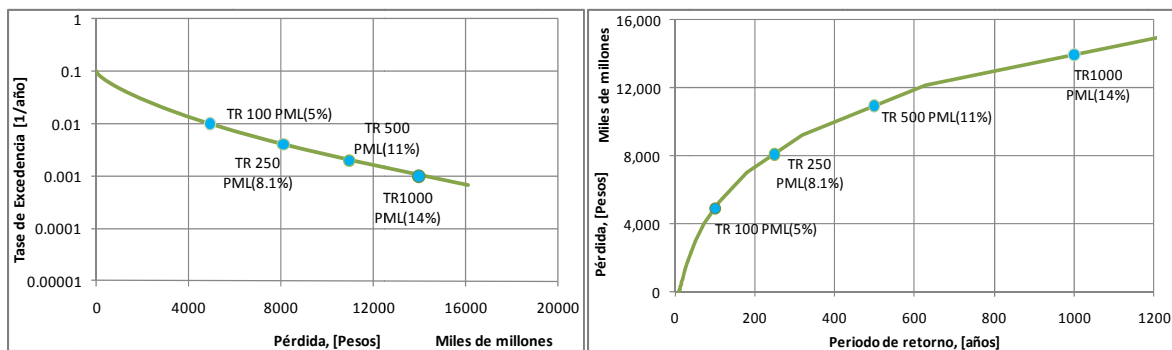


Figura 9. Izquierda: curva de excedencia de pérdidas. Derecha: curva de PMP. (Caldas Tear)

La Figura 10 presenta las pérdidas esperadas por manzanas, expresadas en términos absolutos y relativos. Estos mapas muestran la misma distribución espacial de pérdidas que se vio en los resultados del modelo NSR-10; sin embargo, ambos mapas tienen en general valores de pérdida menores (nótese que la escala es la misma que la de la Figura 8).



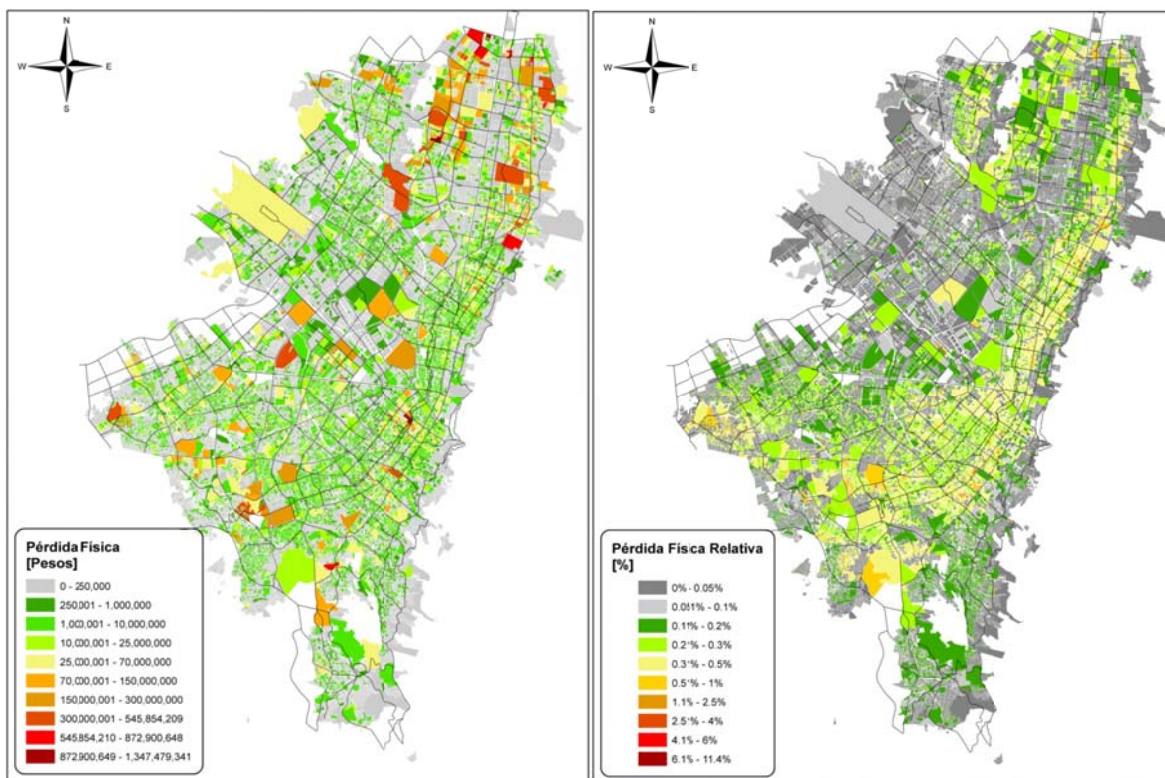


Figura 10. Pérdidas esperadas por manzanas para el modelo de Caldas Tear. Izquierda: en pesos. Derecha: en términos relativos.

Resultados agrupados por uso y por sistema estructural.

A continuación se presentan las tablas resumen de los resultados de este modelo agrupados en las tres categorías de la misma manera que para el modelo de la NSR-10.

Tabla 8. Resultados por uso (Caldas Tear)

| Uso           | Distribución | Valor Expuesto             |             | Pérdida                    |             |             |
|---------------|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|
|               | [%]          | Miles de millones de pesos | %           | Miles de millones de pesos | [%]         | %           |
| Comercial     | 2,6%         | 11.636,4                   | 11,6%       | 18,7                       | 1,61        | 9,6%        |
| Educación     | 0,4%         | 1.666,7                    | 1,7%        | 3,05                       | 1,83        | 1,6%        |
| Industrial    | 2,3%         | 4.031,4                    | 4,0%        | 4,95                       | 1,23        | 2,6%        |
| Institucional | 1,2%         | 6.605,7                    | 6,6%        | 12,03                      | 1,82        | 6,2%        |
| Salud         | 0,0%         | 439,8                      | 0,4%        | 0,55                       | 1,26        | 0,3%        |
| Residencial   | 86,1%        | 70.112,3                   | 69,9%       | 144,2                      | 2,06        | 74,3%       |
| Otros         | 7,5%         | 5.823,9                    | 5,8%        | 10,5                       | 1,81        | 5,4%        |
| <b>TOTAL</b>  | <b>100%</b>  | <b>\$100.316,1</b>         | <b>100%</b> | <b>\$194,0</b>             | <b>1,93</b> | <b>100%</b> |



**Tabla 9. Resultados por sistema estructural (Caldas Tear).**

| Sistema Estructural                       | Distribución | Valor Expuesto             |             | Pérdida                    |             |             |
|---|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|
|   | %            | Miles de millones de pesos | %           | Miles de millones de pesos | [%o]        | %           |
| Mampostería simple                        | 88%          | 42.451,4                   | 42%         | 74,4                       | 1,8         | 38%         |
| Pórticos concreto RM                      | 4%           | 42.833,5                   | 43%         | 91,8                       | 2,1         | 47%         |
| Pórticos y muros concreto                 | 0%           | 3.702,2                    | 4%          | 5,97                       | 1,6         | 3%          |
| Pórticos concreto losa columna            | 1%           | 4.290,6                    | 4%          | 9,6                        | 2,2         | 5%          |
| Concreto prefabricado                     | 1%           | 398,2                      | 0%          | 0,19                       | 0,5         | 0%          |
| Industrial cubierta ligera, no rigidizada | 3%           | 6.125,6                    | 6%          | 6,9                        | 1,1         | 4%          |
| Adobe                                     | 3%           | 514,5                      | 1%          | 5,1                        | 10,0        | 3%          |
| <b>Total</b>                              | <b>100%</b>  | <b>\$100.316,1</b>         | <b>100%</b> | <b>\$194,0</b>             | <b>1,93</b> | <b>100%</b> |

**Tabla 10. Resultados por fecha de construcción (Caldas Tear).**

| Fecha de construcción | Distribución | Valor Expuesto             |             | Pérdida                    |             |             |
|-----------------------|--------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|
|                       | [%]          | Miles de millones de pesos | %           | Miles de millones de pesos | [%o]        | %           |
| 1900-1983             | 41%          | 27.133,2                   | 27%         | 57,7                       | 2,12        | 30%         |
| 1984-1998             | 36%          | 37.310,8                   | 37%         | 71,8                       | 1,93        | 37%         |
| 1999-2008             | 23%          | 35.872,1                   | 36%         | 64,5                       | 1,80        | 33%         |
| <b>TOTAL</b>          | <b>100%</b>  | <b>\$100.316,1</b>         | <b>100%</b> | <b>\$194,0</b>             | <b>1,93</b> | <b>100%</b> |

## CONCLUSIONES

En este estudio se estimó el riesgo sísmico en términos probabilistas para la ciudad de Bogotá, Colombia, considerando dos modelos de amenaza a nivel nacional. Como resultado, el riesgo calculado fue expresado en términos de pérdidas económicas esperadas y las métricas comúnmente utilizadas en análisis probabilistas, como lo son la pérdida anual esperada (PAE) y las pérdidas máximas probables (PMP) para diferentes períodos de retorno.

Después de analizar los dos modelos de amenaza se encontró que el nivel de amenaza para la ciudad según el modelo con la fuente adicional de Caldas Tear es menor que el dado por el modelo de la NSR-10. En consecuencia el análisis de riesgo arrojó también resultados en términos de pérdidas generalizadas menores con el modelo del Caldas Tear. Este hecho se vio reflejado en las métricas de riesgo utilizadas: PAE del 1.93‰ versus 2.52‰, PMP para 475 años de período de retorno del 11% versus 12% y PMP para 1000 años de período de retorno del 13.9% versus 15.9%.

Con respecto a los resultados obtenidos al agrupar el portafolio de exposición por uso, sistema estructural y fecha de construcción se pudieron analizar distintas perspectivas. Entre los seis diferentes sectores el sector residencial representa el valor de reposición y valor relativo de pérdida más alto. De los siete sistemas estructurales identificados el adobe concentra la pérdida relativa más alta (a pesar de que este sistema representa la minoría de construcciones en la ciudad) seguido de los pórticos de concreto losa-columna y la mampostería. Finalmente, de los

tres períodos de fecha de construcción analizados el período anterior a 1984 tiene el menor valor expuesto pero el valor de pérdida relativo más alto.

Al analizar los resultados del punto de vista espacial en la ciudad se pudieron observar ciertos patrones. Los sectores del centro (hacia el oriente) y el sur concentran el mayor riesgo de la ciudad debido a una combinación de sistemas estructurales y fechas de construcción que generan condiciones de vulnerabilidad importantes para estas áreas: el adobe es común en el centro histórico y en el sur, donde también se encuentran la mayoría de edificaciones construidas antes de 1984. Por otro lado, en el norte de la ciudad las construcciones tienen fechas de construcción mucho más recientes dado que precisamente es hacia este sector donde la ciudad se ha expandido en los últimos años, contando así con mejores prácticas constructivas y un riesgo menor.

## REFERENCIAS

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). (2010a), “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10”, Bogotá, Colombia.

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). (2010b), “Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia”, Comité AIS-300, Bogotá, Colombia.

CAPRA (Probabilistic Risk Assessment Initiative). (2012). Available at <http://www.ecapra.org/>

CEDERI-Universidad de los Andes. (2006), “Capítulo 5: Microzonificación sísmica y espectros de diseño. Innovación e investigación tendientes a la actualización de la información sísmica de la Ciudad de Bogotá”, Bogotá, Colombia.

DANE. (2011). “Cuentas Nacionales Departamentales” 2010pr. Retrieved on november 25, 2011 from [http://www.dane.gov.co/#twoj\\_fragment1-4](http://www.dane.gov.co/#twoj_fragment1-4)

ERN-AL (Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina). (2009)a, “Informe Técnico ERNCAPRA-T1-3: Modelos de evaluación de amenazas naturales y selección”, Nicaragua Tomo I: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

ERN-AL (Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina). (2009)b, “Informe Técnico ERNCAPRA- T1-5: Vulnerabilidad de Edificaciones e Infraestructura”, Nicaragua Tomo I: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

ERN-AL (Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina). (2009)c, “Informe Técnico ERNCAPRA- T1-3: Metodología de Análisis Probabilista del Riesgo”, Nicaragua Tomo I: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

Salgado, M.A., Bernal, G.A., Cardona, O.D., Yamín, L.E. (2010), “Evaluación Probabilista y Espectral de la Amenaza Sísmica de Colombia: Estudio General con fines de diseño sismo resistente”, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Salgado, M.A., Bernal, G.A., Cardona, O.D., Yamín, L.E. (2011). “Seismic hazard of Colombia including the Caldas Tear, Comparison to the 2009 Colombian Seismic hazard map”.



Vargas C.A. y Mann P. (2013). “Tearing and breakoff of subducted slabs as the result of collision of the Panama arc indenter with northwestern South America”. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 103, No. 3.