

MODELO DE EXPOSICIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO CATASTRÓFICO DE SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA

EXPOSURE MODEL FOR CATASTROPHIC RISK ASSESSMENT OF SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA

C. YEPES-ESTRADA¹, A.B. ACEVEDO², J. ARENAS³, H. PÉREZ⁴, A. CALDERÓN⁵, D. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ⁶

¹ GEM Foundation, Physical Risk Analyst, Pavia (Italy), catalina.yepes@globalquakemodel.org

² Universidad EAFIT, Profesor Titular de Ingeniería Civil, Medellín, aaceved14@eafit.edu.co

³ Universidad Cooperativa de Colombia, Profesora de Ingeniería Civil, Medellín, juliana.arenasg@campusucc.edu.co

⁴ Servicio Geológico Colombiano, Ingeniero de Riesgo Sísmico, Bogotá, hjperez@sgc.gov.co

⁵ GEM Foundation, Physical Risk Analyst, Pavia (Italy), alejandro.calderon@globalquakemodel.org

⁶ Universidad EAFIT, Estudiante de Doctorado en Ingeniería, Medellín, dgonza26@eafit.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta un modelo de exposición (inventario de edificios y habitantes) para la ciudad de Santiago de Cali, Colombia, que puede utilizarse junto con modelos de múltiples amenazas naturales y tecnológicas, y modelos de vulnerabilidad física y social, en el análisis de riesgo catastrófico. Como paso inicial para el desarrollo se complementó la geodatabase usada en estudios previos realizados por la Alcaldía de Cali con información catastral actualizada (abril 2021). Con esta información se estimaron 349 mil edificios con más de 2 millones de habitantes (censo 2018). Posteriormente se asignó la tipología constructiva de las edificaciones, que permite asociar su vulnerabilidad física. Para la clasificación de las edificaciones se usó el número de pisos, estrato socioeconómico, tipo de uso y año de construcción (relacionado con la ductilidad). Se usó como referencia información de 25,641 encuestas a edificaciones de la ciudad para relacionar las variables consideradas con tipologías constructivas definidas según el material, sistema de resistencia a cargas laterales y ductilidad. Para incorporar la incertidumbre epistémica asociada a la metodología propuesta, se generaron cuatro modelos de exposición a partir de esquemas de clasificación (criterio de expertos) que relacionan las variables de la base de datos con la tipología constructiva. Los modelos resultantes contienen entre 5,564 y 6,200 clases de edificaciones e indican que las tipologías dominantes son la mampostería confinada (51-63% de los edificios) y no reforzada (25-39%). Para el uso del modelo –disponible al público– es decisión del analista cómo incorporar la incertidumbre asociada utilizando cada esquema generado como una opción viable, o utilizando directamente el inventario y asignando la vulnerabilidad aleatoriamente, según los pesos asignados en los esquemas de clasificación definidos por cada experto.

Palabras clave: exposición; riesgo sísmico; tipología constructiva; inventario de edificios.

1. Introducción

Santiago de Cali es la ciudad del suroccidente colombiano de mayor importancia. Es el centro urbano más grande conectado al puerto de Buenaventura en la costa pacífica y al centro de producción industrial de Yumbo. Actualmente alberga cerca del 5% de la población nacional, la mitad de la población del departamento Valle del Cauca y es una de las economías de mayor crecimiento en el país. De acuerdo con estadísticas oficiales [1], [2] Cali pasó de tener 2.11 millones de habitantes en el año 1999 a 2.46 millones en el 2020. De estos, 2.45 millones (98%) se encuentran dentro del perímetro urbano de la ciudad, distribuidos en 22 divisiones administrativas llamadas Comunas y 335 unidades barriales. En las zonas rurales habitan aproximadamente 37 mil habitantes en 15 divisiones administrativas denominadas Corregimientos y 84 veredas. De acuerdo con el Atlas de Riesgo de Colombia [3] las principales amenazas en el Valle del Cauca son los terremotos y las inundaciones.

Para realizar una evaluación de riesgo es necesario contar con tres componentes: la exposición, la amenaza y la vulnerabilidad. Un modelo de exposición describe, de la forma más detallada posible, los elementos que se encuentran amenazados por fenómenos naturales potencialmente destructivos, tales como terremotos, huracanes o inundaciones. El modelo de exposición describe cualitativa y cuantitativamente las características de los elementos expuestos, los cuales pueden ser edificios residenciales, escuelas, hospitales, puentes, entre otros. Para determinar el potencial estado de riesgo, cada elemento del modelo de exposición debe analizarse a la luz de su vulnerabilidad física frente a la amenaza ante la cual se encuentra expuesto.

2. Metodología

2.1 Estudio y análisis de información existente

El Departamento Administrativo de Planeación Municipal (DAPM) de la ciudad ha liderado el desarrollo del modelo de exposición para la ciudad mediante el proyecto "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo por sismos en la zona urbana del Municipio Santiago de Cali", desarrollado en dos etapas. En la Etapa I el modelo de exposición se enfocó en caracterizar una zona piloto de 290 hectáreas y se realizaron inspecciones en sitio a 4,937 edificaciones; se caracterizaron las tipologías constructivas representativas y se dejaron guías metodológicas para extender el modelo a nivel municipal. En la Etapa II se realizó el modelo de las edificaciones de ocupación normal (grupo de uso I según el reglamento NSR-10[4]) con cobertura municipal y se realizaron 24,543 inspecciones. Otras iniciativas paralelas para el desarrollo de un modelo de exposición para la ciudad incluyen el trabajo de Acevedo et al. [5], donde se utilizó el área de construcción en planta de las edificaciones, estratos socioeconómicos y la estimación estadística del número de viviendas para determinar el número de edificaciones, ocupantes y costos de reposición para la ciudad. Este estudio identificó más de 50 tipologías constructivas.

Como punto de partida para el modelo de exposición desarrollado en el presente trabajo se utilizó la geodatabase de edificaciones resultado de la Etapa II, en combinación con la base de datos de catastro (abril 2021), los resultados de materiales de construcción y población según el censo de población y vivienda [1], así como capas geo-referenciadas de la ciudad con información sobre estrato socioeconómico y uso de las edificaciones [2]. Se identificaron cuatro variables como punto de partida para la clasificación de las edificaciones: estrato socioeconómico, rango de alturas, uso de la edificación y período de construcción. La Figura 1 presenta la distribución espacial de las variables seleccionadas.



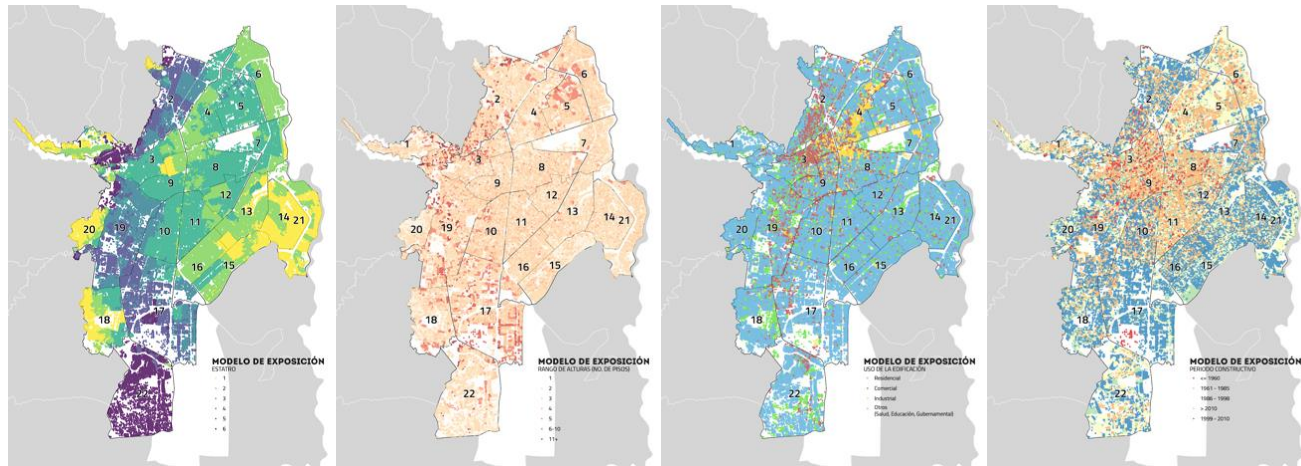


Fig. 1. Distribución espacial de variables utilizadas para el desarrollo del modelo de exposición. De izquierda a derecha: estrato socioeconómico, rango de alturas, uso de la edificación y periodo de construcción.

2.2 Análisis de encuestas de edificaciones de la ciudad y definición de tipologías constructivas

Se homogenizaron y depuraron las encuestas realizadas en las edificaciones de la ciudad durante los estudios de las Etapas I y II, obteniendo un total de 29,404 encuestas (filtradas). La información de ambas etapas se homogenizó considerando como referencia las cuatro variables seleccionadas para el análisis. Tanto las encuestas como los estudios previos en la ciudad indican que las edificaciones en mampostería son la tipología predominante: la mampostería confinada es la práctica más común, seguida por la mampostería semiconfinada o no reforzada. El concreto reforzado se emplea principalmente en edificios de apartamentos, aunque también se registran casos particulares de casas unifamiliares de concreto prefabricado. Otros tipos de materiales son poco usados en la zona urbana. Para caracterizar de forma más precisa la capacidad de resistir cargas laterales de las edificaciones, se definió su nivel de ductilidad según el año de construcción y la tasa de informalidad en la construcción en la ciudad. Se utilizaron las normas de diseño y construcción sismo resistentes del país para definir el grado de ductilidad según el periodo constructivo, dado que la ciudad se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta.

2.3 Esquemas de clasificación

Los esquemas de clasificación, mapeo o “*mapping schemes*”, categorizan las edificaciones de una zona a través de variables de referencia y la opinión de expertos, asignando una o múltiples tipologías constructivas que posteriormente podrán relacionarse con un nivel de vulnerabilidad física. Yepes-Estrada et al. [6] presenta de forma detallada cómo estos esquemas pueden generarse y aplicarse a diferentes resoluciones espaciales. Dada la naturaleza de estos esquemas, existe una incertidumbre asociada que depende en gran medida de las variables de entrada y de la información disponible para realizar la clasificación. Para incorporar la incertidumbre epistémica asociada a la metodología propuesta, se generaron cuatro modelos de exposición a partir de esquemas de clasificación que relacionan las cuatro variables de la base de datos, previamente

definidas, con la tipología constructiva. Los modelos resultantes contienen entre 5,564 y 6,200 clases de edificaciones en la ciudad.

2.4 Costos de reposición

El costo de reposición hace referencia al valor que sería necesario invertir en una edificación en caso de que esta tuviese que ser reemplazada completamente siguiendo los criterios mínimos de calidad y seguridad indicados en el NSR-10 [4]. Este costo incluye los elementos estructurales, no estructurales y contenidos de la edificación. Para definir los costos de reemplazo en la ciudad se tuvo en cuenta el estrato socioeconómico y el tipo de uso. Los costos se definieron por metro cuadrado construido y se aplicaron a nivel de inmueble (es decir, una edificación mixta con uso comercial y residencial considera diferentes costos según el área construida por tipo de uso). Se realizaron múltiples análisis de costos directos e indirectos en edificaciones típicas de la ciudad, en diferentes estratos, que utilizan diferentes materiales y sistemas a cargas laterales.

3. RESULTADOS

Se generó un modelo de exposición para las edificaciones de la zona urbana del municipio de Santiago de Cali y sus habitantes. Se estima un total de 349 mil edificios con un costo de reposición de 222 billones de pesos colombianos (alrededor de 60 billones de US dólares). El modelo fue desarrollado a nivel de edificación e incluye atributos relacionados con la ubicación espacial, estrato socioeconómico, año de construcción, número de pisos, uso de la edificación, características constructivas (material predominante, sistema de resistencia a cargas laterales y nivel de ductilidad), área construida, número de habitantes y costo de reemplazo. La caracterización de las edificaciones se realizó de la forma más amplia posible con el fin de abarcar todos los atributos necesarios ante diferentes tipos de amenaza (por ejemplo, terremotos, volcanes, inundaciones, huracanes, entre otros).

Se utilizaron cuatro esquemas de clasificación para definir las tipologías constructivas y su respectiva incertidumbre. Se estimó que la mampostería confinada (*MCF*) es la tipología predominante con una participación entre el 51% y 63% de las edificaciones, seguida por la mampostería no reforzada o semiconfinada (*MUR*) que representa del 25% al 39%, y el concreto reforzado (*CR*) con participaciones entre el 7% y 10%. Otras tipologías como la mampostería reforzada (*MR*), el adobe (*MUR-ADO*) o la madera (*W*) no son significativamente representativas de la ciudad. La Figura 2 presenta los porcentajes de participación por material y sistema predominante.

El modelo de exposición propuesto está disponible al público a través de la página del proyecto TREQ [7]. Para su uso, es decisión del analista cómo incorporar la incertidumbre asociada utilizando cada esquema generado como una opción viable mediante el uso de un árbol lógico, o utilizando directamente el inventario y asignando la vulnerabilidad aleatoriamente, según los pesos asignados en los esquemas de clasificación definidos por cada experto.

Agradecimientos

El presente artículo es el resultado de una colaboración inter-institucional entre la Fundación GEM (Global Earthquake Model), la Universidad EAFIT, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Bogotá

Facultad de Ingeniería
Departamento de
Ingeniería Civil

[VIGILADA MINEDUCACIÓN]

ais
Asociación Colombiana
de Ingeniería Sísmica

Municipalidad de Santiago de Cali (oficina de Planeación Municipal y la Secretaría de Gestión del Riesgo de Emergencias y Desastres). Esta colaboración se generó como parte del proyecto TREQ, Comunicación y Formación en la Evaluación de Riesgos por Terremotos (Training and Communication on Earthquake Risk Assessment), liderado por la Fundación GEM y patrocinado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

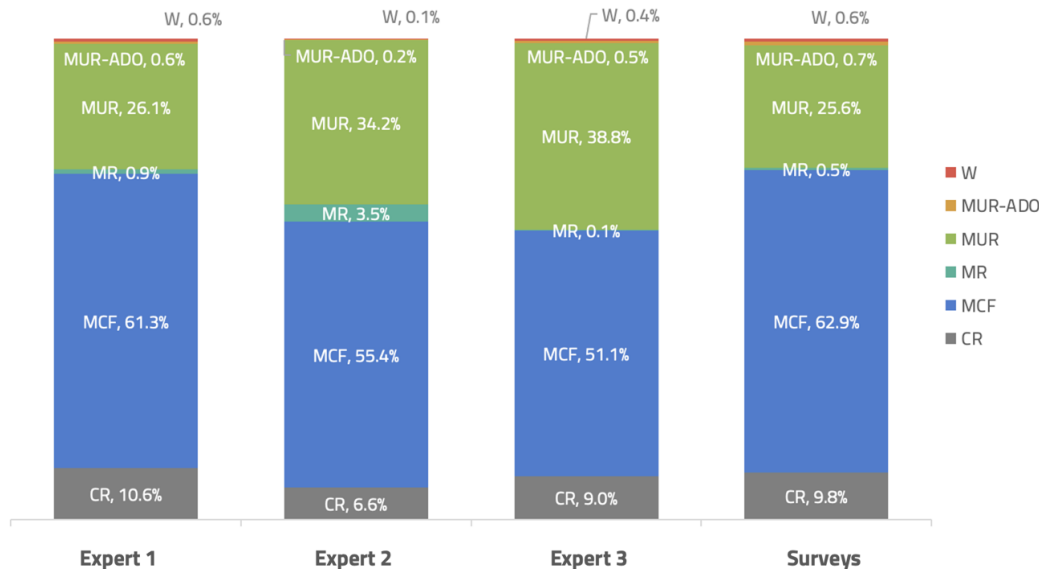


Fig. 2. Tipologías constructivas predominantes en el modelo de exposición.

Referencias

- [1] DANE - DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, *Censo Nacional de Población y Vivienda*, 2018, 2018.
- [2] ALCALDÍA DE SANTIAGO DE CALI, *Cali en Cifras 2018-2020*, <https://www.cali.gov.co/documentos/1703/cali-en-cifras/>.
- [3] UNGRD - UNIDAD NACIONAL DE GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES, *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*, 2018.
- [4] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, Colombia, 2010.
- [5] ACEVEDO A.B, YEPES-ESTRADA C, GONZÁLEZ D, SILVA V, MORA M, ARCILA M, and POSADA G, "Seismic Risk Assessment for the Residential Buildings of the Major Three Cities in Colombia: Bogotá, Medellín, and Cali", *Earthquake Spectra*, Vol. 36, No. S1, 2020, pp. 298-320.
- [6] YEPES-ESTRADA C, SILVA V, VALCÁRCEL J, ACEVEDO A.B, TARQUE N, HUBE M.A, CORONEL G, and SANTA MARÍA H, "Modelling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment", *Earthquake Spectra*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp. 299-322.
- [7] GEM FOUNDATION, Proyecto TREQ, <https://www.globalquakemodel.org/proj/treq>.