

Impacto del modelo de consecuencias en la estimación del riesgo sísmico físico determinista para el cantón de San José, Costa Rica

Impact of the consequences model on the deterministic physical seismic risk assessment for the canton of San Jose, Costa Rica

Francisco Rodríguez-Herrera¹, Luis C. Esquivel-Salas², Víctor Schmidt Díaz², Diego Hidalgo Leiva²

¹Ingeniero Civil, Universidad de Costa Rica.

²Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica, Universidad de Costa Rica.

*Autor de correspondencia: diego.hidalgo@ucr.ac.cr.

RESUMEN. Se presenta el impacto de los modelos de consecuencias en la estimación de riesgo sísmico físico determinista para el cantón Central de San José, Costa Rica. Para ello se recopiló información de ocho iniciativas internacionales de estimación de riesgo sísmico enfocadas en la estimación de pérdidas económicas, cinco en estimación de víctimas y dos en escombros.

Se utiliza el programa OpenQuake de la Fundación Global Earthquake Model (GEM) para realizar los cálculos de riesgo sísmico. En el caso de la estimación de víctimas, se generan curvas de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad y modelos de consecuencias para un total de 17 tipologías constructivas. Los cálculos se enfocan en el cantón Central de San José, dando continuidad a una serie de investigaciones enfocadas en dicha región que han permitido determinar un modelo de exposición el cual es un insumo básico para las estimaciones de riesgo sísmico. Con respecto a la amenaza, se considera un escenario determinista con un evento generado por la falla de Cipreses con una magnitud de 6.0 Mw y una profundidad de 15 Km.

Se encuentra que para el caso de estudio considerado los modelos de consecuencias enfocados en pérdidas económicas tienen un alto impacto en dichas estimaciones, con diferencias de hasta \$144 millones de dólares americanos para una diferencia de 1% en los factores de pérdidas. En caso de las víctimas, se encuentran resultados con alta variabilidad también, sin embargo, en dicho caso se tienen estimaciones mediante modelos de consecuencias empíricos y semi-empíricos, por lo que se atribuye a ello dicha variabilidad.

Palabras clave. *Escombros, modelos de consecuencias, openquake, riesgo sísmico, víctimas, vulnerabilidad sísmica.*

ABSTRACT. The impact of consequence models on deterministic physical seismic risk assessment for the Central canton of San José, Costa Rica is presented. As part of this study, information was collected from eight international seismic risk estimation initiatives focused on estimating economic losses, five on estimating victims and two on debris.

The OpenQuake program of the Global Earthquake Model (GEM) Foundation is used to perform the seismic risk calculations. In the case of estimating victims, vulnerability curves are generated from fragility and consequence functions for a total of 17 construction typologies. The calculations focus on the Central canton of San José, giving continuity to a series of investigations focused on that region that have allowed the determination of an exposure model which is a basic input for seismic risk estimates. Regarding the threat, a deterministic scenario is considered with an event generated by the Cipreses fault with a magnitude of 6.0 Mw and a depth of 15 km.

Citación: F. Rodríguez-Herrera, "Impacto del modelo de consecuencias en la estimación del riesgo sísmico físico determinista para el cantón de San José, Costa Rica", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 1, pp. (101-11), 2024.

Tipo de artículo: Original. Recibido: 01 de noviembre de 2022. Recibido con correcciones: 07 de agosto de 2023. Aceptado: 15 de diciembre de 2023.

DOI. <https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3979>

Copyright: 2024 F. Rodríguez-Herrera. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

It is found that for the case study considered, the consequence models focused on economic losses have a high impact on these estimates, with differences of up to \$150 million of USD for a difference of 1% in the loss factors. In the case of the victims, results with high variability are also found, however, in this case there are estimates through empirical and semi-empirical consequence models, for which said variability is attributed to it.

Keywords. *Debris, consequence models, openquake, seismic risk, earthquakes, seismic vulnerability*

1. Introducción

Los terremotos son una de las manifestaciones naturales más destructivas. Costa Rica está localizado en una zona con alta sismicidad debido a la presencia de tres placas tectónicas: las placas del Coco, Caribe y Nazca, además en el territorio nacional existe una extensa red de fallas locales activas y de cuyo movimiento resultan grandes liberaciones de energía.

Esa condición de alta sismicidad en el país ha causado múltiples pérdidas humanas (27 muertos: Cinchona, 8 de enero de 2009; 48 muertes: Limón, 22 de abril de 1991), pérdidas económicas y escombros (ver Figura 1), y por su naturaleza es una condición que se seguirá presentando en este país.

Los estudios de riesgo sísmico físico tienen como objetivo la estimación de daños y pérdidas producto de eventos sísmicos, los modelos de consecuencias son la herramienta que permite estimar consecuencias como pérdidas económicas, víctimas y escombros a partir del daño esperado de las estructuras. Estas estimaciones tienen distintas aplicaciones, favorecen la toma de decisiones ante la presencia de una emergencia producto de un terremoto, ayudan a reducir la afectación de futuros eventos sísmicos conociendo las estructuras y ubicaciones más vulnerables, y se utilizan ampliamente en las agencias de seguros.



Figura 1. Daños observados en edificaciones debido al terremoto de Cinchona (2009) y Sámara (2012).

Como parte de dichos estudios se consideran tres componentes básicos como insumos. Se trata de la amenaza, exposición y vulnerabilidad, el primero de ellos describe la magnitud, fuente y ubicación del sismo, así como el efecto esperado en los sitios de interés (estructuras) en unidades de aceleración o desplazamiento dependiendo de la metodología empleada. La exposición representa los activos expuestos ante dicha amenaza, para cada estructura se

debe conocer su ubicación, sistema constructivo, materiales, área constructiva, costo, cantidad de habitantes, entre otra información de interés. Finalmente, la vulnerabilidad describe el daño esperado de las estructuras ante distintos niveles de intensidad sísmica y a partir de dicho daño esperado, se estiman distintas pérdidas utilizando los modelos de consecuencias.

Sin embargo, se tiene implícita una considerable incertidumbre en las estimaciones de riesgo sísmico ya que para llegar a los resultados se deben modelar dichos componentes los cuales son complejos, es por ello por lo que resulta de interés determinar el impacto de los modelos de consecuencias en las estimaciones de riesgo sísmico físico.

2. Metodología: Estimación de riesgo sísmico Físico

Según Porter [1] para la evaluación del riesgo sísmico se consideran tres parámetros básicos, los cuales son exposición, amenaza y vulnerabilidad. Los cuales se pueden observar en la Figura 2.



Figura 2. Diagrama de flujo con las variables que forman parte de un estudio de riesgo sísmico físico.

En los estudios de riesgo sísmico el alcance de la exposición puede variar, desde una única estructura, hasta muchas de ellas y de distintos materiales constructivos y sistemas sismorresistentes. De igual manera, la amenaza se puede representar de dos maneras, la primera es como con un enfoque probabilista, en este caso se considera muchos eventos sísmicos o se puede modelar con enfoque determinista, en este caso se considera un único evento específico generado por una fuente sísmica puntual, con una magnitud, características geológicas y geotécnicas definidas para dicho escenario. El escenario probabilista permite obtener resultados relacionados con pérdidas anuales esperadas para las estructuras expuestas, mientras que el determinista permite obtener la pérdida esperada dada la eventual ocurrencia del evento seleccionado [2].

La amenaza sísmica consiste en la probabilidad de que se presente una liberación de energía producto de un sismo en un lugar determinado [3]. Para caracterizar esta variable se debe definir como mínimo una fuente sísmica (ubicación) y la magnitud o potencial sísmico de la fuente. Posteriormente se debe estimar el efecto de dicha amenaza en las estructuras expuestas, considerando la distancia, condiciones geológicas y geotécnicas, entre otras condiciones, para ello se utilizan modelos de atenuación o software especializados para dichos cálculos.

La exposición hace referencia al conjunto de información de la o las estructuras consideradas para el estudio de riesgo sísmico, como parte de dicha información a recabar se encuentra el área de construcción, el costo de reposición de la estructura, la cantidad de ocupantes según escenarios determinados (normalmente diurno y nocturno), el tipo de estructura (en caso de que se manejen distintas tipologías) y ubicación geográfica. Es normal que existan un procedimiento requerido para generar dicha información en muchos casos ya que puede que no se conozca, por lo que dependiendo del alcance de la investigación se utilicen datos de censos, o metodologías con análisis de fotografías e imágenes satelitales para recabar la información requerida.

En el caso de la fragilidad, se considera que describe la probabilidad de que la estructura alcance o exceda cierto nivel de daño ante el efecto de un evento sísmico [1]. Las consideraciones por tomar en cuenta para determinar la respuesta estructural de la estructura, D'Ayala et al. [4], definen que además de los elementos estructurales, se debe considerar elementos no estructurales que afecten el comportamiento de la estructura, por ejemplo, paredes de mampostería en edificios de concreto reforzado.

Matemáticamente, las funciones de fragilidad se suelen representar utilizando funciones de distribución acumulativa para la distribución log-normal mediante la ecuación (1):

$$P[ds/IM] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{IM}{IM_{ds}} \right) \right] \quad (1)$$

donde:

IMds: Valor medio de a medida de intensidad sísmica (IM) en el que la estructura alcanza el umbral de daño D_s .

β_{ds} : Desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral.

IM: Medida de intensidad sísmica

Φ : Función de distribución normal estándar acumulada.

En las funciones de fragilidad se utilizan distintas medidas de intensidad sísmica, según Porter [1] estas pueden ser: el valor de aceleración máxima del terreno (PGA), desplazamiento espectral (S_d), la aceleración espectral (S_a) y velocidad máxima del terreno (PGV).

La fragilidad se puede transformar a vulnerabilidad aplicando un modelo de consecuencias, el cual consiste en un conjunto de factores de pérdidas que estiman la probabilidad de que se presenten pérdidas económicas, víctimas o escombros dado un determinado nivel de daño en una estructura. Es decir, como parte de una estimación de riesgo sísmico al considerar las variables de exposición y amenaza se estima el nivel de daño de la estructura mediante funciones de fragilidad, y al utilizar esa información en una función de consecuencias se puede estimar la probabilidad de pérdidas asociadas al nivel de daño estimado previamente [5].

Según Bal et al. [6], existen tres metodologías distintas para desarrollar modelos de consecuencias, empíricas, semi-empíricas y analíticas. Cada método tiene desarrollos matemáticos distintos, siendo los empíricos los que requieren menor cantidad de información para su cálculo, mientras que los analíticos son más elaborados en ese sentido. Como se muestra en Figura 2.2, se puede clasificar el uso de cada metodología según el resultado que se obtiene con cada una de ellas. Las metodologías empíricas se han utilizado principalmente para estimar muertes, mientras que las metodologías analíticas para estimar impacto económico y las semi-empíricas similar a las empíricas, pero incorporando más cantidad de información.

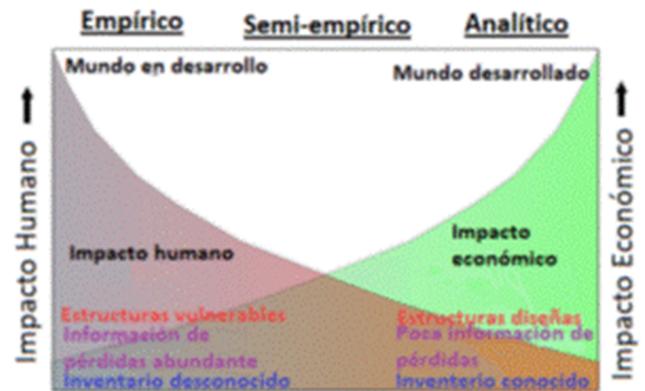


Figura 3. Enfoque de cada tipo de metodología de desarrollo de modelos de consecuencias. Bal et al.[6], modificado por Rodríguez [7].

Al considerar la convolución de la amenaza sísmica, la vulnerabilidad y el modelo de exposición, es posible definir el riesgo ya sea de una estructura en particular o de una región bajo estudio (dependiendo del modelo de exposición empleado). Los estudios de riesgo sísmico tienen implícita una importante incertidumbre asociada debido a la complejidad de los fenómenos que se representan a través de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Según Spence [8], la incertidumbre presente en estimaciones de riesgo sísmico se clasifica en dos tipos, la incertidumbre aleatoria y la incertidumbre epistémica.

La primera describe la variabilidad de un evento repetible, esta incluye la variabilidad natural asociada a un fenómeno la cual no es posible controlar o predecir, Como parte de este tipo de incertidumbre en riesgo sísmico se incluye la incertidumbre debida a fenómenos naturales: la ubicación de futuros terremotos, propiedades de la fuente sísmica, dispersión del movimiento del suelo con respecto a la media, y la incertidumbre debida a procesos realizados por el ser humano: las propiedades mecánicas de los materiales de construcción.

Por otro lado, la incertidumbre epistémica se origina debido a la falta de conocimiento en algunos fenómenos, variables o simplificaciones tomadas a la hora de modelar el cálculo. Por ejemplo, la selección de modelos de movimiento del suelo, simplificaciones en la representación de las estructuras (2D o 3D), desempeño de las conexiones, entre otras.

3. Caso de estudio: Cantón central de San José

El territorio de Costa Rica consta de siete provincias, 84 cantones y 489 distritos. La provincia de San José es la Capital del país, esta provincia cuenta con 20 cantones, de los cuales el cantón Central de San José, identificado en la Figura 4, es el número uno de dicha provincia y este cuenta con 11 distritos: El Carmen, Merced, Hospital, Catedral, Zapote, San Francisco de Dos Ríos, La Uruca, Mata Redonda, Pavas, Hatillo y San Sebastián.

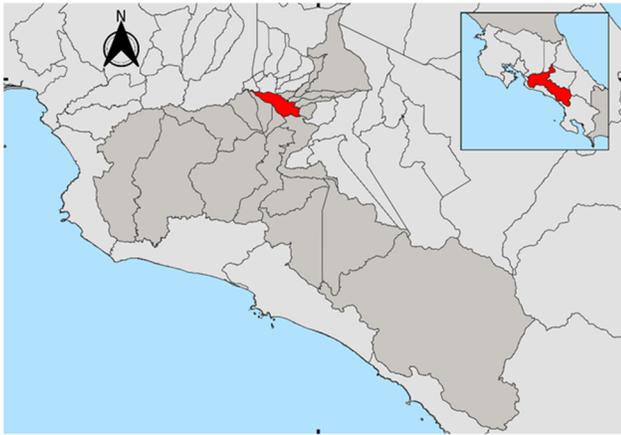


Figura 4. Ubicación del cantón Central de San José con respecto a la provincia de San José.

La caracterización de la amenaza sísmica para el cantón de San José se puede realizar empleando modelos probabilistas o deterministas. En los cálculos realizados se considera la amenaza con un enfoque determinista, como se mencionó anteriormente, esto significa que se considera un evento sísmico puntual generado por una única fuente sísmica. La magnitud y la fuente del evento sísmico fue seleccionada tomando en consideración un estudio de desagregación sísmica [9] que concluyó que para el cantón Central de San José los sismos con mayor potencial de daño corresponden a eventos corticales, los cuales ocurren a distancias cercanas (menor a 15 km) y de magnitud alrededor de Mw 6.0. Por lo que se decide considerar la falla de Cipreses la cual fue estudiada por Rodríguez et al. [10] y utilizar los datos de intensidad en el cantón Central de San José generados por el LIS [11] en base a la descripción dada por Rodríguez et al. [10] y descritos a continuación:

i. Falla de Cipreses (ubicada 5 km al este de San José)

- ii. Magnitud: Mw 6.0.
- iii. Profundidad: 5 km.
- iv. Área de la falla: 10 km².
- v. Software: Broadband Platform del Southern California Earthquake Center (SCE).
- vi. Resultados: Aceleración esperada en 196 barrios del cantón central de San José.

Los resultados de la simulación numérica de la ruptura, propagación e identificación de la intensidad sísmica sobre los centroides de los barrios en el cantón central de San José se muestran en la Figura 5.

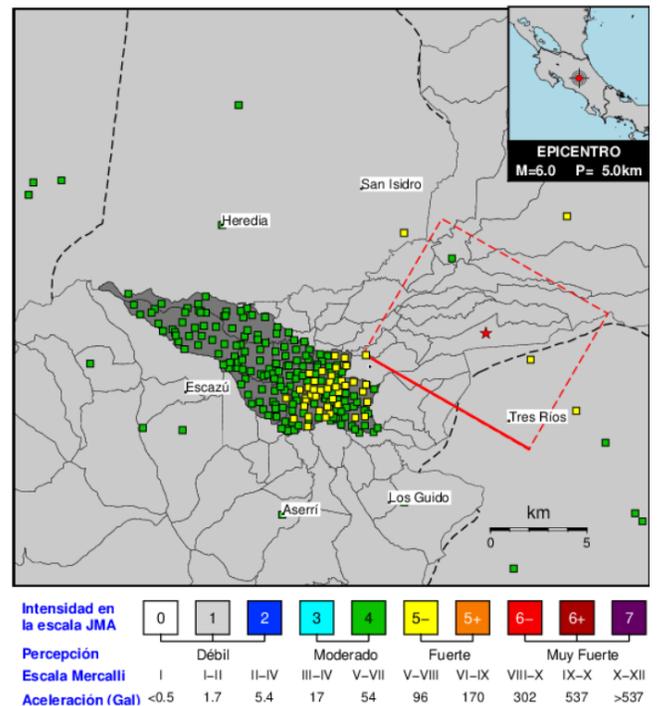


Figura 5. Ubicación de la falla y percepción de intensidad en 196 barrios del cantón Central de San José para el escenario planteado. LIS [11].

El modelo de exposición considerado fue realizado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) entre el año 2017 y 2019 y publicado por Esquivel-Salas et al. [12]. Este cuenta con un inventario de 64807 estructuras generadas a partir de una muestra de 7294 edificios ubicados en el cantón de San José, Costa Rica. El valor total del portafolio considerado corresponde a ₡9 907 823 783 000 colones y se estima una ocupación de 287 819 personas para el escenario nocturno [13]. Además, se incluye información de cantidad de niveles, material, sistema estructural ante cargas laterales, regularidad, propiedades de techo y piso, así como: ubicación

geográfica, área de la huella, fecha aproximada de construcción y el distrito y barrio en el que se ubica. Dicha caracterización se llevó a cabo basándose en imágenes panorámicas de los edificios [12].

De la mano con este modelo de exposición, el LIS generó modelos de fragilidad que permiten representar a las tipologías identificadas en este. La mayoría de curvas de capacidad (utilizadas posteriormente para generar las curvas de fragilidad) consideradas en este estudio han sido generadas mediante análisis estáticos no lineales, las cuales fueron recopiladas de distintos estudios como el de Calderón [14] que realizó una recopilación de curvas de capacidad de estructuras diseñadas y analizadas para las condiciones de Costa Rica y se asociaron a diferentes tipologías constructivas presentes en el país, y presentadas en las investigaciones de Calderón [15], [16], Villar-Vega [17] e Hidalgo-Leiva [18], [19].

Para el cantón de San José se generan tres niveles de clasificación (taxonomía base agrupada, taxonomía base y taxonomía) de las estructuras adoptando las tipologías identificadas por Esquivel-Salas [12], lo que permitió además desglosar las pérdidas por los distintos niveles de clasificación.

4. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados de las pérdidas económicas, víctimas mortales y escombros estimados para el caso de estudio considerado. Es importa recalcar que los resultados son dependientes de la amenaza sísmica considerada, la cual, al ser una fuente determinista, no representa la totalidad de amenaza sísmica esperada, por lo que los daños, víctimas y escombros no serán la totalidad de los esperados para la región sobre un periodo de exposición prolongado.

4.1 Pérdidas económicas directas

La estimación de pérdidas económicas directas emplea como base el cálculo del riesgo sísmico el cual se realiza con el software OpenQuake versión 3.11.4. [20]. En este caso se aplica el Cálculo de Daños por Escenario (Scenario Damage Calculator) denominado así por GEM, y cuenta con cuatro archivos principales: el campo de aceleración del suelo, el modelo de exposición, el modelo de fragilidad y el modelo de consecuencias. Se obtiene como resultados: estadísticas de pérdidas, distribución de daño, mapas de pérdidas y de daño.

En la Tabla 1 se presenta el total de pérdidas estimadas en colones, en dólares y la relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio según las iniciativas consideradas. Se puede identificar tres tendencias, la primera es un grupo conformado por cuatro modelos de consecuencias: FEMA [21], FEMA [22], Milutinovik y Trendafiloski [23], y Kostov et al. [24], que estiman las pérdidas en un rango ente ₡453 y ₡543 miles de millones de colones y un rango de pérdidas de 4.9% a 5.5% con respecto al valor total del portafolio; el segundo grupo de modelos se compone por el de Yepes y Silva [25], y Durukal et al. [26], con pérdidas entre ₡764 y ₡821 mil millones de colones y una relación de pérdidas de 7.7% y 8.3% con respecto al valor total del portafolio respectivamente, y finalmente se tiene el dato con el modelo de Bal et al. [6], la cual estima pérdidas de ₡1 326 miles de millones de colones y una razón de pérdidas de 13.4% con respecto al valor total del portafolio.

Una de las características más interesantes del programa OpenQuake, es que permite obtener estadísticas de las pérdidas para distintos niveles de clasificación como: distritos, barrios, grupos de taxonomía y taxonomía para cada escenario considerado, así como la generación de mapas en los que se puede observar la distribución geográfica de las pérdidas. Los principales resultados se presentan a continuación.

Tabla 1. Pérdidas económicas estimadas y relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio según las iniciativas consideradas

Iniciativa	FEMA [21]	Yepes y Silva [25]	Bal et al. [6]	Durukal et al. [26]	Kostov et al. [24]	Milutinovic y Trendafiloski [23]	FEMA [22]
Total de pérdidas estimadas (miles de millones)	€453	€764	€1 326	€821	€543	€509	€490
Total de pérdidas estimadas (millones de dólares americanos) ¹	\$ 714	\$1 203	\$2 089	\$1 293	\$ 856	\$ 801	\$ 771
Relación de pérdidas con respecto al valor total del portafolio	4.60%	7.70%	13.40%	8.30%	5.50%	5.10%	4.90%

En la Figura 6 se presenta la distribución de pérdidas por grupos de taxonomía para los distintos modelos de consecuencias. Se puede observar la concentración de las pérdidas en los grupos de estructuras de concreto reforzado y mampostería, además, se comprobó que las pérdidas de dichos grupos representan cerca del 100% de las pérdidas esperadas, específicamente, concreto reforzado con 59% y mampostería con 41% del total de las pérdidas. Estos resultados son afectados por la cantidad relativa de estructuras expuestas de cada una de las tipologías, donde de acuerdo con el modelo de exposición el área construida de cada grupo tipológico corresponde mayoritariamente a estructuras de concreto reforzado (2 323 763 m²) y mampostería (11 006 860 m²), mientras que las estructuras de madera (553 191 m²), acero (Acero, 77 007) y construcciones informales (34 831 m²) poseen menor peso en la cantidad de área expuesta.

Con base en esos datos, se determina que el grupo de taxonomía más vulnerable a pérdidas económicas corresponde al grupo de estructuras de concreto reforzado con pérdida estimada en €193000/m² y para las estructuras de mampostería con pérdidas estimadas en €28000/m², ambos casos al considerar el modelo de Yepes y Silva [25].

Adicionalmente, en la Figura 4.3 se presenta la distribución geográfica de pérdidas por barrios para el modelo de consecuencias de Yepes y Silva [25]. En este caso se tiene que el barrio con mayor pérdida sería el barrio Américas con una pérdida de €218 mil millones de colones, seguido de El Carmen con una pérdida de €84 mil millones de colones y en tercer lugar el barrio Rohrmoser con una pérdida de €76 mil millones de colones. Este resultado es especialmente útil ya que permite identificar la distribución geográfica de las pérdidas económicas, con lo cual se logra la identificación de las estructuras más vulnerables y permite la toma de decisiones con base a información

objetiva para reducir el impacto de un potencial terremoto.

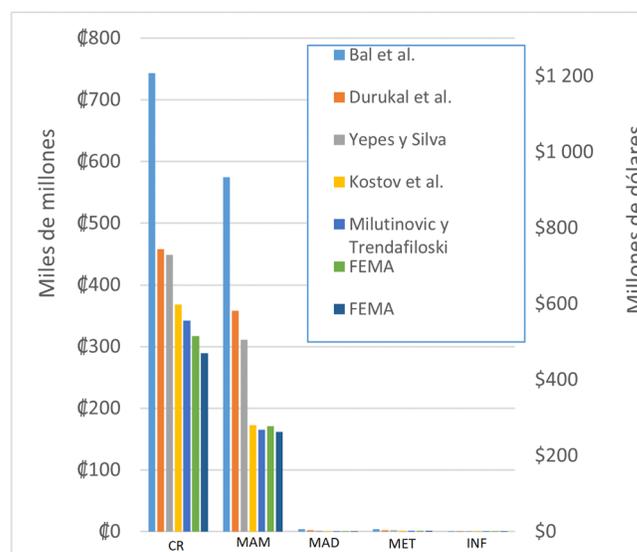


Figura 6. Distribución de pérdidas por grupos de taxonomía según los distintos modelos de consecuencias CR: Concreto Reforzado, MAM: Mampostería, MAD: Madera, MET: Estructuras Metálicas, INF: Informales.

4.2 Víctimas mortales esperadas

En esta sección se presentan los resultados de la estimación de víctimas. Esta estimación se enfoca en la estimación potencial de muertes, al considerar la amenaza de la falla de Cipreses, descrita anteriormente, enfocado en el escenario nocturno el cual tendrá la mayor ocupación de las viviendas. Se seleccionaron cinco modelos de consecuencias (FEMA [21], Miyamoto [27], Spence [8], Jaiswal y Wald [28], So y Pomonis [29]). De los cinco modelos seleccionados, se realizan cuatro estimaciones pues el modelo de Spence [8] se enfoca en edificaciones de concreto reforzado únicamente, por lo que se combina con el modelo de So

y Pomonis (2012) y FEMA (2020), donde el primer modelo propone factores para las tipologías de

mampostería, y el segundo para las tipologías de acero, madera e informal.

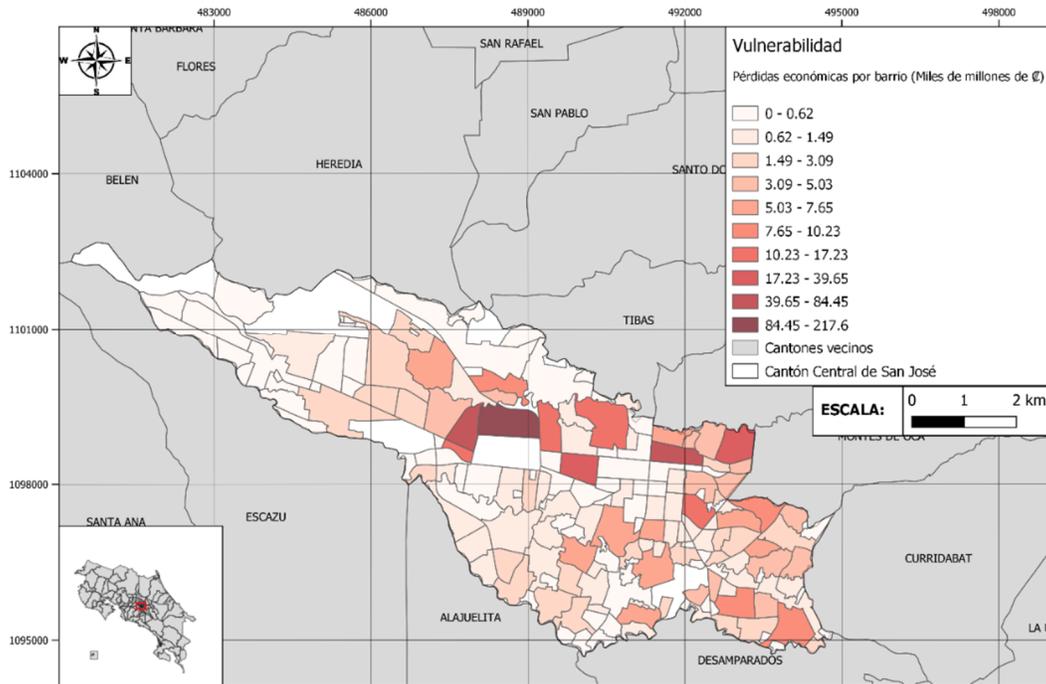


Figura 7. Mapa de pérdidas por barrios del cantón Central de San José para el modelo propuesto por Yepes y Silva [25].

Para realizar la estimación de víctimas fue necesario generar curvas de vulnerabilidad ya que la versión 3.11.4 [20] de OpenQuake no admite el uso directo de funciones de consecuencias para este tipo de pérdidas. Dicho cálculo se conoce como Calculadora de Escenarios de Riesgo (Scenario Risk Calculator) y requiere como insumo el archivo con los campos de movimiento del suelo, el modelo de exposición y el de vulnerabilidad. Este cálculo tiene como salidas la estimación de víctimas y los mapas con la distribución espacial de las mismas.

Los resultados indican que el modelo de FEMA [21] predice el valor más bajo de fallecidos con 9 víctimas mortales, seguido por el modelo de Miyamoto [27] con una estimación de 23 víctimas. En ambos casos se trata de metodologías semi-empíricas y los factores se han derivado de observaciones y estadísticas de terremotos ocurridos en el pasado. En el caso de las pérdidas humanas es sumamente importante considerar que los factores se generan en función de la vulnerabilidad de la zona para la cual se realiza la iniciativa, por lo tanto, los resultados van a reflejar un comportamiento de acuerdo con dicha variable. Por otro lado, se tiene la estimación con el modelo de Jaiswal y Wald [28] con 1368

fallecidos y los resultados de la combinación de los modelos de So y Pomonis [29] con Spence [8] con 810 fallecidos. Estos modelos, con excepción del de Spence [8], han sido derivadas utilizando métodos empíricos, además con datos relacionados a lugares con una vulnerabilidad muy alta ante terremotos, por lo tanto era de esperar que los valores fueran mayores en comparación a las iniciativas semi-empíricas.

4.3 Escombros

A diferencia de las estimaciones de pérdidas económicas y víctimas, en las cuales se utilizó OpenQuake, para realizar los cálculos, en este caso se utilizaron los datos del mismo modelo de exposición y a partir de la distribución de los daños estimados con OpenQuake se utiliza una hoja de cálculo para estimar el volumen de escombros (m³) según taxonomía, taxonomía base, taxonomías base agrupadas, barrio y distrito.

Para el presente caso se aplica la estimación de escombros a las estructuras con estado de daño extensivo (547 estructuras) y colapso (17 estructuras) correspondientes al escenario de amenaza de la falla de Cipreses. A pesar de que el modelo de escombros

empleado por FEMA [21] permite asignar un componente a cada estado de daño, el modelo de escombros empleado por Miyamoto [27] considera únicamente el estado de daño completo, por lo que se considera apropiado emplear únicamente los estados de daño extensivo y colapso para generar resultados comparables entre ambos modelos.

En el caso del modelo de FEMA [21], la estimación de escombros se realiza en unidad de peso a partir de área de construcción (toneladas cortas/1000 ft²), por lo que para obtener datos comparables en unidades de volumen (m³), se obtiene un dato de densidad de escombros mixtos con un valor de 910 kg/m³ el cual fue obtenido a partir de mediciones de campo de residuos de construcción y demoliciones de distintos materiales en Estados Unidos [30].

La estimación total de escombros para los dos modelos empleados presenta algunas diferencias debido a la metodología propia de cada modelo. Se cuantifica la cantidad de escombros debido a estructuras con daño extensivo y daño completo. En el caso de Miyamoto [27] se tiene una estimación total de 728 359 m³, de los cuales 5 905 m³ (0.8%) corresponden a escombros debido a daño completo y 772 454 m³ (99.2%) correspondiente a escombros debido a daño extensivo. Por otro lado, para el modelo de FEMA [21] se obtiene una estimación total de 331 779 m³ de los cuales 4 568 m³ (1.4%) corresponden a escombros debido a daño completo y 327 210 m³ (98.6%) correspondiente a escombros debido a daño extensivo.

5. Conclusiones

Se realiza una estimación del riesgo sísmico para el cantón central de San José de Costa Rica empleando un modelo de exposición que considera estructuras de uso comercial y habitacional, así como una demanda sísmica determinista originada por el posible movimiento de una falla al este de la ciudad.

Se cuantifica el impacto de los modelos de consecuencias en la estimación de pérdidas económicas. Se obtienen tres grupos con valores de pérdidas similares, presentando diferencias de hasta ₡95 mil millones de colones para una variación de 1% en los factores de pérdidas. En general se obtiene un rango que va desde los 453 hasta los 1326 miles de millones de colones en pérdidas.

En el caso de la estimación de pérdidas de vidas humanas, se observan variaciones significativas entre los dos modelos empleados (FEMA [21] y Miyamoto [27]), con una variación en la estimación de víctimas del orden del 255%. Esta variación se considera que es debido a los datos empleados para la generación de cada modelo, pues la sobreestimación se puede deber a que dicho modelo fue desarrollado para zonas con mayor vulnerabilidad y otras prácticas constructivas distintas.

En cuanto a la estimación de escombros, se encontró que en el caso del modelo de FEMA [21] la estimación fue menor en comparación con los resultados del modelo propuesto por Miyamoto [27]. En este último caso no se proponen factores específicos para estados de daño que no sean daño completo, lo cual puede modificar los resultados respecto a la metodología de FEMA que si incluye factores para todos los estados de daño.

En términos generales se encontró que los grupos de tipologías más vulnerables a pérdidas económicas y generación de escombros corresponden a las estructuras de concreto reforzado, seguido de las estructuras de mampostería, esto para el modelo de exposición, curvas de fragilidad y la amenaza sísmica consideradas.

AGRADECIMIENTOS

A la fundación Global Earthquake Model (GEM) y al Laboratorio de Ingeniería Sísmica por permitir el acceso a investigaciones y software que han generado los cuales fueron de gran utilidad para el desarrollo de esta investigación. Este proyecto fue financiado por la Universidad de Costa Rica bajo el proyecto código C2013.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Se declara la contribución de los autores en esta investigación: FR: Conceptualización, Investigación, Redacción Borrador Inicial, LE: Conceptualización, Investigación, Redacción Borrador Inicial, VS: Conceptualización, Investigación, Inicial, DH:

Conceptualización, Investigación, Redacción Borrador Inicial, Revisión del documento final y correcciones.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] K. Porter, *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*. 2021.
- [2] J. W. Baker, B. Bradley, and P. Stafford, *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge University Press, 2021.
- [3] Á. Climent, W. Rojas, G. E. Alvarado, and M. B. Benito, "Proyecto Resis II Evaluación de la amenaza sísmica," 2008.
- [4] D. D'Ayala *et al.*, "Guidelines for analytical vulnerability assessment of low-to mid-rise buildings-Methodology, Vulnerability Global Component project," 2014.
- [5] V. Silva *et al.*, "Current Challenges and Future Trends in Analytical Fragility and Vulnerability Modelling," *Earthq. Spectra*, vol. 35, no. 4, pp. 1927–1952, 2019, doi: 10.1193/042418eqs101o.
- [6] I. E. Bal, H. Crowley, R. Pinho, and F. G. Gülay, "Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 28, no. 10–11, pp. 914–932, 2008, doi: 10.1016/j.soildyn.2007.10.005.
- [7] F. Rodríguez, "Modelos de consecuencias y la valoración de su impacto en evaluaciones del riesgo sísmico físico," Universidad de Costa Rica, 2022.
- [8] R. Spence, "Human Losses," in *Earthquake disaster scenario prediction and loss modeling for urban areas*, Pavia, Italy: IUSS Press, 2007, p. 167.
- [9] D. A. Hidalgo-Leiva *et al.*, "The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 113, no. 1, pp. 23–40, Feb. 2023, doi: 10.1785/0120220119.
- [10] E. Rodríguez, L. Linkimer, and W. Montero, "Neotectónica de la falla Cipreses, Costa Rica," *Boletín Geol.*, vol. 41, no. 2, pp. 15–33, 2019, doi: 10.18273/revbol.v41n2-2019001.
- [11] Laboratorio de Ingeniería Sísmica, "Falla Cipreses," 2020. <https://www.lis.ucr.ac.cr/842> (accessed Jan. 11, 2024).
- [12] L. C. Esquivel-Salas, V. Schmidt-Díaz, M. Pittore, D. A. Hidalgo-Leiva, M. Haas, and A. Moya-Fernández, "Remote structural characterization of thousands of buildings from San José, Costa Rica," *Front. Built Environ.*, vol. 8, no. 947329, p. 15, 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.947329.
- [13] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), "Estimaciones y proyecciones de población distritales por sexo y grupos de edades 2000–2025," 2014.
- [14] E. Calderón, "Curvas de fragilidad según el método del espectro de capacidad para tipologías estructurales definidas en el Código Sísmico de Costa Rica," Universidad de Costa Rica, 2018.
- [15] A. Calderon and V. Silva, "Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 1257–1284, 2018, doi: 10.1007/s10518-018-0499-1.
- [16] A. Calderón and V. Silva, "Exposure forecasting for seismic risk estimation: Application to Costa Rica," *Earthq. Spectra*, 2021, doi: 10.1177/8755293021989333.
- [17] M. Villar-Vega *et al.*, "Development of a fragility model for the residential building stock in South America," *Earthq. Spectra*, vol. 33, no. 2, pp. 581–604, 2017, doi: 10.1193/010716EQS005M.
- [18] D. A. Hidalgo-Leiva, "Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas empleadas en Costa Rica," Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [19] D. A. Hidalgo-Leiva, L. G. Pujades, A. H. Barbat, Y. F. Vargas, and S. A. Díaz, "Nonlinear static and dynamic analyses of Costa Rican reinforced concrete masonry structures," *Eng. Struct.*, vol. 234, no. February, p. 111998, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111998.
- [20] GEM, "The OpenQuake-engine User Manual, Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.9.0.," 2020. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.9.0.
- [21] FEMA, "Hazus Earthquake Model Technical Manual," *Fed. Emerg. Manag. Agency*, no. October, pp. 1–436, 2020.
- [22] FEMA, "HAZUS © 99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States," no. September, 2000.
- [23] Z. Milutinovic and G. Trendafiloski, "Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns," *Rep. to WP4 vulnerability Curr. Build.*, 2003.
- [24] M. Kostov *et al.*, "Risk-UE WP13. Application to Sofia," 2004.
- [25] C. Yepes-Estrada *et al.*, "Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment," *Earthq. Spectra*, vol. 33, no. 1, pp. 299–322, 2017, doi: 10.1193/101915EQS155DP.
- [26] E. Durukal, M. Erdik, and K. Sesetyan, "Reevaluation of Earthquake Losses in Istanbul and Implications for the Performance of the Turkish Catastrophe Insurance Pool," in *Engineering Conferences International*, 2006, p. 8.
- [27] Miyamoto, "The USAID/OFDA PREPARE Program FINAL REPORT Phase I: Assessment of Earthquake Risks. San Jose, Costa Rica," 2016.
- [28] K. S. Jaiswal and D. J. Wald, "Development of a semi-empirical loss model within the USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) System," 2010.

- [29] E. So and A. Pomonis, “Derivation of Globally Applicable Casualty Rates for use in Earthquake Loss Estimation Models,” *Fifteenth World Conf. Earthq. Eng.*, pp. 1–10, 2012.
- [30] L. M. Haselbach and S. U. Bruner, “Determining construction debris recycling dumpster densities,” *J. Green Build.*, vol. 1, no. 3, pp. 139–147, 2006, doi: 10.3992/jgb.1.3.139.