

Riesgo sísmico ante terremotos potencialmente perjudiciales en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM)

Seismic risk assessment for potentially damaging earthquakes in the Metropolitan Area of Costa Rica (GAM)

Mario Arroyo-Solórzano

Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía Geodesia y Cartografía, Madrid, España
mario.arroyo@alumnos.upm.es

(Recibido: 20/04/2023; aceptado: 12/07/2023)

RESUMEN: Se presentan escenarios de riesgo sísmico deterministas para siete fuentes potencialmente perjudiciales para el centro de Costa Rica, estimando aceleraciones máximas (PGA) e incluyendo efectos locales. Se estimaron daños y pérdidas totales para cada escenario, y se desglosan en detalle cuatro de ellos, seleccionados de interés especial. Además, se calcula un aproximado de víctimas y daño físico para el peor de los escenarios, en horario diurno y nocturno. Los escenarios de ruptura críticos presentarían magnitudes entre 6,5 y 8,1 Mw en fuentes de fallamiento local y subducción interplacas e intralosa, siendo el más perjudicial por fallamiento local en la falla Aguacaliente por su cercanía a zonas más densamente pobladas. El sector de mayores daños y pérdidas económicas sería hacia el sureste de San José, debido a mayor exposición y vulnerabilidad de las edificaciones, y si el terremoto ocurre en horario nocturno, habrían de cuatro a cinco veces más personas afectadas.

Palabras clave: fuente sísmica; magnitud máxima; amenaza sísmica; exposición y vulnerabilidad; daños y pérdidas; Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM).

ABSTRACT: Deterministic seismic risk scenarios are presented for seven potentially hazardous sources for central Costa Rica, estimating maximum accelerations (PGA) and including local effects. Damage and total losses were estimated for each scenario, with four of them being selected due to special interest. An approximation of the number of victims and physical damage was also calculated for the worst-case scenario, during both daytime and nighttime. Critical rupture scenarios would present magnitudes from 6.5 to 8.1 Mw in local faulting and interplate and intraslab subduction sources, with the most harmful scenario being caused by local faulting in the Aguacaliente fault due to its proximity to more densely populated areas. The sector with the greatest economic damage and losses would be to the southeast of San Jose, due to the greater exposure and vulnerability of the buildings, and if the earthquake occurs at night, four to five times more people would be affected.

Keywords: seismic source; maximum magnitude; seismic hazard; exposure and vulnerability; damage and losses; Costa Rica Metropolitan Area (GAM).



Introducción

Costa Rica se ubica en el Cinturón de Fuego del Pacífico en un marco tectónico dominado por la subducción de la placa del Coco debajo de la placa del Caribe (y la microplaca de Panamá) a una velocidad de 83-89 mm/año (DeMets et al., 2010; Fig. 1). Algunas estructuras tectónicas importantes son la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), el Escarpe de Hess, así como el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) y el Cinturón deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), que son amplias zonas de deformación de la corteza propuestas como los límites entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá (e.g., Adamek et al., 1988; Fan et al., 1993; Marshall et al., 2000; Montero, 2001; Fig. 1). Además, se encuentran las Fallas del Arco volcánico (FAV) y el Bloque Antearco Centroamericano, el cual se mueve hacia el noroeste a velocidades de 11 mm/año en la zona de estudio (Franco et al., 2012; Fig. 1).

Como parte de esta tectónica activa, desde 1821 en Costa Rica han ocurrido al menos 68 terremotos dañinos, entendiendo como dañinos aquellos sismos que han causado pérdidas económicas o muertes, con un promedio de uno cada tres años (Linkimer, Arroyo, Alvarado et al., 2018). Dentro de estos se incluye el terremoto de Cartago de 1910 Mw 6,4, siendo el desastre por terremotos más mortífero (300–600 muertos) del país (Alonso-Henar et al., 2013). Además, algunos de los sismos más importantes en época reciente debido a los daños ocasionados a nivel país y las intensidades percibidas por la mayoría de la población, han ocurrido el 22 de abril de 1991, en la zona de Limón, con Mw 7,7; el 8 de enero de 2009 en la zona de Cinchona, con Mw 6,2; y el del 5 de setiembre de 2012 en la Península de Nicoya, con Mw 7,6 (e.g., Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021; Red Sismológica Nacional de Costa Rica, 2021).

Con el crecimiento poblacional global, en la mayoría de las ciudades del mundo la falta de planificación urbana ha provocado un descontrolado y rápido crecimiento de la mancha urbana (edificios y viviendas). En Costa Rica, este efecto se ha venido desarrollando desde 1970, donde sus principales ciudades (San José, Alajuela, Cartago y Heredia) han presentado un crecimiento elevado y desordenado, dando como resultado la Gran Área Metropolitana (GAM; Fig. 1) (Guillén-Montero et al., 2021; van Lidth y Schutte, 2011). En la GAM vive más de la mitad de la población total de Costa Rica (~53 %), con la mayor concentración de actividades político-administrativas (Guillén-Montero et al., 2021), y así como el resto del país, se encuentra expuesta a una alta amenaza sísmica tanto por fallamiento local o superficial, así como por la influencia de sismos de subducción interplaca e *intraslab*.

La GAM se ubica dentro del CDCCR, con complejos sistemas de fallas locales cercanas de potencial sísmico relevante (Montero, 2001), las cuales ya han afectado la zona central del país a lo largo de su historia, por ejemplo, el terremoto de Cartago de 1910 en la Falla Aguacaliente (Alonso-Henar et al., 2013). Además, su cercanía a la zona de subducción y a otras grandes zonas de deformación cortical, como el CDNP, de potencial importante (hasta ~8,0 Mw), así como la proyección de la losa que se subduce en profundidad y con capacidad de generar sismos de Mw > 7,0 debajo de San José (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021). Lo anterior hace que el análisis de escenarios sísmicos desfavorables para los distintos regímenes tectónicos sea muy relevante en este sector del país, al ser la zona de mayor exposición, y con miras a su consideración en la planificación futura y la identificación de zonas no aptas para la localización de áreas residenciales.

Con esta motivación, en este estudio se realiza un análisis del riesgo sísmico en la GAM ante la hipotética ocurrencia de siete diferentes terremotos potencialmente perjudiciales, entre 6,5 y 8,1 Mw, obtenidos del análisis de algunas de las principales fuentes sismogénicas que podrían afectar la GAM. Se realizan estimaciones de daños y pérdidas totales para cada uno de los escenarios, y se desglosan más en detalle cuatro escenarios seleccionados como de interés especial. Además, se calcula un aproximado de víctimas y daño físico para el peor de los escenarios en caso de ocurrir en horario diurno o nocturno. Estos resultados son particularmente importantes para identificar zonas de interés prioritario para tener en cuenta ante la respuesta a emergencias y minimizar pérdidas futuras ante escenarios de este tipo.

Metodología

La unidad espacial de trabajo considerada en este estudio fue distrital, esto tomando como referencia el modelo de exposición residencial de edificios para Costa Rica de Calderón y Silva (2019). Sin embargo, para facilitar la presentación gráfica de los resultados, la unidad espacial de representación fue a nivel de los 31 cantones y las cuatro provincias que conforman

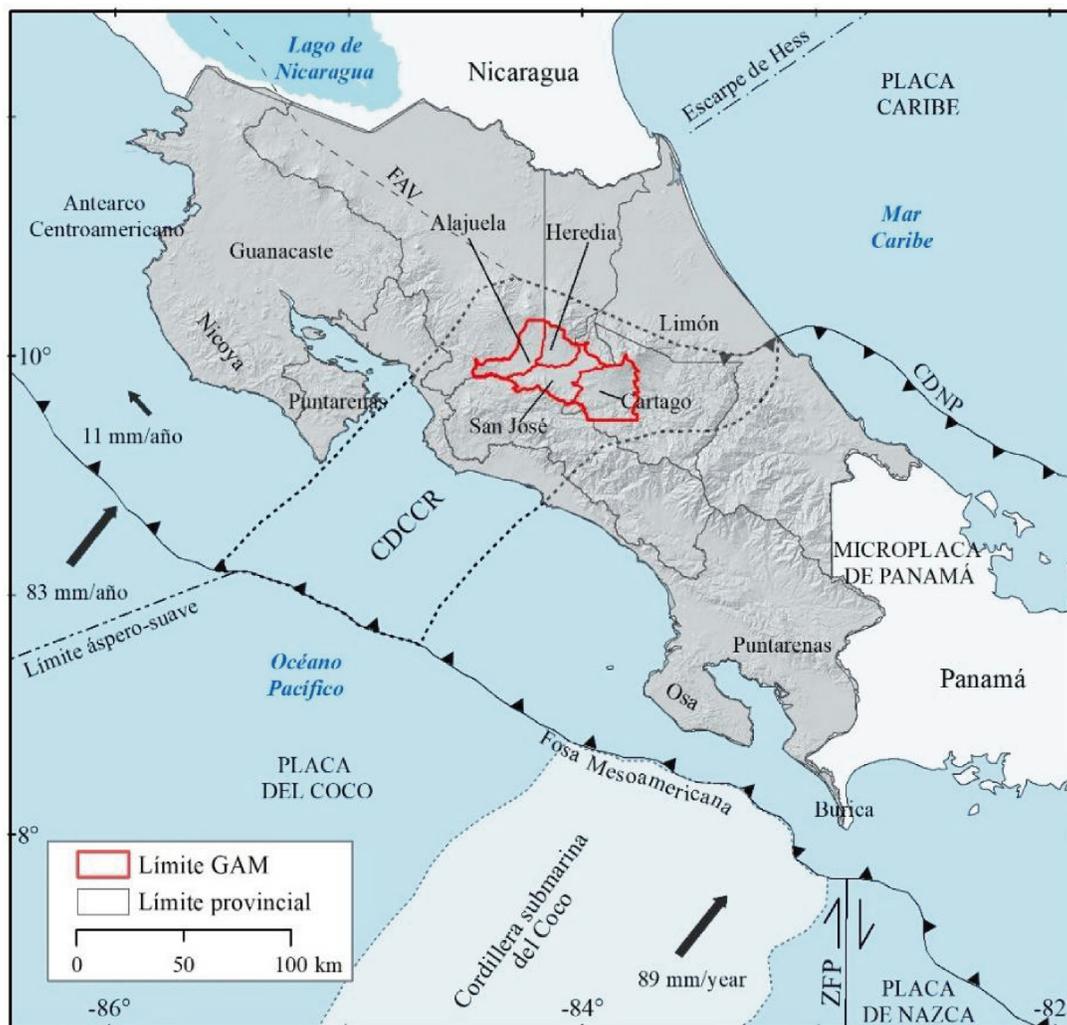


Fig. 1: Contexto tectónico de Costa Rica. La región contenida dentro de las líneas punteadas representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica Central (CDCCR). La línea punteada representa el límite noreste simplificado del Bloque Antearco Centroamericano a lo largo de las Fallas del Arco Volcánico (FAV), CDNP es el cinturón deformado del norte de Panamá, ZFP es la zona de fractura de Panamá, (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021).

la GAM, según su delimitación oficial (Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), 2021). La metodología de análisis del riesgo se divide a nivel general en tres grandes campos o etapas, que determinan el nivel del riesgo: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (UNISDR, 2009). Cada una de estas etapas contiene especificidades de acuerdo con el riesgo evaluado y en el caso de la evaluación del riesgo sísmico del presente trabajo, la figura 2 resume cada etapa considerada.

Selección de fuentes sísmicas

Para la definición de los escenarios sísmicos, se realizó una inspección de fuentes que representarían los casos más desfavorables para la GAM. Para esto, primero se identificaron los tres regímenes tectónicos principales de Costa Rica: fallamiento local o superficial, subducción interplaca y fallamiento en la losa que se subduce o de subducción *intraslab*. Para cada tipo

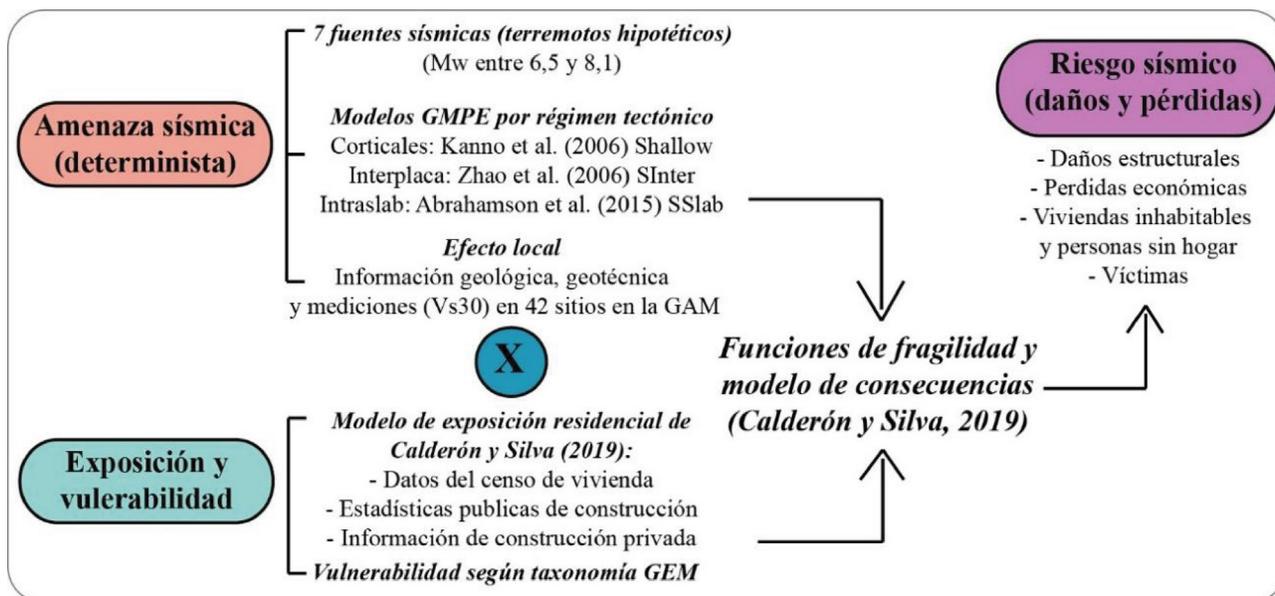


Fig. 2: Diagrama metodológico de la investigación realizada.

de fuente se realizó una inspección de magnitudes máximas (M_{max}) observadas y/o inferidas. En el caso de las fallas locales, esto se determinó con base en la longitud de la falla y su extensión dentro o cerca de la GAM, considerando el potencial máximo determinado por el promedio de algunas de las relaciones de escalamiento de magnitudes más relevantes a la fecha y aplicables al contexto tectónico costarricense.

Para la selección de las relaciones empíricas se tomó como referencia lo obtenido por Arroyo-Solórzano (2022), donde dicho autor presenta un análisis y escogencia, de las relaciones de escalamiento de magnitudes que mejor ajustan para el contexto tectónico de América Central a la fecha, basando su proceso de selección en las recomendaciones de Stirling et al. (2013). De esa investigación, el autor deduce que la relación empírica aplicable y con mejor ajuste para la región corresponde con Thingbaijam et al. (2017). Sin embargo, en este trabajo se ha decidido utilizar también dos de las relaciones más recientes y de aplicabilidad para la región: Anderson et al. (2017) y Brengman et al. (2019), las cuales también presentan ajustes aceptables para América Central (Arroyo-Solórzano, 2022). Además, se decidió contemplar dentro del promedio para obtener el potencial máximo, la ecuación de Wells y Coppersmith (1994) por su amplio uso mundial y regional.

Se analizaron las fallas de la zona con base en la tectónica local, utilizando como base el Atlas tectónico de Costa Rica (Denyer et al., 2009), y complementando con otros estudios específicos de fallamiento local de la zona central del país a lo largo del CDCCR (e.g., Alonso-Henar et al., 2013; Montero, 2001; Montero et al., 2010, 2016; Montero y Rojas, 2014; Rodríguez, 2017). Los epicentros respectivos se situaron en el sector de mayor afectación potencial para la GAM y a una profundidad de 10 km.

Para el resto de las fuentes, la magnitud máxima se modeló según lo obtenido por Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021), a través del momento sísmico acumulativo, basado en el catálogo de terremotos, de tal manera que la magnitud asignada fuese la que mayor afectación causaría en la GAM a pesar de la distancia.

Para subducción y otras zonas de fallamiento cortical o límites de placas como el CDNP o la ZFP, se utilizó como referencia el trabajo de Alvarado et al. (2017). Estos autores proponen una segmentación sismotectónica para Centroamérica, y en Costa Rica establecen 29 fuentes sísmicas, divididas en zonas de placa superior, interplaca e intraplaca/intraslab. Las M_{max} para estas fuentes se basaron en el análisis del momento sísmico acumulativo (Arroyo-Solórzano y Linkimer 2021), y los parámetros de ruptura asociados se obtuvieron del patrón predominante de rupturas en cada zona sísmica (Hidalgo-Leiva et al., 2022), así como estudios específicos como el de Zamora et al. (2021) para el Caribe, Arroyo y Linkimer (2021a) y Quintero

et al. (2023) para el Pacífico Sur, y Protti et al. (1994 y 2014) para la Península de Nicoya. Los epicentros para estas fuentes sísmicas se determinaron en los sitios donde ocurrieron eventos históricos (Red Sismológica Nacional de Costa Rica (2021)), o donde se propone que pueden ocurrir, según estudios recientes.

Cálculo de la amenaza sísmica

Selección de modelos de atenuación

Los modelos de atenuación (GMPEs por sus siglas en inglés), fueron seleccionados para cada régimen tectónico según las recomendaciones de Hidalgo-Leiva et al. (2022). Estos autores realizan una recopilación de 150 GMPEs disponibles en *OpenQuake* (GEM, 2020) y aplicables al contexto tectónico de Costa Rica, haciendo uso de bases de datos de registros acelerográficos de sismos con sus respectivos mecanismos focales, y con lo cual analizan el ajuste de los datos por medio de tres métodos: cálculo de residuales, modelo de verosimilitud y modelo de logaritmo de verosimilitud, para obtener una clasificación en cuatro categorías: A, B, C y D de los modelos por ordenada espectral y para cada régimen tectónico.

En este trabajo, al ser cálculos determinísticos y contemplarse múltiples escenarios, se ha decidido emplear únicamente un GMPE por régimen tectónico, con énfasis en la PGA (*Peak Ground Acceleration*). Esto último debido a que la mayoría de las edificaciones residenciales en Costa Rica son de uno o dos pisos, y a que el modelo de exposición de Calderón y Silva (2019), considera mayoritariamente dicho parámetro de intensidad. Cabe aclarar que también se realizó el cálculo de amenaza para las ordenadas espectrales de SA 0,3s y 0,4s (presentes en el modelo), sin embargo, a modo de representación de la amenaza, el enfoque se centró en la PGA. Siendo así, se seleccionó en *OpenQuake* el modelo de atenuación de mejor calificación para cada régimen tectónico (Hidalgo-Leiva, et al., 2022), siendo para fuentes corticales el de Kanno et al. (2006) Shallow, para interplaca el de (Zhao et al., 2006) *SInter*, y para Intraplaca/*Intraslab*, el de (Abrahamson et al., 2016) Sslab.

GMPEs desarrolladas para terremotos corticales de Costa Rica, como la de Climent et al. (1994) y Schmidt (2010), no se han seleccionado debido a no poseer los mejores ajustes con respecto del análisis de datos acelerográficos recientes (Hidalgo-Leiva, et al., 2022), y/o su no disponibilidad en el software *OpenQuake* (GEM, 2020) por la especificidad de variables puntuales requeridas según tipos de suelo. Debido a esto último, la GMPE de Schmidt et al. (2010) se sugiere mayoritariamente de uso para estudios muy locales, con una buena caracterización del tipo de suelo, por lo que su aplicabilidad a nivel de toda la GAM se ha descartado, al considerarse que incrementaría la incertidumbre asociada de definir constantes específicas para los suelos presentes.

Efecto local

Para la incorporación del efecto local, se realizó una microzonificación de la GAM con dos niveles de resolución, con base en información geológica, geotécnica y geofísica, y de mediciones de velocidades de onda de cortante (Vs30) en 42 sitios (IIG Consultores, 2017, 2020; Schmidt, 2014; Schmidt et al., 2005, Cuadro 1). El mayor detalle se determinó para el cantón de San José y alrededores (Z1), tomando como referencia el mapa de espesores de materiales no consolidados (Climent y Bolaños, 1999), utilizando también para corroborar los valores fundamentales del período del suelo medidos con la técnica de Nakamura para 185 puntos dentro del cantón San José, determinados por Schmidt-Díaz y Esquivel-Salas (2023). Para el resto de la GAM (Z2), se usó el mosaico global Vs30 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), basado en la pendiente topográfica con mapas integrados personalizados (Heath et al., 2020).

El mapa de microzonificación integrando la zona de mayor resolución Z1 (cantón de San José y alrededores) y el resto de la GAM (Z2), se determinó por medio de una revisión detallada de las zonas de transición, donde se priorizó la información de Z1. En este caso, cuando no hubo coincidencia en la clasificación del suelo entre Z1 y Z2, se tomó como verdadera la clasificación en Z1 y se suavizaron los contornos de acuerdo con las características geomorfológicas de la zona.

Cuadro 1

Puntos con información de Vs30 recopilados para la incorporación del efecto local en el estudio.

Latitud	Longitud	Vs30 (m/s)	Clasificación NEHRP	Zona	Referencia
-84,061	9,943	251	D		
-84,070	9,935	276	D		
-84,087	9,932	276	D		
-84,123	9,945	224	D		
-84,169	9,994	233	D	Z1	Schmidt (2005)
-84,106	9,922	286	D		
-84,035	9,926	164	DE		
-84,103	9,936	153	DE		
-84,049	9,888	226	D		
-84,064	9,899	312	CD		
-84,107	9,945	564	C		
-84,111	9,949	283	D		
-84,115	9,955	417	CD	Z1	
-84,128	9,964	322	CD		
-84,134	9,967	510	C		
-84,140	9,970	350	CD		IIG Consultores (2020)
-84,190	10,000	297	D		
-84,206	10,000	443	C		
-84,235	9,995	341	CD	Z2	
-84,268	9,996	436	CD		
-84,295	10,006	315	CD		
-84,097	9,915	380	CD		
-84,203	9,950	696	C		
-84,099	9,935	302	D	Z1	
-84,053	9,935	347	CD		
-84,044	9,937	340	CD		
-84,044	9,945	283	D		
-84,193	10,137	152	DE		
-83,927	9,864	267	D		
-83,869	9,827	269	D		Schmidt (2014)
-83,907	9,854	377	CD		
-84,036	9,995	279	D		
-84,036	9,995	279	D	Z2	
-84,117	10,000	432	CD		
-84,243	9,924	263	D		
-84,036	9,869	263	D		
-84,266	10,008	284	D		
-83,924	9,863	244	D		
-84,193	10,137	152	DE		

Cuadro 1 (continuación)

Puntos con información de Vs30 recopilados para la incorporación del efecto local en el estudio.

Latitud	Longitud	Vs30 (m/s)	Clasificación NEHRP	Zona	Referencia
-83,936	9,884	258	D		
-83,943	9,876	267	D	Z2	HG Consultores (2017)
-83,944	9,868	282	D		

Parámetros globales del cálculo

Para la ejecución de los cálculos se hizo uso de la plataforma *OpenQuake* (GEM, 2020), por medio de la opción de cálculo de escenarios determinísticos. El espaciamiento de la malla para el cálculo de las rupturas se definió en 0,2 arcos de grado (~200 m) y los sitios de cálculo de la amenaza se definieron cada 2 arcos de grado (~2 km). Se incorporó el efecto de sitio por medio de una malla con los valores de Vs30 promedio para cada tipo de suelo, según cada rango definido por la FEMA (2020) y de acuerdo con la incorporación de este parámetro para cada modelo de atenuación.

Las fuentes sísmicas se modelaron para el caso de fallas locales como “Falla Simple” al contarse con una traza relativamente bien definida, y para zonas de deformación cortical difusas, se usó el modelo de “Falla Arbitraria”. En el caso de zonas de subducción interplaca e intraplaca/*intraslab*, se modelaron como “Falla Compleja”, definiendo las profundidades superiores e inferiores de la losa que se subduce en el segmento asociado, de acuerdo con el modelo del Slab 2,0 del USGS (Hayes et al., 2018). Por último, al ser tantos escenarios, para representar la amenaza sísmica se muestran únicamente los resultados en la mediana de la distribución de aceleraciones en PGA según los GMPEs utilizados por régimen tectónico.

Exposición y vulnerabilidad

La exposición se refiere al conjunto de personas, propiedades, sistemas u elementos que están sujetos a pérdidas potenciales, mientras que sus características y circunstancias que lo hacen susceptible a los efectos dañinos de una amenaza es la vulnerabilidad (UNISDR, 2009). En este trabajo se ha utilizado el modelo de exposición residencial para Costa Rica propuesto por Calderón y Silva (2019), el cual es basado en la taxonomía de edificaciones de la Fundación Global Earthquake Model (GEM) (Brzev et al., 2013). Fue elegido ya que presenta información a nivel distrital para toda la GAM, permitiendo agrupar a nivel cantonal y provincial de manera adecuada, la información de aspectos como el costo de reemplazo, número de ocupantes y número de estructuras por cada unidad administrativa.

El modelo de Calderón y Silva (2019), se basa en 1) datos del censo de vivienda, 2) estadísticas e información pública y privada de construcción, y 3) siendo revisado por más de 25 expertos de Costa Rica. Este modelo presenta hasta 34 clases de edificios para todo el país, sin embargo, en el presente estudio se han seleccionado únicamente las tipologías presentes en los distritos de la GAM. De esta forma, para los 164 distritos de la GAM, se han identificado nueve tipologías constructivas (Cuadro 2), agrupables en cinco categorías según el material principal que las compone: concreto prefabricado (CR), mampostería confinada (MC), mampostería reforzada (MR), otros materiales (MATO) y Madera (W).

Para la asignación de la vulnerabilidad de las edificaciones, a pesar de que existen varias propuestas de curvas de capacidad y fragilidad para Costa Rica (Calderón, 2018; ERN-CAPRA, 2009; Esquivel, 2020; Hidalgo-Leiva, 2017; Hidalgo-Leiva et al., 2021), se ha decidido utilizar las curvas de fragilidad sugeridas por Calderón y Silva (2019), siendo las más consistentes con el modelo de exposición seleccionado. Los parámetros de las curvas de fragilidad para cada tipología se derivaron de modelos de análisis numéricos para mampostería y concreto reforzado de Calderón y Silva (2019), y las propuestas por (Villar-Vega et al., 2017) para los demás materiales (Cuadro 3).

Cuadro 2

Tipologías constructivas para la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica, según el modelo de exposición residencial de Calderón y Silva (2019).

Material principal	Tipología GEM	ID	Descripción
Concreto prefabricado (CR)	CR + PC/LW DUC/H:1	CR1	Concreto prefabricado, con un sistema de muros, alta ductilidad, 1 piso y posterior a 1980
	CR + PC/LW DLO/H:1	CR2	Concreto prefabricado, con un sistema de muros, baja ductilidad, 1 piso y posterior a 1980
Mampostería confinada (MC)	MCF/LW + DLO/H:1	MC1	Mampostería confinada, con un sistema de muros, baja ductilidad, 1 piso y posterior a 1980
	MCF/LW + DUC/H:1	MC2	Mampostería confinada, con un sistema de muros, alta ductilidad, 1 piso y posterior a 1980
	MCF/LW + DUC/H:2	MC3	Mampostería confinada, con un sistema de muros, alta ductilidad, 2 pisos y posterior a 1980
Mampostería reforzada (MR)	MR/LW + DUC/H:1	MR	Mampostería reforzada, con un sistema de muros, alta ductilidad, 1 piso y posterior a 1980
Otros (MATO)	MATO	MATO	Material informal o desconocido, no dúctil, 1 piso y con fecha desconocida
Madera (W)	W99/LPB + DLO/H:1	W1	Madera desconocida, sistema de poste y viga, baja ductilidad y 1 piso
	WLI/LW + DNO/H:1	W2	Madera con sistema de muros, media ductilidad, 1 piso y anterior a 1980

Estimación del riesgo (daños y pérdidas)

Para la estimación del riesgo sísmico por medio de la cuantificación de daños y pérdidas, se hicieron cálculos de amenaza con tres desviaciones estándar para cada modelo de atenuación, según el régimen tectónico. Además, se realizó para cada uno de los escenarios un total de 1000 simulaciones, y se obtuvo el promedio de daños y pérdidas asociadas por medio del *Input Preparation Toolkit de OpenQuake* (GEM, 2020).

En el cálculo de daños se han incorporado los modelos de exposición y fragilidad para las tipologías constructivas contempladas. Asimismo, para la estimación de las pérdidas económicas de tipo estructural, se ha utilizado el modelo de consecuencias de Yepes-Estrada y Silva (2017), para correlacionar cada nivel de daño con pérdidas económicas potenciales, donde según el valor del coste de remplazo de cada estructura, se asocia un 5 %, 25 %, 60 % y 100 % del coste asociado, para daño leve, moderado, extenso y colapso, respectivamente. Se han calculado el total de edificios dañados, los edificios de daño extenso + daño completo, y las pérdidas económicas, en cantidad absoluta y porcentualmente, para cada escenario.

Se profundizó en el mapeo y la distribución espacial de los niveles de daño y pérdidas económicas a nivel cantonal y provincial, de cuatro escenarios considerados de relevancia especial. Estos escenarios responden a: 1) el peor escenario por daños y pérdidas totales, 2) la zona del CDNP, donde se ha presentado el terremoto cortical de mayor magnitud registrado en Costa Rica, 3) el sector de subducción interplaca en el Pacífico Sur de Costa Rica, donde se puede esperar pronto un terremoto importante de acuerdo al periodo de recurrencia según la historia sísmica de la zona y 4) la posibilidad de un terremoto de profundidad intermedia en la losa que se subduce (*intraplaca/intraslab*). A dichos escenarios se les aproximó la distribución del daño medio (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), a través del Índice de Daño Medio (IDM), el cual expresa el grado de daño promedio (Ecuación 1).

$$IDM = \frac{(VivDañoLeve + 2 * VivDañoModerado + 3 * VivDañoExtenso + 4 * VivDañoCompleto)}{(VivDañoLeve + VivDañoModerado + VivDañoExtenso + VivDañoCompleto)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Para el peor de los escenarios se ha realizado adicionalmente una aproximación de daño físico por medio de la estimación de viviendas inhabitables y personas sin hogar; y de víctimas, con variación diurna y nocturna. Las viviendas inhabitables se estiman como el número de edificios de daño completo + 0,9* número de edificios de daño extenso, mientras que el número de personas sin hogar se obtiene de multiplicar la cantidad de habitantes por edificio por el número de viviendas inhabitables calculado anteriormente (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Las víctimas (K_i), se estiman de acuerdo con el material de la tipología constructiva, y se clasifican en víctimas mortales, de urgencia, de atención médica y de heridas leves, calculándose como: $K_i = C * M1 * M2 * M3 * (M4 + M5 * (1 - M4))$.

Cuadro 3

Curvas de fragilidad para cada tipología constructiva de la GAM, según Calderón y Silva (2019).

ID	Nivel de daño		Leve		Moderado		Extenso		Completo	
	Tipología	IML	Media	Desv. Est	Media	Desv. Est	Media	Desv. Est	Media	Desv. Est
CR1	CR + PC/LW + DUC/H:1	PGA	0,41	0,17	0,75	0,34	1,15	0,70	1,58	1,00
CR2	CR + PC/LW + DLO/H:1	PGA	0,26	0,08	0,39	0,10	0,53	0,13	0,69	0,24
MC1	MCF/LW + DLO/H:1	PGA	0,47	0,18	1,07	0,46	1,28	0,55	1,74	0,89
MC2	MCF/LW + DUC/H:1	PGA	0,80	0,19	1,28	0,28	1,55	0,31	1,71	0,38
MC3	MCF/LW + DUC/H:2	PGA	0,45	0,15	0,78	0,19	0,93	0,21	1,11	0,27
MR	MR/LW + DUC/H:1	PGA	0,80	0,19	1,28	0,28	1,55	0,31	1,71	0,38
MATO	MATO	PGA	0,28	0,07	0,44	0,10	0,61	0,22	0,82	0,29
W1	WLI/LW + DNO/H:1	Sa (0,3)	0,37	0,05	0,67	0,09	0,98	0,16	1,18	0,25
W2	W99/LPB + DLO/H:1	Sa (0,4)	0,26	0,07	0,53	0,14	0,66	0,17	0,85	0,22

Para su estimación se usaron las relaciones de Coburn y Spence (2002), las cuales involucran el número de edificaciones colapsadas, con base en relaciones por material de tipología constructiva (C), la tasa de ocupación (M1), el porcentaje de personas que se encuentran en la vivienda a la hora del terremoto (M2), y el porcentaje medio de personas atrapadas por colapso de acuerdo con la intensidad sísmica (M3). A su vez, M4 y M5 corresponden con constantes según el tipo de material constructivo, considerando en este caso un comportamiento similar ante el colapso entre concreto reforzado y madera y entre mampostería y otros materiales. M4 corresponde con una distribución estimada de víctimas por colapso según tipología, y M5 el porcentaje de personas atrapadas entre los escombros que mueren en función de la respuesta post evento para el tipo de tipología constructiva.

Las víctimas se estimaron para una ocupación diurna y nocturna, considerando diferencias en la tasa de ocupación en cada momento, de un 50 % de ocupación en el día y el 100 % de noche según la información del modelo de exposición. Finalmente, los resultados de cada horario se promediaron, para obtener una aproximación general que represente las víctimas posibles por cada categoría (muertos, urgencia, atención médica, heridas leves).

Resultados

Fuentes sísmicas

Los siete escenarios sísmicos potencialmente desfavorables para la GAM obtenidos, según la metodología reseñada se muestran en la figura 3. El cuadro 4 resume los parámetros de los escenarios de ruptura utilizados para los cálculos de amenaza y se describe a continuación cada una de las fuentes seleccionadas, agrupadas por régimen tectónico.

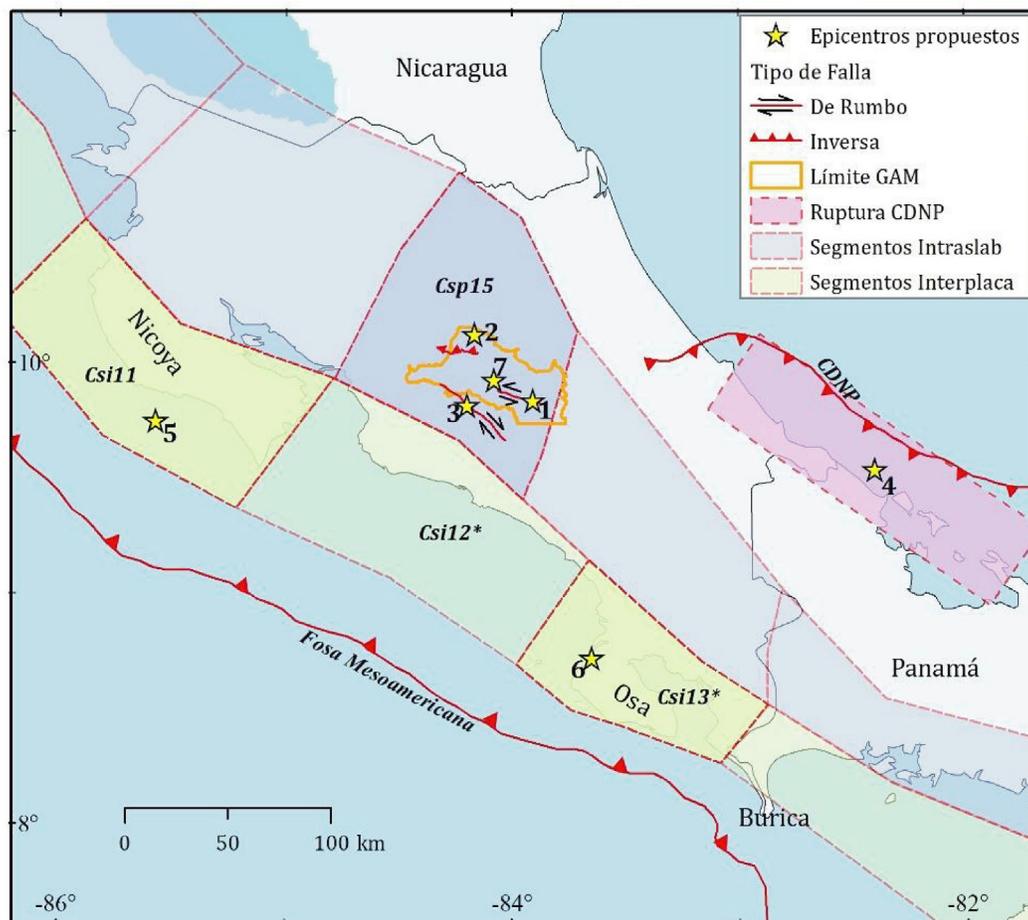


Fig. 3: Fuentes sísmicas consideradas para la evaluación del riesgo sísmico de la GAM. El número corresponde con el ID del escenario señalado en el cuadro 4, y se indica con asterisco las fuentes que romperían en conjunto en el escenario planteado para estas.

Fallamiento local

De la evaluación de fallas locales, se han seleccionado la falla Aguacaliente, de rumbo sinistral, la falla Alajuela de tipo inversa, y la falla Jaris, de rumbo dextral, como unas de las de mayor potencial sísmico y potencialmente perjudiciales para la GAM (Figura 3). Los epicentros se determinaron para la Falla Aguacaliente como el del terremoto de Cartago de 1910 (e.g., Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021; Red Sismológica Nacional de Costa Rica, 2021), mientras que para las fallas de Alajuela y Jaris, se seleccionó el epicentro más desfavorable o cercano para la GAM, siguiendo la línea de peor escenario (Cuadro 4 y Fig. 3). En todos los casos la ubicación del hipocentro se determinó a una profundidad de 10 km, considerando una zona sismogénica cortical de 1 a 15 km (Alvarado, et al., 2017).

Los parámetros de ruptura (strike, dip y rake), fueron determinados con base en estudios neotectónicos en la zona, de acuerdo con el tipo de fallamiento asociado y el mapeo de la traza de falla (e.g., Alonso-Henar et al., 2013; Montero, 2001; Montero et al., 2010, 2016; Montero y Rojas, 2014; Rodríguez, 2017). Por otra parte, para la estimación de la M_{max} de los escenarios más desfavorables (Cuadro 4), esto se determinó con base en la longitud total de las trazas de falla de acuerdo con estos estudios previos, siendo de 23.6 km para la falla Aguacaliente, de 21.8 km para la falla Alajuela y de 42 km para la

Cuadro 4

Parámetros de ruptura para cada uno de los escenarios sísmicos considerados.

ID	Fuente sísmica	Longitud	Latitud	Profundidad (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Mw
1	Falla Aguacaliente	-83,910	9,840	10	95	90	0	6,5
2	Falla Alajuela	-84,168	10,128	10	282	45	90	6,6
3	Falla Jaris	-84,200	9,820	10	297	90	0	6,9
4	Cinturón Def. del Norte de Panamá	-83,073	9,685	15	125	20	70	8,0
5	Subducción Nicoya	-85,572	9,752	15	305	15	90	7,9
6	Subducción Zona Sur	-83,650	8,720	20	300	30	90	8,1
7	Intraslab bajo San José	-84,080	9,930	85	105	90	75	7,3

falla Jaris. Se definió la M_{max} creíble como el promedio de relaciones empíricas de escalamiento de magnitudes aplicables al contexto tectónico de Costa Rica (e.g., Anderson et al., 2017; Brengman et al., 2019; Thingbaijam et al., 2017; Wells y Coppersmith, 1994), siendo de 6,5, 6,6 y 6,9 Mw para las fallas de Aguacaliente, Alajuela, y Jaris, respectivamente.

Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP)

La selección de un escenario en el CDNP responde al interés que suscita dicho sector debido a ser la zona de ruptura del terremoto de Limón de 1991, siendo el terremoto de mayor magnitud del que se tiene registro instrumental en el país con Mw 7,7 (e.g., Montero et al., 1994; Montero-Pohly, 2021; Ponce et al., 1994; Zamora et al., 2021). Esta zona es agrupada como de fallamiento cortical por Alvarado et al. (2017), sin embargo, corresponde mayormente con una zona de deformación cortical en un límite de placas (interplaca) donde múltiples autores proponen una subducción incipiente de la placa Caribe bajo la microplaca de Panamá (e.g., Alvarado et al., 2017; Arroyo y Linkimer, 2021b, Bourke et al., 2023).

El modelado del escenario sísmico para esta fuente se ha determinado como una zona de ruptura derivada de una Falla arbitraria en dicho sector, usando un hipotético epicentro y los parámetros de ruptura propuestos por Zamora et al. (2021) (Fig. 3 y Cuadro 4). Estos autores evalúan el potencial tsunamigénico de fuentes sísmicas del Caribe de Costa Rica y seleccionan esta zona como la de posible ruptura de un terremoto de Mw 8,0, siendo este el potencial máximo estimado para el CDNP por Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021).

Subducción interplacas

Se han seleccionado dos segmentos determinados por Alvarado et al. (2017), los cuales son conocidos por su alto potencial sísmico y/o de gran relevancia actual: el segmento de Nicoya al Noroeste del país (Csi11) y el de Osa en el Pacífico Sur (Csi13) (Fig. 3). El primero se ha seleccionado por ser una zona de gran acople sísmico (Protti et al., 1994, 2014), donde han ocurrido terremotos importantes en el pasado reciente, como el de Nicoya de 1950 y 2012, de Mw 7,7 y 7,6, respectivamente (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021; Red Sismológica Nacional de Costa Rica, 2021). El segundo se ha seleccionado debido a que, en este sector al Sureste de Costa Rica, se han generado al menos seis terremotos destructivos con Mw > 7,0 desde 1803, lo que sugiere el peligro inminente de un próximo terremoto en esta zona, habiendo ocurrido el último en 1983 (Arroyo y Linkimer, 2021a).

La M_{max} con la cual se han modelado estos escenarios fue de Mw 7,9 y 8,1 para los segmentos de Nicoya y Osa, respectivamente. Para el caso de Nicoya, la M_{max} se determinó con base en el potencial máximo inferido asociado al segmento

según Arroyo y Linkimer (2021a), mientras que, para el segmento de Osa, se determinó con base en el potencial máximo según el análisis de estos mismos autores, basado en la cuantificación del momento sísmico acumulativo de todo el catálogo de terremotos, y asumiendo una extensión de la ruptura hacia el segmento del Pacífico Central de Costa Rica.

Los epicentros para ambos escenarios se han determinado simulando el terremoto más reciente ocurrido, sin embargo, debido al gran tamaño de estos hipotéticos terremotos, en el caso de Nicoya abarcaría casi el total del segmento en cuestión y para el terremoto en la Zona Sur, implicaría la extensión de la ruptura hacia el segmento adyacente en el Pacífico Central (Csi12), como ya se propone en Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021). Este potencial y la posible extensión en la ruptura es respaldado por estudios que han llegado a proponer hasta un potencial de 8,5 Mw para un terremoto de subducción en el Sur de Costa Rica (Schellart y Rawlinson, 2013). Los parámetros de ruptura (strike, dip y rake) para cada segmento se han definido según Hidalgo-Leiva, et al. (2022) (Cuadro 4) y su modelado se ha establecido como “Falla Compleja” de acuerdo con las profundidades del Slab (Hayes et al., 2018).

Subducción intraslab

El escenario de profundidad intermedia en la losa que se subduce representa un interés particular, ya que un sismo de $M_w > 7,0$ justo debajo de la GAM podría ser potencialmente destructivo. Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021), proponen un potencial de hasta 7,3 Mw para la zona sísmica Csi15 (Alvarado et al., 2017). Este escenario toma mayor relevancia al considerar que grandes terremotos corticales e interplaca, han ocurrido en el pasado reciente, sin embargo, terremotos importantes en el *intraslab* no ocurren desde 1948 (Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021). El foco de este hipotético terremoto se ha seleccionado debajo de San José, representando el escenario más perjudicial (Fig. 3), y se ha modelado como “Falla Compleja” de acuerdo con el modelo del Slab 2,0 (Hayes et al., 2018), correspondiendo en este sector a una profundidad hipocentral de 85 km, y los parámetros de ruptura (*strike, dip y rake*) se tomaron de Hidalgo-Leiva, et al. (2022) (Cuadro 4).

Cálculo de la amenaza sísmica

En la zona Z1, se identificó una relación robusta entre el espesor (Climent y Bolaños, 1999) y el tipo de suelo, según la clasificación del FEMA (2020), siendo correspondientes los rangos de espesores de 0 a 5m, 5 a 10m, 10 a 15m, 15 a 25m, y $> 25m$, con suelos tipos C, CD, D, DE, y E, respectivamente (Fig. 4). Esto se ajustó con 22 mediciones de Vs30, lo cual permitió refinar el detalle y corroborar la asociación de los rangos de espesor con las categorías de tipo de suelo del FEMA (2020). Para la zona Z2, los valores de Vs30 del USGS presentan un rango entre 208 y 900 m/s (Heath et al., 2020), y fueron clasificados en suelos tipo B, CB, C, CD, D y DE (Fig. 4), según el FEMA (2020). Para algunos sectores se correlacionó la clasificación de suelo obtenida de este mapa base, con resultados de mediciones de Vs30 en los 20 puntos restantes con valores de Vs30 conocidos (Cuadro 1).

Definido el mapa de efecto de sitio, se calcularon las aceleraciones (Fig. 5) para cada escenario del cuadro 4. Se utilizó el modelo de atenuación para fallamiento superficial de Kanno et al. (2006) para las fallas locales y el CDNP (escenarios 1, 2, 3 y 4), el de Zhao et al. (2006) para los escenarios en segmentos interplaca (5 y 6), y el de Abrahamson et al. (2016) para subducción *intraslab* (escenario 7). Los resultados muestran aceleraciones de hasta 0,6 a 0,8g, para las fuentes por fallamiento local cercanas, siendo estas las de mayor potencial sacudida para la GAM, con efectos locales relevantes e influencia de su geometría y de la cercanía a la falla en la distribución de aceleraciones (Figs. 5a, 5b y 5c).

A pesar de que los terremotos asignados a la zona del CDNP y a las fuentes interplaca son considerablemente más grandes en términos de magnitud que las de fallamiento local (Cuadro 4), las aceleraciones que generarían en la GAM son considerablemente menores, con valores entre 0,1 y 0,3g y efectos de sitio en sectores como Alajuela y Heredia (Figs. 5d, 5e y 5f). Esto demuestra una importante atenuación en términos de PGA para fuentes sísmicas a más de 100 km de distancia. Además, se observa que un escenario a profundidad intermedia (85 km) dentro de la placa que se subduce (*intraslab*) debajo de San José, generaría una mayor sacudida en la GAM que los terremotos de magnitud considerablemente más grande por subducción interplacas, con valores entre 0,3 y 0,4g y una distribución más homogénea de aceleraciones (Fig. 5g). También se evidencian efectos de sitio para suelos blandos (CD, D, DE y E) que amplificarían hasta aceleraciones de 0,6g (Fig. 5g).

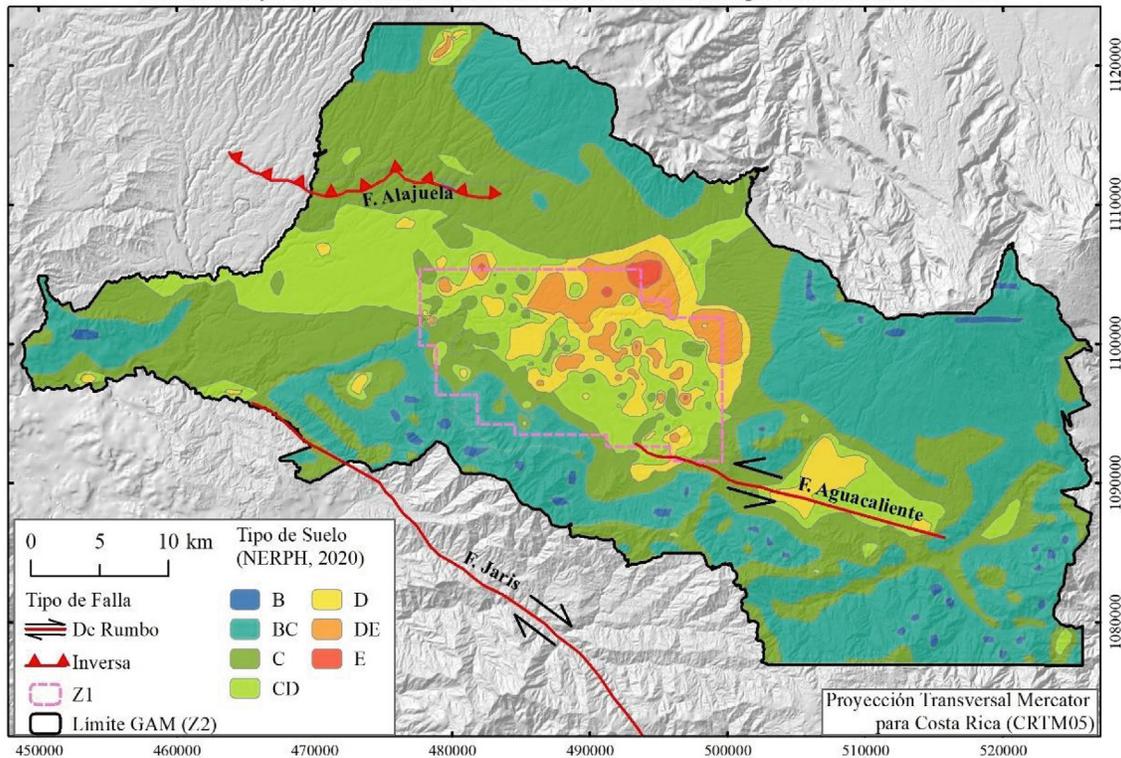


Fig. 4: Microzonificación sísmica (efecto de sitio) de la GAM y fallas locales dentro o cerca de la GAM, seleccionadas como escenarios sísmicos.

Exposición y vulnerabilidad

El modelo de exposición muestra que para la GAM hay un aproximado de 586 332 edificaciones expuestas, las cuales se distribuyen en nueve tipologías constructivas (Cuadro 2), con un coste de remplazo total de ~53 mil millones de dólares (Calderón y Silva, 2019). Los cantones de mayor cantidad de edificios son San José, Desamparados y Alajuela (Fig. 6a). Por otra parte, las densidades poblacionales más altas se concentran en el cantón de San José y sus alrededores, principalmente al sureste de dicho cantón (Fig. 6b). La capital San José y sus cantones, es por mucho la zona de mayor exposición, donde se triplica en cantidad de edificios y personas con respecto de las otras provincias (Fig. 6).

En las cuatro provincias predominan las tipologías de mampostería confinada MC2 y MC3 (Cuadro 2 y Fig. 6a). La primera es la más dominante al tratarse de edificaciones de 1 piso, representando entre el 35 y 43 % de las edificaciones totales en cada provincia. La segunda tipología que predomina son las edificaciones del mismo tipo, pero de 2 plantas, que representan entre el 14 y 18 % del total de edificios en cada provincia. El resto de las tipologías representan porcentajes de alrededor del 10 % del total de edificios por provincia. Asimismo, las tipologías MC2 y MC3 también son las de mayor coste de remplazo asociado, sin embargo, en esta rúbrica las edificaciones de 2 pisos (MC3) son las que dominan el coste, representando para cada provincia entre el 45 y 50 % del coste de remplazo total y en conjunto con las MC2, suman aproximadamente el 80 % de los costes de remplazo para cada provincia.

Las tipologías constructivas clasificadas como desconocidas o de materiales de baja calidad representan un porcentaje muy bajo en cada provincia (~ 5 %), lo cual permite deducir que se suele construir de manera adecuada o regulada en el país. Las funciones de fragilidad para cada una de las tipologías (Cuadro 3) se asociaron a funciones de vulnerabilidad por medio de un modelo de consecuencias, según lo descrito en la metodología.

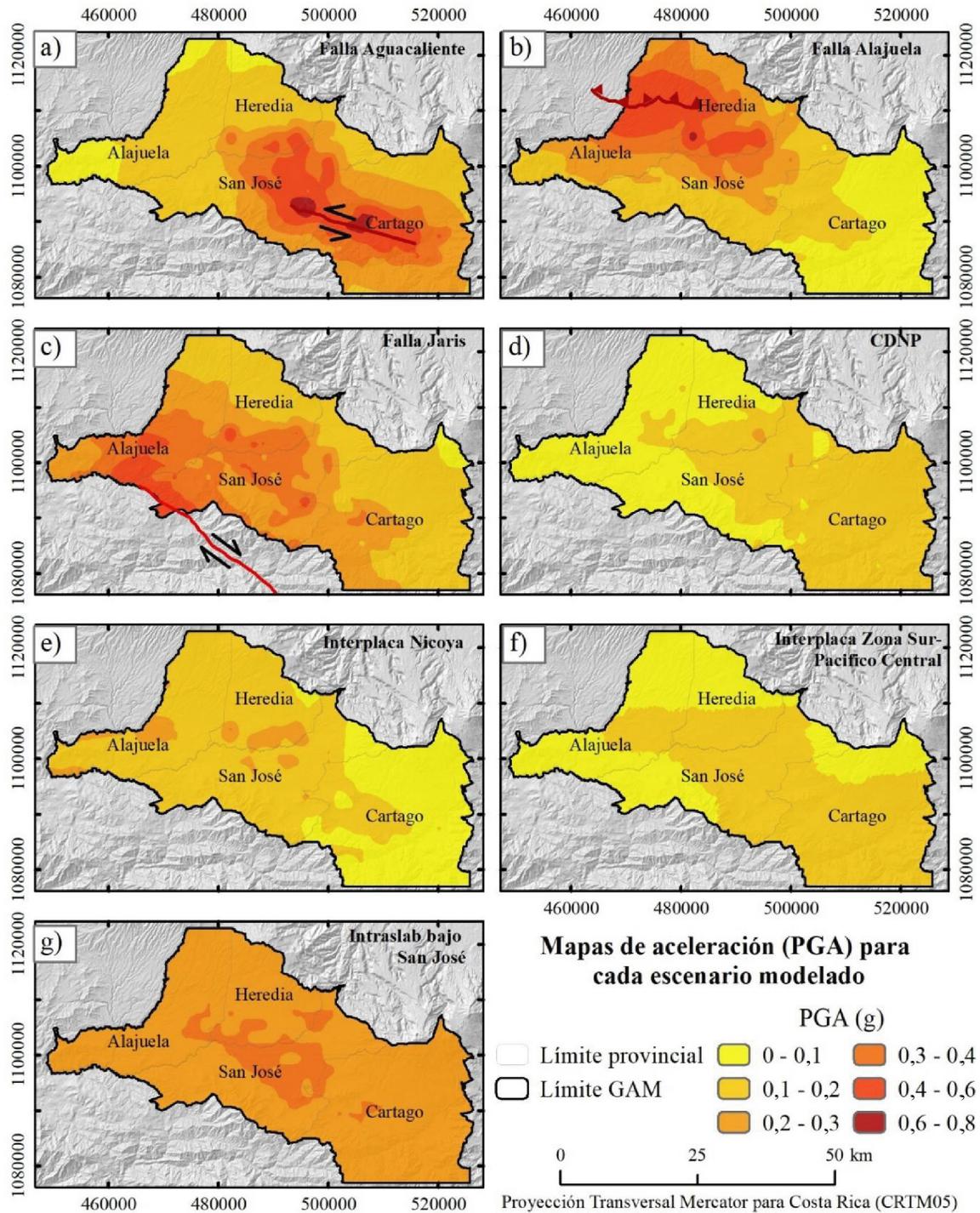
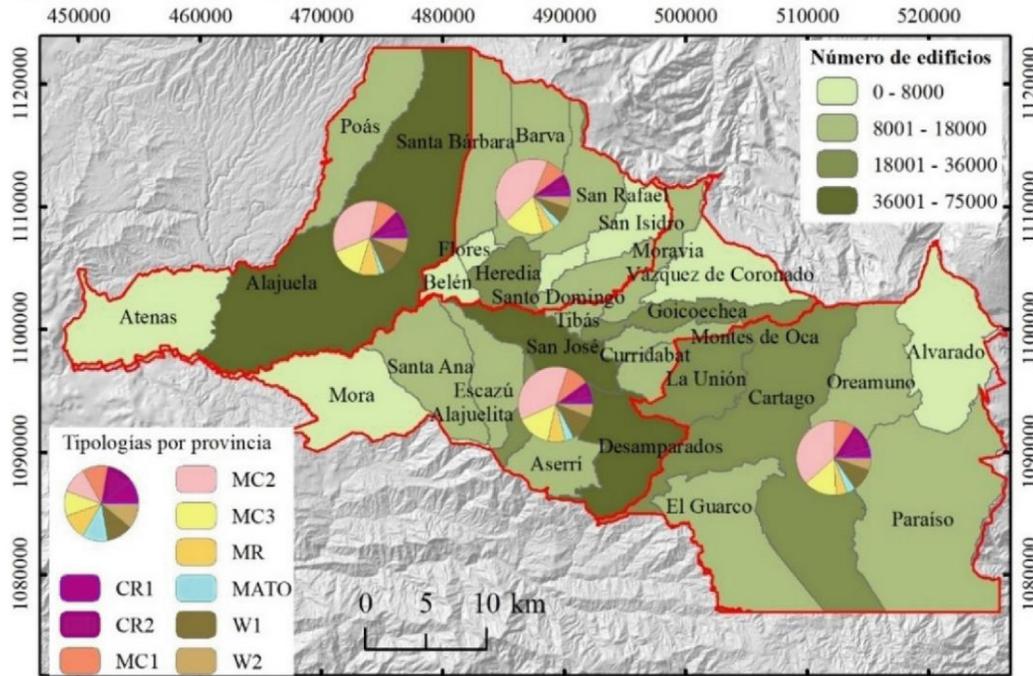


Fig. 5: Aceleración PGA para cada escenario sísmico considerado (Tabla 4). a) Terremoto de 6,5 Mw en Falla Aguacaliente (escenario 1). b) Terremoto de 6,6 Mw en Falla Alajuela (escenario 2). c) Terremoto de 6,9 Mw en Falla Jaris (escenario 3). d) Terremoto de 8,0 Mw en el CDNP (escenario 4). e) Terremoto de 7,9 Mw en segmento de subducción interplaca de Nicoya (escenario 5). f) Terremoto de 8,1 Mw en segmento de subducción interplaca de la Zona Sur (escenario 6). d) Terremoto de 7,3 Mw en el interior de la placa que se subduce (intraslab), debajo de San José (escenario 7).

a) Distribución de tipologías constructivas y número de edificios



b) Densidad y cantidad de habitantes

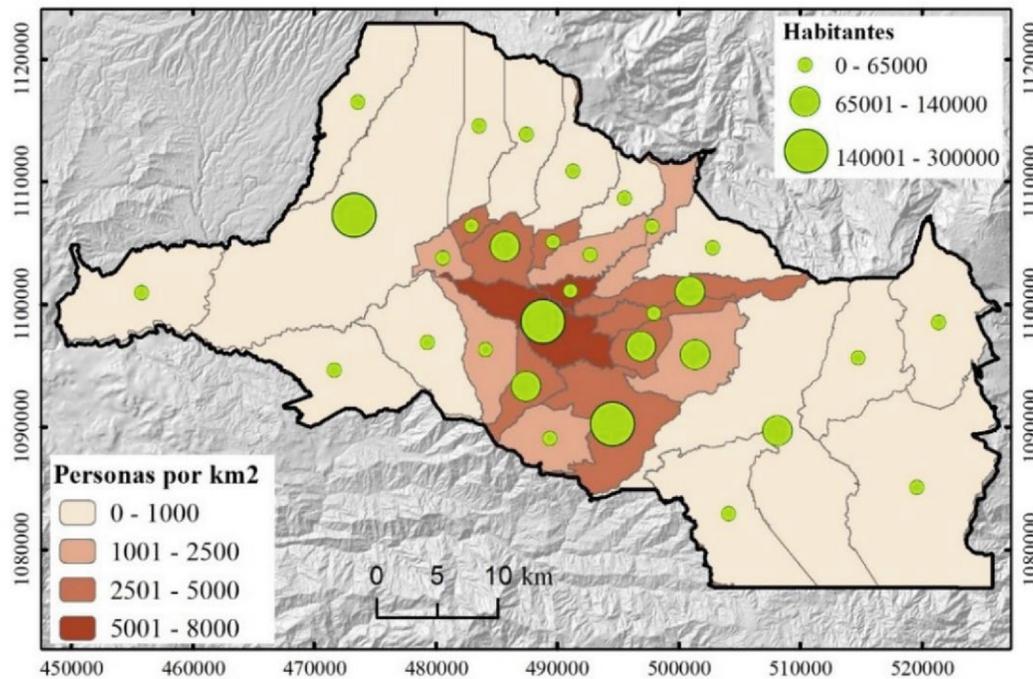


Fig. 6: Modelo de exposición y vulnerabilidad para la GAM. a) Proporción de tipologías constructivas para cada provincia de la GAM y número de edificaciones por cantón. b) Densidad de habitantes por cantón.

Estimación del riesgo

Distribución y cálculo de daños y pérdidas económicas

El total de daños y pérdidas económicas para cada escenario modelado muestra que se generarían daños entre el 8 % y 34 % del total de edificaciones expuestas en la GAM (Fig. 7 y Cuadro 5). Del total de edificios, entre el 1 y 14 % presentarían niveles de daño extenso y completo, lo cual implicaría grandes pérdidas asociadas, que corresponderían con alrededor del 1 y 12 % del coste de remplazo total de las edificaciones de la GAM (Fig. 7 y Cuadro 5).

Los escenarios sísmicos más perjudiciales corresponderían con los de falla local (1, 3 y 2), seguidos por el escenario *intraslab* debajo de San José (7), y por último se tendrían los terremotos de grandes magnitudes en el CDNP (4) y en la zona interplacas de Nicoya y Pacífico Sur (5 y 6). El peor escenario determinado de este análisis correspondería con un terremoto por fallamiento local en la falla Aguacaliente, siendo el escenario de menor magnitud modelado (Fig. 7 y Cuadro 5). Esto se explicaría debido a que esta falla discurre mayoritariamente a través de la GAM, cerca de algunas de las zonas más pobladas y de mayor cantidad de edificios expuestos. Cabe reseñar que, a pesar de las diferencias en nivel de daño y pérdida económicas, cada uno de estos escenarios representaría un potencial impacto sumamente significativo para la economía y la seguridad de la población del país.

Se analizaron más en detalle los resultados de daños y pérdidas económicas de los escenarios 1, 4, 6 y 7, según los criterios reseñados en la metodología. La figura 8 muestra la distribución de pérdidas económicas por cantón y los niveles de daño agrupados a nivel provincial, para cada uno de estos escenarios. Las pérdidas económicas muestran que para los escenarios 1, 4 y 7, muchos de los cantones superan los 100 millones de dólares.

La distribución de los cantones mayormente afectados evidencia la influencia de la cercanía a las fuentes, donde el escenario 7, a pesar de no ser el que mayor cantidad de pérdidas económicas totales generaría, es el que afectaría de manera importante a la mayoría de los cantones (Fig. 8d). Esto se debe a que la afectación sería más homogénea para toda la GAM, generando daños similares en los distintos cantones, a diferencia del escenario 1 (peor escenario), donde las pérdidas se concentran de manera importante en los cantones cercanos a la falla (Cartago y el sureste de San José) y en aquellos que presentan mayor exposición como las cabeceras de provincia (Fig. 8a). El escenario 6, a pesar de ser el de mayor magnitud (Mw 8,1), en la mayoría de los cantones las pérdidas económicas no superan los 25 millones de dólares (Fig. 8c), donde la mayoría de las pérdidas económicas se concentrarían en el cantón de San José (entre 50 y 100 millones de dólares), debido a más elementos y valor expuesto. Este efecto se puede asociar con la lejanía y parámetros de ruptura de dicha fuente.

La distribución de los niveles de daño muestra para los cuatro escenarios seleccionados que la provincia de mayores daños es San José. Esto de nuevo tiene relación con la mayor cantidad y exposición de sus edificaciones. Para el escenario 1, las provincias de San José y Cartago son las que presentan mayor porcentaje de daño extenso y completo (~15 %) (Fig. 8a). Para el escenario 4 sobresale levemente San José (Fig. 8b), con respecto de Cartago y Heredia, siendo, sin embargo, para estas tres provincias, similares los porcentajes (~5 %). El escenario 6 no presentaría niveles de daño extenso y completo (Fig. 8c), y el escenario 7, presenta una homogeneidad en las cuatro provincias de los niveles de daño (Fig. 8d), con alrededor de un ~10 % de daños extenso y completo.

El Índice de daño medio (IDM) por provincia, muestra que para los cuatro escenarios seleccionados los valores rondan entre 1,5 y 2,3, representando un daño medio moderado (1,5-2,5), según Milutinovic y Trendafiloski, (2003), con excepción de Cartago donde para el escenario 6 se obtiene un IDM de 1,4, indicando un daño medio leve (0,5-1,5; Milutinovic y Trendafiloski, 2003) (Fig. 9a).

El porcentaje con respecto del total del coste de remplazo por provincia (Fig. 9b), muestra que para el escenario 1 en las provincias de San José y Cartago se perdería alrededor del 15 % del coste de remplazo del total de edificaciones; para el escenario 4 las pérdidas rondan el 7 % para San José, Cartago y Heredia; para el escenario 6 estas son cercanas al 1 % en todas las provincias; y para el escenario 7 son muy similares en las cuatro provincias (~7 %). Esto reafirma que la mayor cantidad de pérdidas absolutas para San José, responden a su exposición y cantidad de edificaciones, ya que, al compararse porcentualmente con el resto de las provincias para los escenarios seleccionados, los porcentajes relativos son muy similares, con excepción de Alajuela, donde para estos cuatro escenarios, sería la de menor nivel de daños y pérdidas económicas.

El IDM a nivel cantonal para cada uno de estos escenarios, muestra de manera muy clara la influencia de la cercanía de

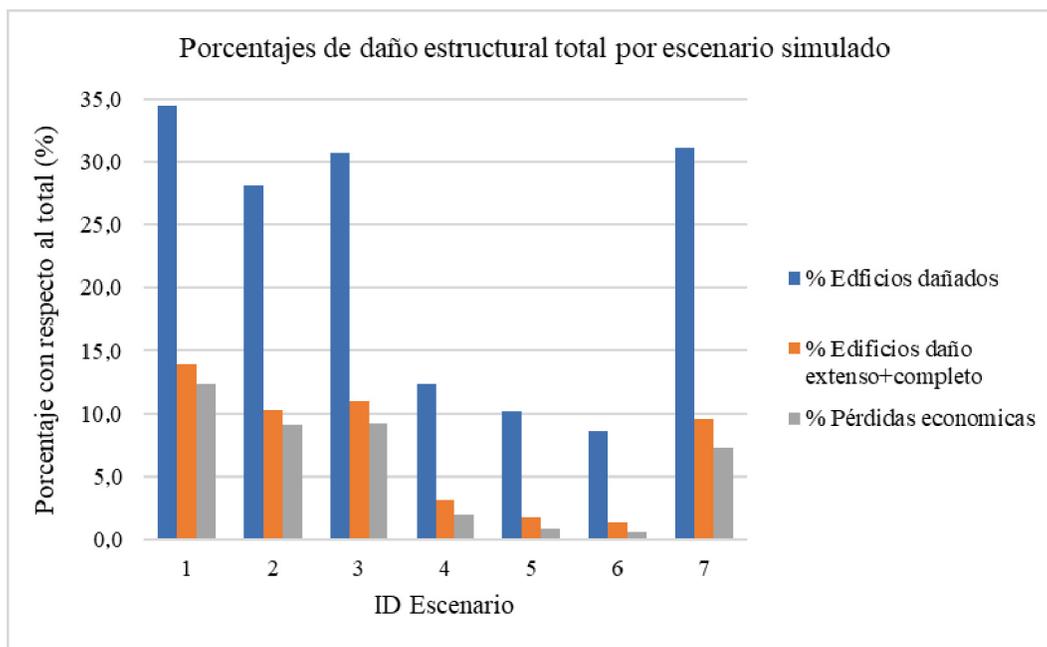


Fig. 7: Edificios dañados, de daño extenso y completo, y pérdidas económicas totales para cada uno de los siete escenarios modelados (ver Cuadro 4).

la fuente. En este caso, es evidente como los cantones que sufren más en el escenario 1, son los de la provincia de Cartago y los del sureste de San José, en el sector por donde discurre la falla Aguacaliente (Fig. 10a). En el escenario 4, el IDM se concentra hacia el este de la GAM (en dirección hacia el Caribe) y en los cantones cabeceras de provincia por la mayor cantidad y valor de edificaciones (Fig. 10b). En el escenario 6 (Fig. 10c) el IDM es mayor hacia el sureste de la GAM, en dirección a la fuente (Pacífico Sur). Por último, en el escenario 7 la distribución del IDM refleja de manera muy clara la homogeneidad en la afectación que provocaría un terremoto como este en el intraplaca/*intraslab* para toda la GAM (Fig. 10d).

Viviendas inhabitables, personas sin hogar y víctimas para el peor escenario

Se desglosa la distribución de pérdidas por daño físico y las víctimas para el escenario sísmico de Mw 6,5 en la Falla Aguacaliente (escenario 1/peor escenario). Con respecto al daño físico, se evaluó la cantidad de viviendas inhabitables, derivadas de los niveles de daño, y se hizo una aproximación a la cantidad de personas que se quedarían sin hogar producto de dicha inhabitabilidad de viviendas. En lo que respecta a víctimas, se aproximó un estimado de tipos de víctimas producto de aquellas personas atrapadas en las edificaciones. Esto se ha aproximado con variación diurna y nocturna, y mostrando una distribución espacial derivada del promedio entre dichas ocupaciones estacionales.

A nivel provincial, la mayor cantidad de viviendas inhabitables y personas sin hogar se produciría en San José (Fig. 11a). Esto responde a la mayor cantidad de habitantes y edificaciones en dicha provincia, donde habría alrededor de 50 mil viviendas inhabitables y cerca de 200 mil personas sin hogar ante este escenario. Para cada provincia el principal efecto contrastante con respecto a la variación ocupacional de las edificaciones residenciales se muestra en la cantidad de personas sin daño que resultarían de día con respecto a la noche (Fig. 11b). Esto es principalmente evidente para San José y Cartago, donde esta proporción es de hasta 4 veces más personas sin daño en el día con respecto de la noche. El promedio de ambas ocupaciones estacionales (Fig. 11b), muestra la distribución de tipos de víctimas con una aproximación general que representa un escenario de ocupación intermedia, donde habrían ~4000 muertos en San José, ~100 en Alajuela, ~1500 en Cartago y ~1000 en Heredia.

Cuadro 5

Edificios dañados y pérdidas económicas totales estimadas para cada escenario sísmico modelado.

Escenario	Edificios dañados	% Edificios dañados	Edificios daño extenso+completo	% Edificios daño extenso+completo	Pérdidas económicas (USD)	% Pérdidas económicas
1	201 946	34,4	81 240	13,9	\$6 580 522 230	12,3
2	165 054	28,2	60 222	10,3	\$4 873 820 000	9,1
3	180 206	30,7	64 202	10,9	\$4 917 997 060	9,2
4	72 258	12,3	17 994	3,1	\$1 036 961 290	1,9
5	59 388	10,1	10 194	1,7	\$475 682 136	0,9
6	50 522	8,6	7 827	1,3	\$355 630 868	0,7
7	182 556	31,1	55 702	9,5	\$3 856 753 934	7,2

En la figura 12a, se muestra que el mayor porcentaje y número de casas inhabitables a nivel cantonal (entre el 15 y 25 %) se distribuyen hacia el sector este-sureste de la GAM, en las cercanías de la traza de falla Aguacaliente. La cantidad de personas sin hogar es proporcional a las viviendas inhabitables, por lo que mayoritariamente sigue la misma tendencia, con valores de hasta entre 20 y 50 mil personas sin hogar en cantones como Desamparados, Cartago, San José y Goicoechea (Figura 12a). El cuadro 6 muestra el desglose para cada cantón de los aspectos mencionados anteriormente, en cantidades absolutas y porcentajes relativos, así como el IDM para cada cantón ante este peor escenario.

La distribución de víctimas a nivel provincial refleja lo descrito en los apartados anteriores, donde con base en los niveles de daño (Figs. 8a y 10a), se deriva la posibilidad de colapso y esto se refleja en los resultados de víctimas según la cantidad de personas atrapadas por cantón (Fig. 12b). La mayor cantidad de víctimas de todos los tipos se tendría en San José, siendo la provincia que encabeza la lista en cuanto a muertos, urgencias, atención médica y heridas leves, y donde se estima que habría mayor cantidad de personas atrapadas. Los tipos de víctima serían predominantemente heridos leves y de atención médica. Cartago presenta la misma tendencia descrita para San José, pero con cifras alrededor de tres veces menores. En el caso de Heredia y Alajuela, las víctimas en relación con Cartago y San José son mucho menores y predominan en este caso personas sin daño o de daño leve.

Para el peor escenario (1), se estima que cantones como San José, Desamparados, Curridabat, Goicoechea, Cartago y El Guarco, serían de los más afectados. Esto se debe a la mayor exposición de edificaciones residenciales en estas zonas y a la cercanía a la fuente (falla Aguacaliente, Fig. 3). Para este mismo escenario, se determinó que, de acuerdo con el promedio entre la estacionalidad de las ocupaciones diurna y nocturna, se tendrían 7890 muertes, 79 275 viviendas inhabitables y 303 775 personas sin hogar (Fig. 12b).

Finalmente, el cuadro 7 muestra el desglose de los tipos de víctimas para una ocupación residencial nocturna (peor escenario), una ocupación diurna (aproximado como el 50 % de la ocupación nocturna) y el promedio de ambas (Fig. 12b). Esta variación horaria resalta una gran diferencia principalmente entre personas sin daño de día con respecto a la noche (de 4 a 5 veces más personas sin daño de día que de noche), especialmente para los cantones de las provincias de San José y Cartago.

Discusión

Potencial sísmico de las fuentes

Los resultados de los escenarios analizados son condicionados en gran medida por el potencial estimado de las fuentes. Se determinaron M_{max} creíbles desde distintos criterios, que tienen tanto implicaciones tectónicas, como de posibilidad real de ocurrencia, con magnitudes en el rango de 6,5 a 8,1 Mw.

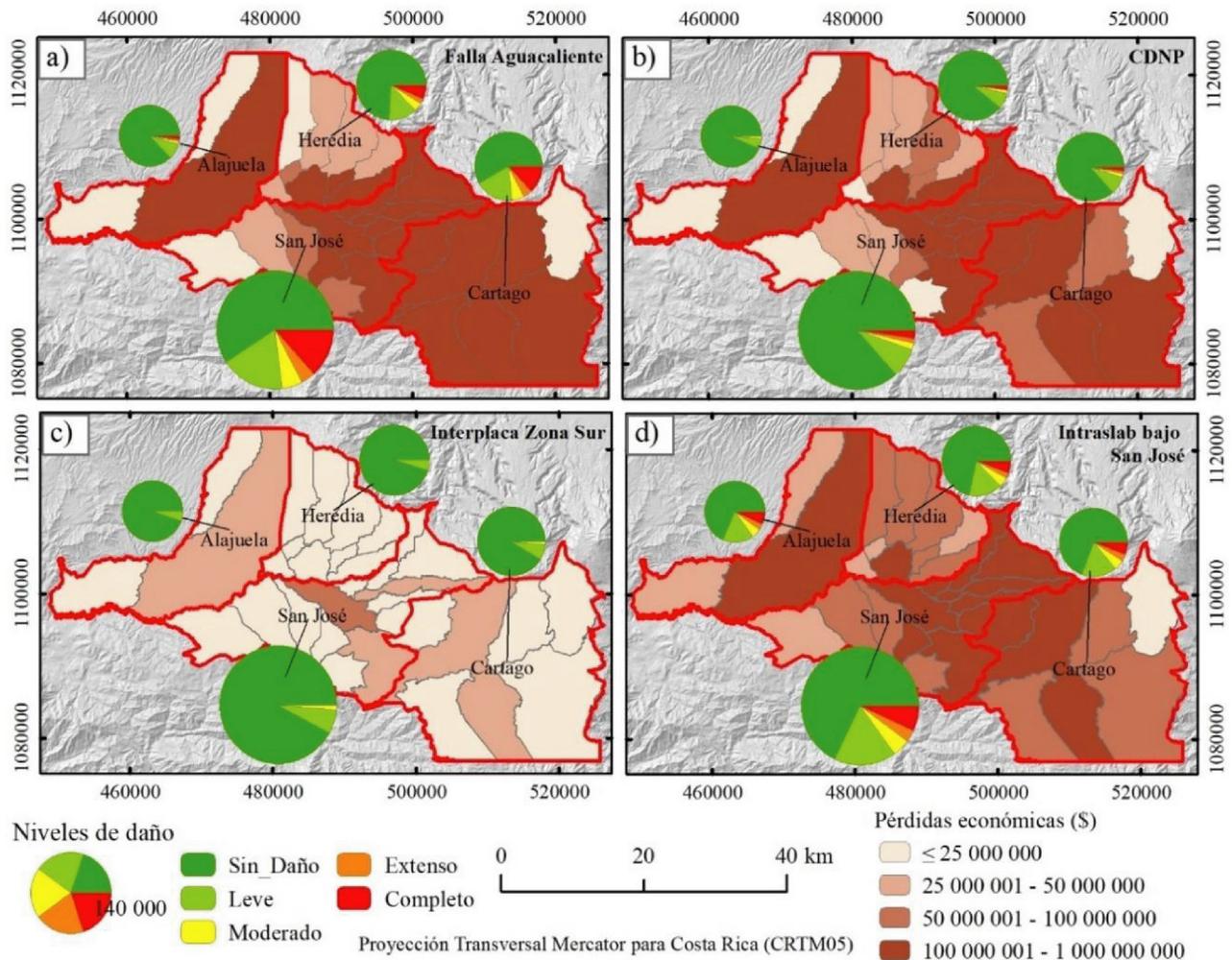


Fig. 8: Niveles de daño agrupados provincialmente y estimación de pérdidas económicas por cantón, para cada uno de los cuatro escenarios seleccionados. a) Terremoto 6,5 Mw en Falla Aguacaliente (escenario 1/Peor escenario). b) Terremoto de 8,0 Mw en el CDNP (escenario 4). c) Terremoto de 8,1 Mw en segmento de subducción interplaca de la Zona Sur (escenario 6). d) Terremoto de 7,3 Mw en el interior de la placa que se subduce (*intraslab*), debajo de San José (escenario 7). Los gráficos de pastel se muestran proporcionalmente a la cantidad de edificios de cada provincia.

Para el fallamiento local, se debe considerar la variabilidad en las aproximaciones por medio de las cuatro leyes de escalamiento de magnitudes aplicadas. En este análisis, se presentaron variaciones hasta de 0,4 de magnitud entre las distintas ecuaciones empíricas, siendo la de Wells y Coppersmith (1994), la que mayores magnitudes estima, y la de Thingbaijam et al. (2017), la que aproxima magnitudes más bajas.

Esta variabilidad tiene relación directa con las bases de datos y las técnicas empleadas en cada estimación, donde, por ejemplo, Wells y Coppersmith (1994) basan su aproximación en una regresión simple de mínimos cuadrados, con una base de datos muy robusta, pero con cierta incertidumbre en el registro instrumental y las aproximaciones de sismos históricos. Por su parte, Thingbaijam et al. (2017) realizan regresiones ortogonales, relacionando entre si los distintos parámetros de ruptura, con una base de datos más pequeña, pero que incorpora sismos mejor captados instrumentalmente al ser más recientes.

Cuadro 6

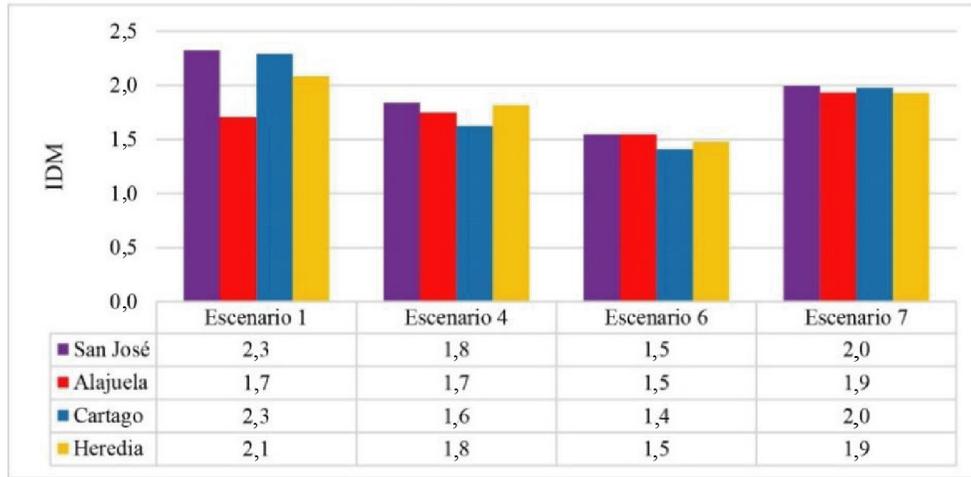
Índice de daño Medio (IDM), número y porcentaje de viviendas inhabitables y personas sin hogar por cantón para el escenario sísmico de Mw 6,5 en la falla Aguacaliente (escenario 1 / peor escenario).

Provincia	Cantón	IDM	Daño Medio	Viviendas inhabitables	% Viviendas inhabitables	Personas sin hogar
San José	San José	2,4	Moderado	14 149	19,5	56 058
	Escazú	1,9	Moderado	901	6,0	3 412
	Desamparados	2,4	Moderado	11 404	22,5	44 521
	Aserri	2,1	Moderado	1 161	10,7	4 486
	Mora	1,6	Moderado	147	2,0	505
	Goicoechea	2,3	Moderado	5 562	18,3	21 052
	Santa Ana	1,8	Moderado	544	4,0	1 954
	Alajuelita	2,2	Moderado	2 917	15,3	11 864
	Vázquez de Coronado	2,0	Moderado	1 446	8,7	5 252
	Tibás	2,4	Moderado	3 857	22,1	14 320
	Moravia	2,3	Moderado	2 632	17,0	9 679
	Montes de Oca	2,4	Moderado	2 776	20,0	9 816
	Curridabat	2,4	Moderado	3 537	20,6	13 446
Alajuela	Alajuela	1,7	Moderado	1 950	3,0	7 498
	Atenas	1,5	Moderado	52	0,8	154
	Poás	1,5	Moderado	98	1,2	340
Cartago	Cartago	2,3	Moderado	6 244	17,9	24 597
	Paraíso	2,3	Moderado	2 428	16,8	9 711
	La Unión	2,3	Moderado	4 302	16,5	16 428
	Alvarado	1,8	Moderado	194	4,9	700
	Oreamuno	2,1	Moderado	1 345	11,7	5 302
	El Guarco	2,5	Extenso	2 498	24,3	10 058
Heredia	Heredia	2,1	Moderado	3 303	10,3	12 616
	Barva	1,7	Moderado	323	2,8	1 124
	Santo Domingo	2,4	Moderado	2 481	20,5	8 217
	Santa Bárbara	1,7	Moderado	246	2,3	841
	San Rafael	1,8	Moderado	513	4,0	1 856
	San Isidro	2,0	Moderado	462	7,6	1 560
	Belén	1,8	Moderado	262	4,4	952
	Flores	2,1	Moderado	573	9,6	1 933
	San Pablo	2,2	Moderado	968	12,7	3 520

La selección de las relaciones de escalamiento de magnitudes se ha fundamentado en los resultados obtenidos por Arroyo-Solórzano (2022). En su elección se ha tomado como criterio principal su mejor ajuste con respecto a datos observados, así como su amplio uso mundial y afinidad con el contexto tectónico de Costa Rica, siguiendo las recomendaciones de Stirling et al. (2013).

Un aspecto importante de reseñar es que la cartografía de fallas activas en el Valle Central de Costa Rica es compleja, con altas tasas de erosión/sedimentación, que enmascaran la actividad reciente de las fallas y dificultan su mapeo, con ejemplos recientes de fallas identificadas producto de terremotos de magnitud intermedia. Tal es el caso de la falla Liebres, que no había

a) Índice de daño medio (IDM) por provincia en la GAM



b) Pérdidas económicas por provincia en la GAM

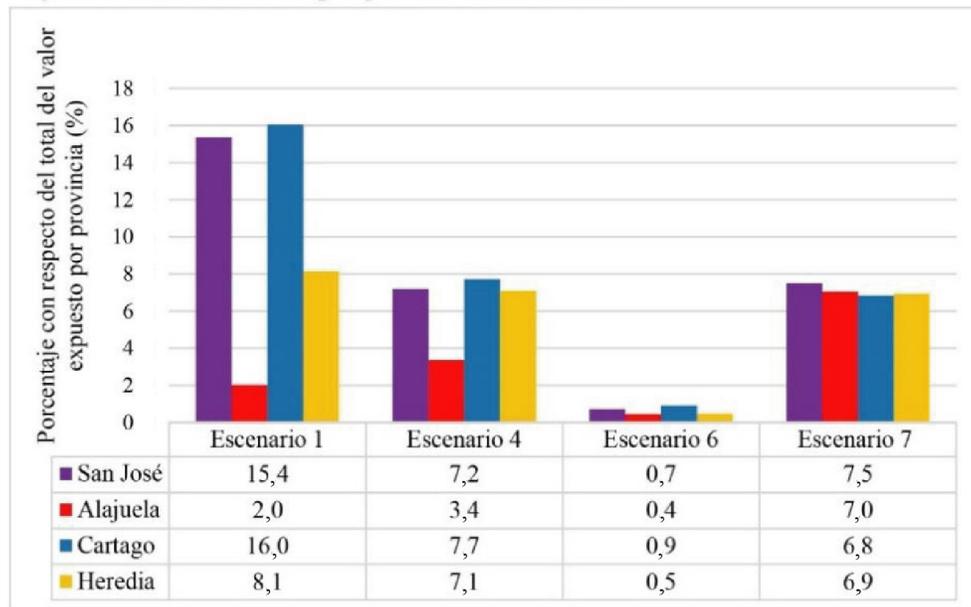


Fig. 9: Distribución de daños y pérdidas por provincia de la GAM para los cuatro escenarios seleccionados. a) Índice de daño medio (IDM). b) Pérdidas económicas.

sido mapeada, y se definió producto del sismo de Capellades de 2016 de 5,5 Mw (Linkimer, Arroyo, Soto et al., 2018). Debido a esta variación e incertidumbre, la aproximación de la M_{max} para los escenarios planteados no se ha basó únicamente en la ecuación de mejor ajuste, si no, se ha decidido incorporar otras aproximaciones que no necesariamente ajustan tan bien con datos observados, Por ejemplo, este es el caso de la ecuación más ampliamente usada a nivel mundial de Wells y Coppersmith (1994), que se ha identificado que suele sobreestimar las magnitudes de acuerdo con bases de datos de rupturas asociadas a terremotos observados para América Central (Arroyo-Solórzano, 2022).

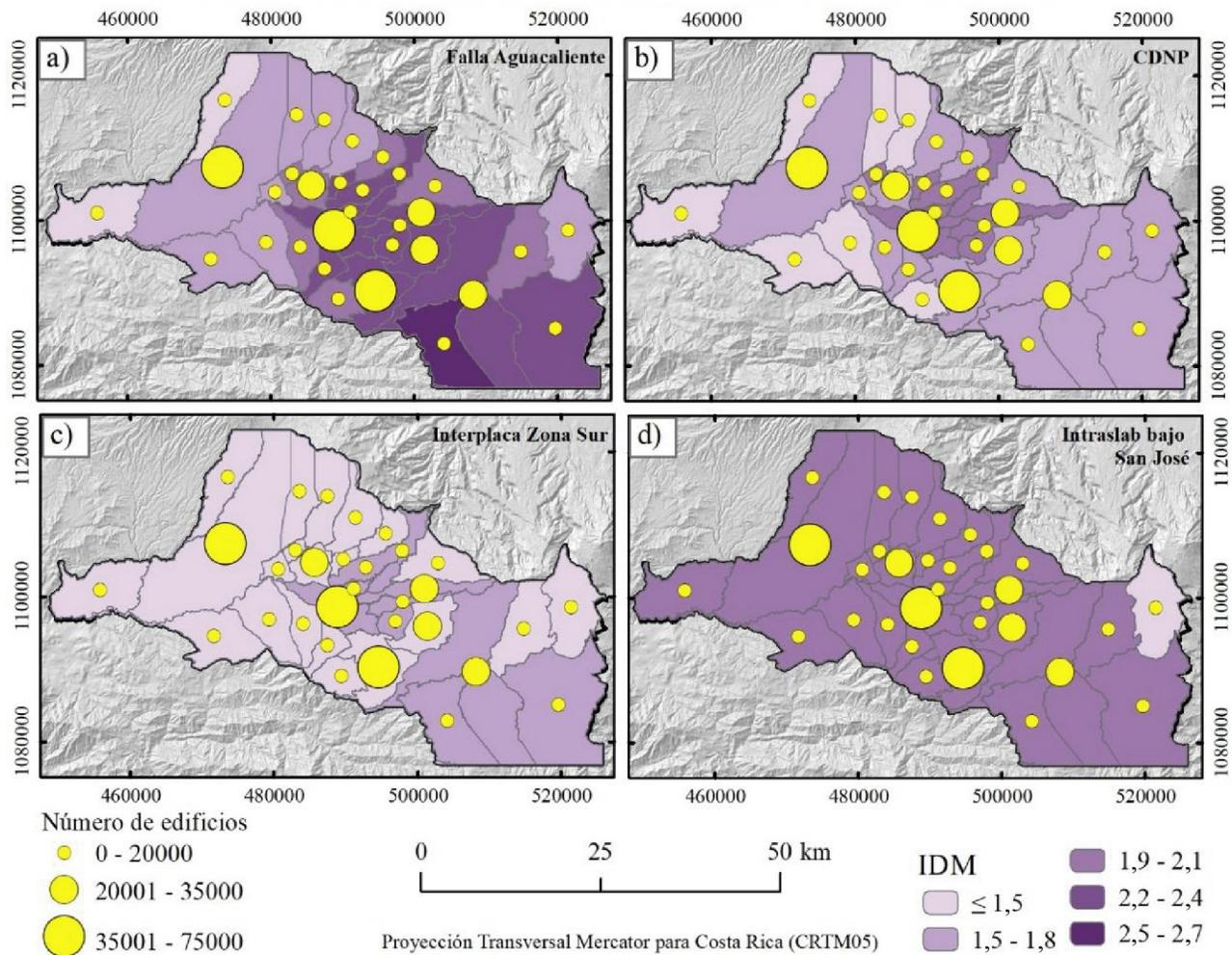


Fig. 10: Índice de daño medio IDM por cantón para cada uno de los cuatro escenarios seleccionados. a) Terremoto 6,5 Mw en Falla Aguacaliente (Escenario 1/Peor escenario). b) Terremoto de 8,0 Mw en el CDPN (escenario 4). c) Terremoto de 8,1 Mw en segmento de subducción interplaca de la Zona Sur (escenario 6). d) Terremoto de 7,3 Mw en el interior de la placa que se subduce (intraslab), debajo de San José (escenario 7).

De acuerdo con lo anterior, las aproximaciones por medio de cada ley de escalamiento utilizada se consideran válidas y se ha promediado lo obtenido por cada una de ellas para repartir y minimizar las incertidumbres. Sin embargo, sería deseable aplicar a futuro relaciones de escalamiento desarrolladas con información de terremotos para Costa Rica o la región Centroamericana.

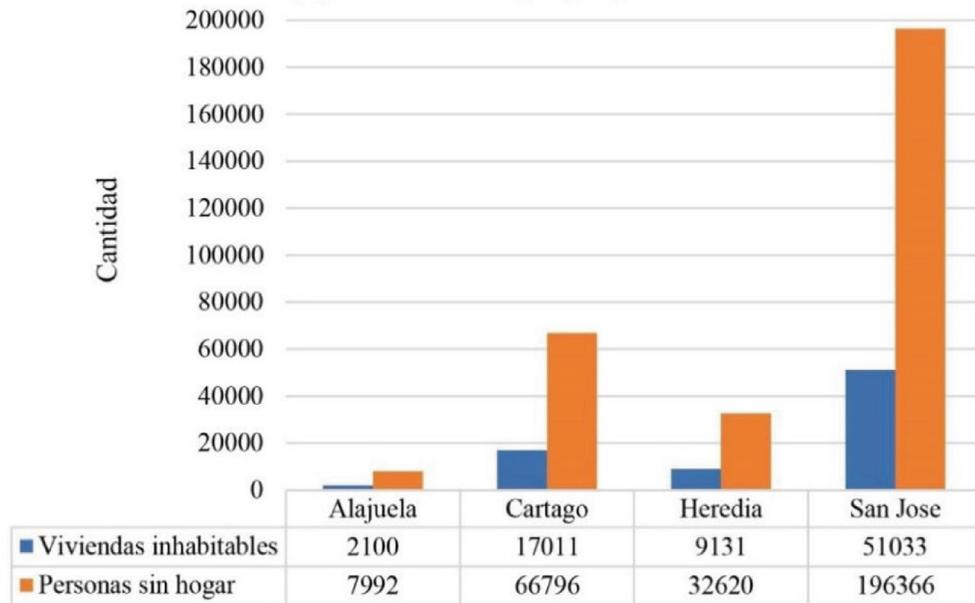
En el caso de la M_{max} asignada por medio del momento sísmico acumulativo, basado en el catálogo de terremotos, es importante resaltar que esta no considera otros procesos que contribuyen a la liberación de energía, como la deformación post-sísmica y los sismos lentos, así como solo utiliza lo registrado en el catálogo, por lo que podría sobreestimarse o subestimarse el potencial. A pesar de esto, este método es ampliamente utilizado porque proporciona el límite superior del potencial sísmico basado en las magnitudes observadas, y, por ende, se utilizó en este trabajo para evaluar los escenarios más desfavorables en la GAM.

Cuadro 7

Aproximaciones a la cantidad y tipos de víctimas por cantón para el escenario sísmico de Mw 6,5 en la Falla Aguacaliente (escenario 1 / peor escenario), en horario diurno, nocturno y para el promedio de ocupación residencial entre ambos horarios.

Provincia	Cantón	Horario diurno						Horario nocturno						Promedio		
		Muertos	Urgencias	Atención médica	Heridos	Sin daños	Muertos	Urgencias	Atención médica	Heridos	Sin daños	Muertos	Urgencias	Atención médica	Heridos	Sin daños
San José	San José	679	679	754	754	1 465	1 359	1 359	1 508	1 507	616	1 019	1 019	1 131	1 131	1 041
	Escazú	41	41	46	45	37	82	83	91	90	0	62	62	68	68	18
	Desamparados	619	621	688	690	795	1 242	1 238	1 377	1 381	102	928	931	1 033	1 036	448
	Aserri	54	53	59	57	40	106	109	118	115	0	81	79	88	86	20
	Mora	5	4	5	5	2	9	9	10	9	0	7	7	7	7	1
	Goicoechea	257	251	279	273	375	502	513	558	546	143	385	376	418	410	259
	Santa Ana	22	22	24	24	18	44	45	49	48	0	33	33	36	36	9
	Alajuelita	143	140	155	152	166	279	286	311	303	34	215	209	233	227	100
	Vázquez de Coronado	51	48	54	51	109	97	103	108	102	59	77	73	81	76	84
	Tibás	208	212	235	238	288	424	417	470	477	31	313	318	352	358	159
Alajuela	Moravia	137	137	152	152	137	273	273	303	303	2	205	205	227	227	69
	Montes de Oca	148	152	168	171	174	303	297	336	342	0	223	227	252	257	87
	Curridabat	201	205	227	230	228	403	403	454	461	0	302	307	340	346	114
	Alajuela	71	66	74	69	72	142	142	148	139	30	106	99	111	104	51
Cartago	Atenas	1	1	1	1	0	3	3	3	3	0	2	2	2	2	0
	Poás	3	2	3	2	3	5	5	5	5	2	4	4	4	4	2
	Cartago	327	331	367	370	489	654	654	733	741	80	490	496	550	556	284
	Paraiso	134	134	149	149	131	268	268	297	297	0	201	201	223	223	66
	La Unión	214	213	237	236	304	428	426	473	471	60	321	320	355	354	182
	Alvarado	7	7	8	8	6	15	14	16	15	1	11	11	12	11	4
	Oreamuno	68	68	76	75	66	137	136	151	151	1	103	102	113	113	33
	El Guarco	158	164	181	187	208	315	327	362	374	0	236	246	271	280	104
	Heredia	163	167	185	189	303	327	327	371	378	64	245	251	278	284	183
	Barva	10	9	10	10	20	20	20	21	19	9	15	14	15	15	14
Heredia	Santo Domingo	100	99	110	109	216	200	198	220	219	96	150	149	165	164	156
	Santa Bárbara	7	7	7	7	13	14	13	15	14	7	11	10	11	10	10
	San Rafael	18	17	19	18	34	35	35	37	35	18	26	25	28	26	26
	San Isidro	16	15	17	16	35	31	30	33	31	16	23	22	25	24	25
	Belén	11	11	12	12	12	22	21	24	23	2	16	16	18	17	7
	Flores	26	26	28	28	36	51	51	57	57	6	38	38	43	43	21
	San Pablo	45	45	50	51	98	89	91	100	102	47	67	68	75	76	72

a) Viviendas inhabitables y personas sin hogar por provincia



b) Tipo y cantidad de víctimas por hora del día

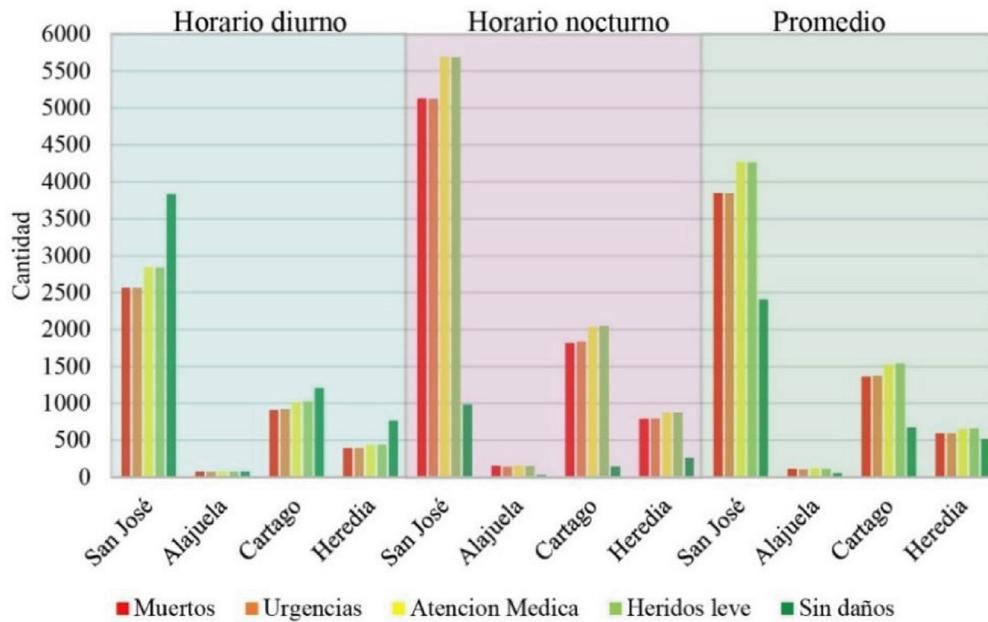


Fig. 11: Distribución de pérdidas por daño físico y tipos de víctimas por provincia para el escenario sísmico de Mw 6,5 en la Falla Aguacaliente (escenario 1/ peor escenario). a) Cantidad de viviendas inhabitables y personas sin hogar. b) Variación de la cantidad y tipo de víctimas según la hora del día.

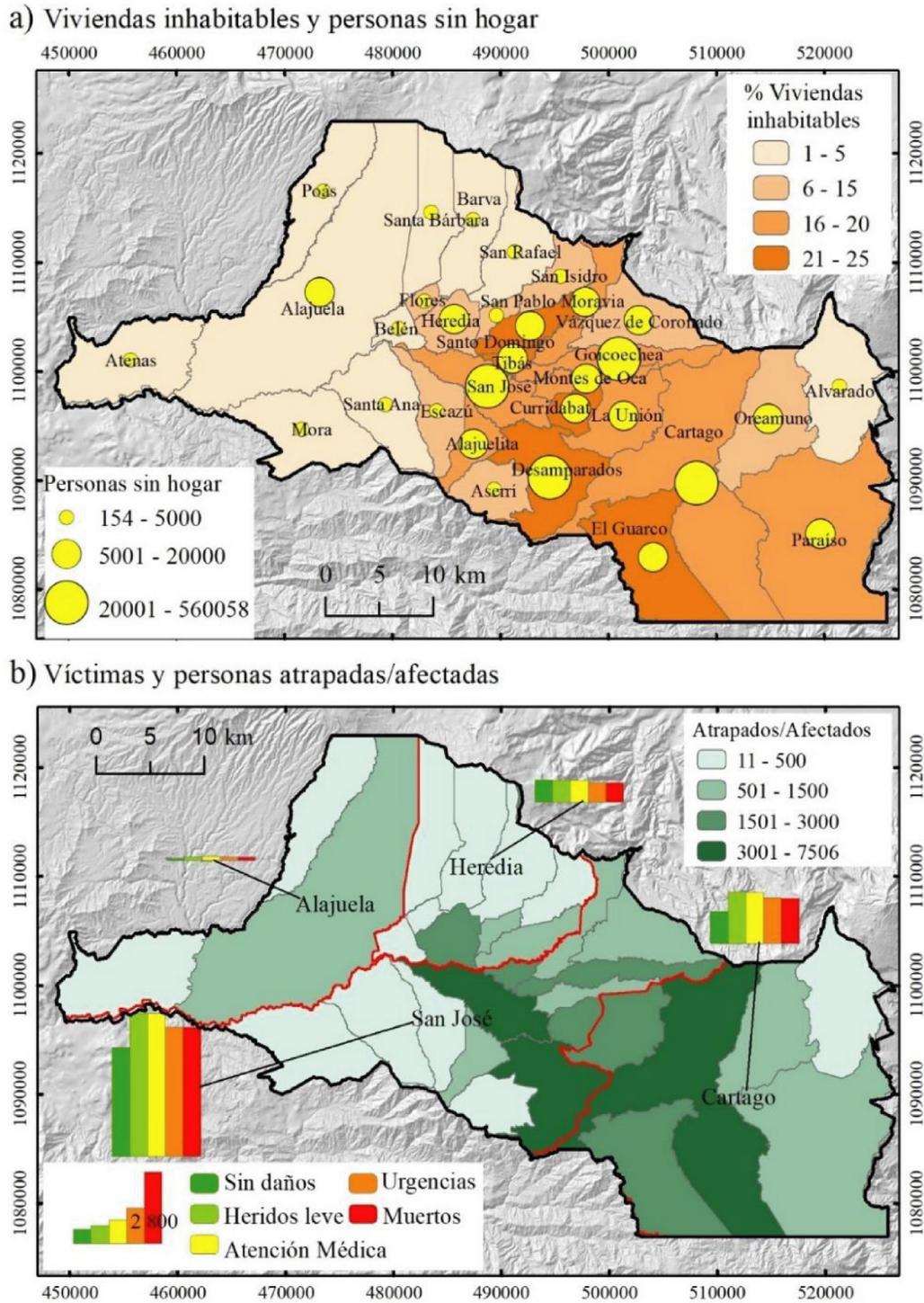


Fig. 12: Daño físico y víctimas para el escenario sísmico de Mw 6,5 en la Falla Aguacaliente (peor escenario). a) Porcentaje de viviendas inhabitables y cantidad de personas sin hogar por cantón. b) Promedio de la cantidad y tipo de víctimas provincialmente y del número de afectados o personas atrapadas por cantón.

Consideraciones sobre los cálculos de amenaza sísmica realizados

De acuerdo con la sismicidad histórica del país se puede afirmar que algunos de los escenarios son poco probables o con recurrencias muy altas. Sin embargo, ya han ocurrido sismos con magnitudes similares en el pasado, y dichas magnitudes se encuentran en el rango de M_{max} posibles, según el potencial sísmico determinado por otros estudios previos (Alvarado et al., 2017; Benito et al., 2012; Climent et al., 2008; Rojas et al., 1993). Para visualizar mejor esto, aunque el cálculo efectuado ha sido de escenarios deterministas, se realizó un ejercicio de aproximación de la recurrencia teórica asociada a las magnitudes de los escenarios planteados. Esto considerando un modelo de recurrencia dado por la ley de Gutenberg y Richter (1944): $\log N = a - b * M$, donde N es el número de eventos, M es la magnitud, y a y b son los parámetros de recurrencia de la zona sísmica evaluada. Siendo así, la tasa de sismos al año que supera una cierta magnitud puede definirse como: $\lambda = 10^{a - b * M}$, y el periodo de recurrencia es la inversa de la tasa anual de excedencia $T = 1/\lambda$.

Los parámetros a y b se han tomado de Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021) para la zonificación sísmica de Alvarado et al. (2017). Para las fallas locales, los parámetros de recurrencia fueron de $a = 4.91$ y $b = 1.12$, siendo la zona sísmica de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (C6), donde se encuentra estas fallas. Para el CDNP, los parámetros de recurrencia fueron de $a = 4.57$ y $b = 0.95$, para el Interplaca de Nicoya de $a = 3.63$ y $b = 0.69$, para el Interplaca de Osa de $a = 3.91$ y $b = 0.84$, y para el intraplaca/*intraslab* del centro de Costa Rica de $a = 5.78$ y $b = 1.25$.

Con base en lo anterior y según las magnitudes de cada escenario (Cuadro 4), los periodos teóricos de recurrencia en la zona sísmica del Centro de Costa Rica (C6) serían de 234, 303, y 657 años, para sismos de 6,5, 6,6, y 6,9 Mw, respectivamente. Asimismo, se tendría un periodo teórico de recurrencia de 1071 años para un 8,0 Mw en la zona sísmica que corresponde con el CDNP, 66 años para un 7,9 Mw en el segmento de Interplaca de Nicoya, 783 años para un 8,1 Mw en el segmento de Interplaca en Osa y 2213 años para un 7,3 Mw en el segmento de *intraslab* bajo San José. Estas aproximaciones permiten deducir que el escenario más probable, según la magnitud propuesta y la fuente sísmica asociada, sería en el interplaca de Nicoya, mientras que el menos probable sería en el *intraslab* bajo San José. Sin embargo, se necesitaría un análisis más detallado del momento actual en el ciclo sísmico de cada una de las fuentes y de estudios de monitoreo de la deformación y liberación /acumulación de esfuerzos, para concluir con mayor certeza sobre lo anterior.

Los escenarios propuestos podrían ser de interés para la construcción de obra civil de tipo normal, especial y esencial, ya que los periodos de retorno que se han aproximado entran en los rangos de 500 años (escenarios en la falla Aguacaliente, Alajuela e interplaca Nicoya), 1000 años (escenarios en falla Jaris, Interplaca Osa) y 2500 años (escenario del *intraslab* bajo San José). Además, estudios de desagregación de amenaza sísmica para San José (Benito et al., 2012; Climent et al., 2008), han determinado que el par magnitud-distancia que más aporta a la amenaza de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia es un 6,5 Mw a 15 km. Esto es coincidente con el terremoto planteado en la falla Aguacaliente, que a su vez es el que más daños y pérdidas provocaría, siendo el peor de los escenarios. Cabe resaltar que en la GAM y sus alrededores también se tienen muchas otras fallas locales con actividad y potencial sísmico importante (e.g., Alonso-Henar et al., 2013; Montero, 2001; Montero et al., 2010, 2016; Montero y Rojas, 2014; Rodríguez, 2017), por lo que este escenario o similares en fallas cercanas, serían altamente factibles y potencialmente perjudiciales.

El Código Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2013, 2014), considera la cercanía y directividad de las fallas en su formulación, donde se indica que para sitios a menos de 5 km de una falla activa conocida y capaz de producir un sismo de $M_w \geq 6,5$, se deben evaluar los efectos de la sacudida en la cercanía a la falla. Esto resulta relevante ya que, en la zonificación de dicho Código, la GAM entra en la zona III, donde la aceleración de entrada para periodos cortos y en un caso desfavorable de suelo blando, se establece en 0,37g, lo cual cubre bastante bien los escenarios 4, 5, 6 y parcialmente el escenario 7 (Fig. 5). Sin embargo, se queda corto para las aceleraciones de los escenarios por falla local, principalmente en sus cercanías (1, 2 y 3), donde se tiene valores hasta entre 0,6 y 0,8 g (Fig. 5), por lo que considerar el efecto de directividad de la fuente y proximidad de las fallas se vuelve trascendental.

Es evidente la importante atenuación que se presenta para fuentes a distancias mayores a los 100 km. Esto ya que a pesar de que los sismos lejanos son bastante mayores en magnitud que los de fallamiento local, sus aceleraciones son considerablemente menores (Fig. 5). Cabe aclarar que cualquiera de los escenarios causaría pérdidas relevantes, sin embargo, la mayoría de las pérdidas y daños en la GAM, serían causadas por fallas locales cercanas, más que por terremotos de subducción. Además, se evidencia la influencia del efecto local en sectores puntuales con suelos blandos, lo cual se ha comprobado que está altamente correlacionado con el mapa de espesores de suelo (Climent y Bolaños, 1999).

Cabe reseñar que en caso de que se quisiera profundizar el análisis de la amenaza para cada escenario, se sugiere explorar más en detalle ponderaciones realizando cálculos con otros GMPEs. Sería deseable estudios futuros que enfoquen este análisis de sensibilidad al utilizar GMPEs locales como las de Climent et al. (1994) y Schmidt (2010), las cuales a pesar de no presentar los mejores ajustes según Hidalgo-Leiva et al. (2022), podrían ser interesantes de evaluar a nivel local. Por ejemplo, para la GMPE de Schmidt (2010), se sugiere explorar la variación con base en clasificaciones de tipos de suelos para la GAM. Además, para evaluaciones de riesgo sísmico que contemplen más allá del inmobiliario residencial, sería importante incorporar y analizar otros periodos espectrales, más allá de la PGA, ya que se debería analizar edificios de mayor altura y de distintos usos.

Condicionantes del riesgo sísmico en la GAM

El riesgo sísmico aproximado, permite identificar que la provincia de mayor cantidad de daños y pérdidas es San José, al ser la que mayor cantidad de edificios y coste de remplazo asociado presenta. Sin embargo, al analizar lo anterior en términos relativos y porcentualmente con respecto al valor expuesto o las edificaciones de cada provincia, se comprueba que las cuatro provincias sufren de manera relativamente similar ante los escenarios modelados. Esto también se ve fuertemente condicionado por la cercanía de los escenarios planteados a cada cantón y provincia, pero se refleja de manera clara en el IDM obtenido a nivel cantonal, donde en general los escenarios suelen presentar categoría de daño moderado. Lo anterior se manifiesta a su vez en la distribución de víctimas, donde las zonas más densamente pobladas suelen presentar valores más altos, en conjunto con su cercanía a la fuente, por el efecto que genera esto en los daños y los posibles colapsos estructurales.

La variación estacional analizada refleja la diferencia entre uno u otro momento de ocurrencia. Sin embargo, esto se evaluó analizando únicamente el inventario de exposición residencial, por lo que no se está considerando que estos ocupantes se encontrarían probablemente en otras edificaciones de distintos usos, y que podrían también sufrir daños importantes y/o colapsar. A pesar de esto, se considera que los resultados obtenidos son una buena aproximación hipotética, donde el promedio de víctimas entre ambas ocupaciones estacionales refleja un aproximado general más realista, debido a que no necesariamente en todas las viviendas la ocupación es siempre del 50 % de día y 100 % de noche.

Los lineamientos y planificación futura deberían considerar escenarios como los presentados para la priorización de acciones y el establecimiento de medidas que velen por el cumplimiento de las normas constructivas y fortalezcan la respuesta comunitaria. Principalmente, para los cantones cercanos a las fallas locales modeladas, y los cantones cabecera de provincia por su valor expuesto. El caso del peor escenario (escenario 1), evidencia lo anterior, donde algunos de los cantones para priorizar acciones y planificar el desarrollo urbano futuro serían San José y los ubicados en sectores hacia el este-sureste de la GAM, como, por ejemplo, Desamparados, Goicoechea, El Guarco, Cartago y Curridabat.

El peor escenario para la GAM

Resulta particularmente llamativo que los resultados de riesgo asociado a víctimas y personas afectadas o damnificadas para el peor escenario planteado en la falla Aguacaliente, entrarían en una categoría de valores poco habituales según Dal Zilio y Ampuero (2023), donde para terremotos de 6,5 Mw como el que se plantea, lo habitual está un orden de magnitud por debajo. Esto podría responder a dos explicaciones, la primera asociada a la posibilidad real de que esto ocurra de acuerdo con el contexto de terremotos históricos en la región, y la segunda, derivada de posibles sesgos de la adaptación del modelo para estimar víctimas de Coburn y Spence (2002) y de viviendas inhabitables de Milutinovic y Trendafiloski (2003) al contexto de Costa Rica.

Para evaluar el primer punto, se ha hecho un recuento de algunos de los terremotos más mortíferos en América Central, dentro de los cuales se tiene el terremoto de Managua de 1972, M 6,3 en Nicaragua, el terremoto de Guatemala de 1976, M 7,5 y el terremoto de San Salvador de 1986, M 5,7 en El Salvador, con ~20 000, ~23 000 y ~6000 muertos, respectivamente (Espinosa, 1976; Mann et al., 1990; Harlow et al., 1993). Los terremotos de Managua de 1972, y el de San Salvador de 1986, han presentado magnitudes menores a la estimada para el peor escenario en la falla Aguacaliente, y con un número de víctimas

bastante mayor o similar al que se ha estimado en nuestro escenario. Esto sugiere que esta afectación o cantidad de víctimas en el contexto socioeconómico de América Central puede ser posible.

El terremoto más mortífero para Costa Rica ha sido el de Cartago de 1910, de Mw 6,4 y localizado prácticamente en la misma ubicación epicentral que se propone en este estudio el escenario de la falla Aguacaliente. La cantidad de víctimas en ese momento fue bastante inferior (~600) con respecto a los resultados estimados (7890). Sin embargo, cabe resaltar que la dinámica poblacional y la densidad de habitantes es considerablemente distinta entre aquel momento, hace ya más de un siglo, y las condiciones actuales. En 1910, según datos demográficos nacionales, la población total en Costa Rica era de apenas ~400 mil habitantes, y hoy día asciende a poco más de 5 millones, donde solo en la GAM de acuerdo con el modelo de exposición empleado (Calderón y Silva, 2019), se tiene una ocupación residencial de ~3 millones de personas (~60 % del total nacional). Siendo así, la población expuesta ha incrementado prácticamente en un orden de magnitud en comparación con lo que se tenía en 1910, lo cual hace que no sea tan improbable el pensar en el número de víctimas que se obtuvo.

El segundo aspecto por considerar son los métodos de aproximación de víctimas de Coburn y Spence (2002). Esta metodología es basada en grandes terremotos observados a nivel mundial y ha sido de amplio uso. Sin embargo, para su adaptación al modelo de exposición y vulnerabilidad en Costa Rica, se hizo una analogía entre el comportamiento ante el colapso de las tipologías constructivas de concreto reforzado y madera, y de mampostería y otros materiales. Esto debido a que no se contaba con una categoría específica para madera ni para otros materiales, y por ende se asumió que la madera podría presentar un colapso ante niveles de aceleración similares al concreto reforzado, mientras que los otros materiales podrían colapsar ante niveles de aceleración parecidos a la mampostería. Esto introduce cierto sesgo en la aproximación realizada, sin embargo, cabe acotar que la mayoría de las viviendas residenciales de la GAM son de concreto reforzado o mampostería, y menos del 1 % del inmobiliario residencial de la GAM responde a madera u otros materiales.

Por otra parte, para el caso de viviendas inhabitables y por ende de personas sin hogar, la metodología empleada fue la de Milutinovic y Trendafiloski (2003), la cual fue desarrollada para la Unión Europea en un contexto constructivo distinto al de la región, donde los materiales y tipologías constructivas presentan variabilidad. Sin embargo, se ha utilizado el modelo de consecuencias de Yepes-Estrada y Silva (2017), en contextos constructivos más similares al de Costa Rica, como lo es Sur América. Al final, la metodología de Milutinovic y Trendafiloski (2003), hace una relación simple donde estima que el 90 % de las viviendas de daño extenso más todas las de daño completo estimadas por medio del modelo de consecuencias, serían las viviendas inhabitables, y relaciona esta cantidad de viviendas con el promedio de habitantes por edificio para obtener las personas sin hogar.

De acuerdo con lo anterior, se considera que la estimación obtenida es factible de presentarse en un hipotético peor escenario o terremoto desfavorable para la GAM. Vale aclarar que no hay sismos históricos ni recientes en el país que hayan causado tal cantidad de daños, así también como que el Código Sísmico ha funcionado de manera bastante efectiva y con consideraciones que probablemente permitan que la cantidad de víctimas sea menor a lo estimado. Sin embargo, la mayoría de los terremotos grandes han ocurrido lejanos a las zonas más densamente pobladas de la GAM, que serían los sitios que se señalan que presentarían mayor afectación, al centro-sureste de San José y en Cartago.

Por último, cabe reseñar que Dal Zilio y Ampuero (2023) no toman en consideración terremotos ocurridos antes del 2000, por lo que se omite los casos en países vecinos de Centroamérica. Además, en dicho recuento estadístico, a pesar de poco probable, si se muestra al menos un registro de magnitud ~6,5 con hasta ~10 000 muertes. Aun así, cabe resaltar que este escenario de acuerdo con la estadística global (Dal Zilio y Ampuero, 2023), se podría tratar de un caso excepcionalmente destructivo para la Mw asignada.

Conclusiones

Se han determinado siete escenarios desfavorables para la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM) según un análisis de fuentes sismogénicas del país, con magnitudes entre 6,5 y 8,1 Mw. Los escenarios seleccionados fueron tres de fallamiento local en fallas cercanas (Aguacaliente, Alajuela y Jarís), uno en el sector del Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), dos de interplaca, en los segmentos de Nicoya y Osa, y uno en el *intraslab* bajo San José.

La sacudida sísmica modelada muestra aceleraciones PGA con valores hasta de entre 0,6 y 0,8 g para las fuentes corticales cerca de la GAM, siendo dichas fuentes las que mayores aceleraciones generarían para la zona de estudio, con efectos

locales relevantes. Esto resalta la importancia de incorporar el efecto de cercanía y directividad de la fuente en obra civil. Asimismo, se observó que un escenario de 7,3 Mw a profundidad intermedia (85 km) bajo San José, generaría una mayor sacudida en la GAM que terremotos más grandes (Mw 7,9 – 8,1) por subducción interplacas. También se determinó que algunos de los escenarios modelados son poco probables o con recurrencias muy altas, pero que pueden suceder.

En la GAM predominan las tipologías constructivas de mampostería confinada de alta ductilidad de 1 y 2 plantas (~60 % del total de edificios y 80 % del coste de remplazo total). Las densidades poblacionales y cantidad de edificios más altas se concentran en los cantones cabecera de provincia y en otros hacia el este-sureste de San José, siendo estas las zonas de mayor exposición y vulnerabilidad, y por ende las más propensas a sufrir daños y pérdidas. Los escenarios modelados, generarían daños entre el 8 y 34 % del total de edificaciones expuestas, y pérdidas económicas entre el 1 % y 12 % del coste de remplazo total de las edificaciones de la GAM.

El escenario sísmico más perjudicial sería por fallamiento local en la falla Aguacaliente, mientras que el del *intraslab* bajo San José, es el que provoca una distribución de daños más homogénea. En el peor escenario, cantones como San José, Goicoechea, Curridabat, Desamparados, Cartago y El Guarco serían los más afectados, lo cual se debe a la mayor exposición de edificaciones y a la cercanía a la fuente. En ese mismo escenario, la variación horaria resalta una diferencia importante entre personas sin daño de día con respecto a la noche (de 4 a 5 veces más) y se estima que habría, en promedio, un total de 7890 muertes, 79 275 viviendas inhabitables y 303 775 personas sin hogar. Estos valores harían de este un escenario excepcionalmente destructivo para la Mw asignada de acuerdo con la estadística global.

Ante la gran cantidad de fallas activas y fuentes sísmicas potencialmente perjudiciales en Costa Rica, este trabajo engloba algunos de los peores escenarios posibles para el sector central y de mayor exposición del país. Sin embargo, sería deseable profundizar en las estimaciones de la amenaza sísmica para cada fuente contemplada, a través de análisis de aceleraciones para distintos periodos espectrales, cálculos probabilísticos puntuales que contemplen arboles lógicos de los modelos de atenuación, análisis de los espectros de amenaza uniforme. Así también en el cálculo del riesgo, sería útil contemplar todo el inmobiliario urbano, para obtener estimaciones más completas y robustas. A pesar de esto, los resultados de este trabajo contribuyen como un paso más para la caracterización de la amenaza y riesgo sísmico ante grandes terremotos en la GAM, y para su consideración en la planificación urbana futura y el ordenamiento territorial.

Agradecimientos

Al grupo de investigación en ingeniería sísmica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) por sus aportes, en especial a Orlando Hernández en lo que respecta a criterio y datos para la confección del mapa de efecto local. Al Dr. Alejandro Calderón por la aclaración de dudas sobre el modelo de exposición residencial utilizado y por facilitar este en el formato de trabajo del software *OpenQuake*. Este trabajo también se deriva de un estudio de caso del curso de “Escenarios Sísmicos” del Máster en Análisis del Riesgo Sísmico de la UPM, por lo tanto, agradecimientos por los comentarios y sugerencias en su momento a los profesores, Dr. Jorge Gaspar, Dra. Alejandra Staller y MSc. Juan Portella. Agradecer finalmente a los editores de este volumen y al revisor Dr. Jorge Alonso Henar, por sus valiosos comentarios que permitieron mejorar la calidad del manuscrito.

Referencias

- Abrahamson, N., Gregor, N., y Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>
- Adamek, S., Frohlich, C., y Pennington, W. D. (1988). Seismicity of the Caribbean- Nazca boundary: constraints on micro-plate tectonics of the Panama region. *Journal of Geophysical Research*, 93(B3), 2053–2075. <https://doi.org/10.1029/JB093iB03p02053>

- Alonso-Henar, J., Montero, W., Martínez-Díaz, J. J., Álvarez-Gómez, J. A., Insua-Arévalo, J. M., y Rojas, W. (2013). The Aguacaliente fault, source of the Cartago 1910 destructive earthquake (Costa Rica). *Terra Nova*, 25(5), 368–373. <https://doi.org/10.1111/ter.12045>
- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A., Climent, Á., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J. E., Martínez-Cuevas, S., y Lindholm, C. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Anderson, J. G., Biasi, G. P., y Wesnousky, S. G. (2017). Fault-scaling relationships depend on the average fault-slip rate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6), 2561–2577. <https://doi.org/10.1785/0120160361>
- Arroyo, I. G., y Linkimer, L. (2021a). Geometría de la zona sismogénica interplacas en el sureste de Costa Rica a la luz de la secuencia sísmica de Golfito del 2018. *Geofísica Internacional*, 60(1), 51–75.
- Arroyo, I. G., y Linkimer, L. (2021b). Modelo unidimensional de velocidades sísmicas y características tomográficas tridimensionales del Caribe Sur de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1–15. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.46696>
- Arroyo-Solórzano, M. (2022). *Análisis y propuesta de relaciones empíricas de escalamiento de magnitudes para el potencial sísmico de fallas en América Central*. (Tesis de maestría inédita). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Arroyo-Solórzano, M., y Linkimer, L. (2021). Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics*, 814. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>
- Benito, M. B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Escobar, J. J., Talavera, E., Alvarado, G. E., y Torres, Y. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 504–523. <https://doi.org/10.1785/0120110015>
- Bourke, J. R., Levin, V., Arroyo, I. G., y Linkimer, L. (2023). Evidence for Caribbean plate subduction in southern Costa Rica. *Geology*, 51(4), 408–412. <https://doi.org/10.1130/G50796.1>
- Brengman, C. M. J., Barnhart, W. D., Mankin, E. H., y Miller, C. N. (2019). Earthquake-scaling relationships from geodetically derived slip distributions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5), 1701–1715. <https://doi.org/10.1785/0120190048>
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., y Silva, V. (2013). *GEM Building Taxonomy Version 2.0*. <https://doi.org/10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>
- Calderón, A., y Silva, V. (2019). Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(3), 1257–1284. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0499-1>
- Calderón, E. (2018). *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.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2013). *Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes*. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2014). *Código sísmico de Costa Rica 2014*. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Climent, Á., Taylor, W., Ciudad-Real, M., Strauch, W., Villagran, M., Dahle, A., y Bungum, H. (1994). *Spectral strong motion attenuation in Central America*. NORSAR. Technical Report No. 2-17. <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/86657>
- Climent, A., y Bolaños, M. (1999). *Mapa de espesores de materiales no consolidados en el Área Metropolitana de San José*. ICE. Informe interno.
- Climent, Á., Rojas, W., Alvarado, G. E., y Benito, B. (2008). *Proyecto Resis II Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf
- Coburn, A., y Spence, R. (2002). *Earthquake protection* (2da ed.). John Wiley & Sons.
- Dal Zilio, L., y Ampuero, J. P. (2023). Earthquake doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment*, 4, 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- DeMets, C., Gordon, R. G., y Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181:1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
- Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G. (2009). *Atlas Tectónico de Costa Rica* (2a ed.). Editorial Universidad de Costa Rica.
- ERN-CAPRA. (2009). *Caracterización local de la vulnerabilidad de edificaciones*. ERN-CAPRA. Manuscrito inédito.

- Espinosa, A. F. (ed). (1976). The Guatemalan Earthquake of February 4, 1976, a preliminary report. *Geological Survey Professional Paper*, 1002. <https://pubs.usgs.gov/pp/1002/report.pdf>
- Esquivel, L. C. (2020). *Inventario de edificaciones del cantón de San José para el caso específico de amenaza sísmica utilizando el método de mapeo ambiental rápido*. (Tesis de maestría inédita). Kérwá, Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/10669/81229>
- Fan, G., Beck, S. L., y Wallace, T. C. (1993). The seismic source parameters of the 1991 Costa Rica aftershock sequence: evidence for a transcurrent plate boundary. *Journal of Geophysical Research*, 98(B9). <https://doi.org/10.1029/93jb01557>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020). *Nehrp recommended seismic provisions for new buildings and other structures (FEMA P-2082-1)*. Vol. I: Part 1 Provisions and Part 2 Commentary. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_2020-nehrp-provisions_part-1-and-part-2.pdf
- Franco, A., Lasserre, C., Lyon-Caen, H., Kostoglodov, V., Molina, E., Guzman-Speziale, M., Monterosso, D., Robles, V., Figueroa, C., Amaya, W., Barrier, E., Chiquin, L., Moran, S., Flores, O., Romero, J., Santiago, J. A., Manea, M., y Manea, V. C. (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophysical Journal International*, 189(3), 1223–1236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05390.x>
- GEM. (2020). *The OpenQuake-engine User Manual*. Global Earthquake Model (GEM) Open-Quake Manual for Engine version 3.9.0. <https://doi.org/10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.9.0>
- Guillén-Montero, D., Vargas-Bogantes, J., Núñez-Román, O. A., y Vega-Ramírez, L. M. (2021). Situación de los Sistemas de Información Territorial para la gestión municipal: caso de la GAM, Costa Rica, 2018. *Revista Geográfica de América Central*, 1(66), 79–98. <https://doi.org/10.15359/rgac.66-1.3>
- Gutenberg, B., y Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47, 73–131. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/34/4/185/2690674/BSSA0340040185.pdf>
- Harlow, D. H., White, R. A., Rymer, M. J., y Alvarez, S. (1993). The San Salvador earthquake of 10 October 1986 and its historical context. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1143–1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0830041143>
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., y Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Heath, D. C., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., y Smoczyk, G. M. (2020). A global hybrid VS30 map with a topographic slope-based default and regional map insets. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1570–1584. <https://doi.org/10.1177/8755293020911137>
- Hidalgo-Leiva, D. (2017). *Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas empleadas en Costa Rica*. (Tesis de doctorado inédita). CORA TDX. <https://www.tdx.cat/handle/10803/405589#page=1>
- Hidalgo-Leiva, D., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Vargas, Y. F., y Díaz, S. A. (2021). Nonlinear static and dynamic analyses of Costa Rican reinforced concrete masonry structures. *Engineering Structures*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111998>
- Hidalgo-Leiva, D. A., L. Linkimer, I. G. Arroyo, M. Arroyo- Solórzano, R. Piedra, A. Climent, V. Schmidt Díaz, L. C. Esquivel, G. E. Alvarado, R. Castillo, Carranza-Morales, M. E., Cerdas-Guntanis, L., Escalante-Meza, J., Lobo, S., Rodríguez, M. J., y Rojas, W. (2022). The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(1), 23–40. <https://doi.org/10.1785/0120220119>
- IIG Consultores. (2017). *Prospección geofísica. Sísmica pasiva MAM. Diseño de los intercambios entre la intersección de las rutas nacionales No2 y 236 (Taras), y la intersección de las rutas nacionales No 2 y 10 (Cartago) incluyendo el mejoramiento de la ruta nacional No2, sección Taras – La Lima (Provincia de Cartago)*. IIG. Informe interno.
- IIG Consultores. (2020). *Estudio geofísico. Sísmica pasiva MAM y sísmica de refracción. estudios de factibilidad técnica, ambiental, social, económica y financiera del fideicomiso corredor vial San José - San Ramón y sus radiales*. IIG. Informe interno.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., y Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 879–897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>

- Linkimer, L., Arroyo, I. G., Alvarado, G. E., Arroyo, M., y Bakkar, H. (2018). The national seismological network of Costa Rica (RSN): An overview and recent developments. *Seismological Society of America*, 89(2A), 392–398. <https://doi.org/10.1785/0220170166>
- Linkimer, L., Arroyo, I. G. Soto, G. J., Porras, J. L., Araya, M. C., Mora, M. M., y Taylor, M. (2018). El sismo de Capellades del 2016 y su secuencia sísmica: manifestación de fallamiento de rumbo en el arco volcánico de Costa Rica. *Boletín de Geología*, 40(2), 35–53. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n2-2018002>
- Mann, P., Schubert, C., y Burke, K. (1990). Review of Caribbean neotectonics. En G. Dengo y J. E. Case (eds), *The Caribbean Region. The geology of North America* (pp. 307–338). The Geological Society of America.
- Marshall, J. S., Fisher, D. M., y Gardner, T. W. (2000). Central Costa Rica deformed belt: kinematics of diffuse faulting across the western Panama block. *Tectonics*, 19(3), 468–492. <https://doi.org/10.1029/1999TC001136>
- Milutinovic, Z. V., y Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04: vulnerability of current buildings handbook. RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014*. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS).
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29–56.
- Montero, W., Linkimer, L., y Rojas, W. (2016). El Sistema de Falla Navarro: desplazamientos izquierdos a lo largo del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 55, 71-100. <https://doi.org/10.15517/rgac.v55i0.27062>
- Montero, W., Pardo, M., Ponce, L., Rojas, W., y Fernandez, M. (1994). Evento principal y réplicas importantes del terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Vol. Especial Terremoto de Limón*, 93–102. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13434>
- Montero, W., y Rojas, W. (2014). Las fallas Purires y Picagres, y su relación con la secuencia sísmica de Puriscal de 1990. *Revista Geológica de América Central*, 50, 39–69. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i50.15107>
- Montero, W., Soto, G. J., Alvarado, G. E., y Rojas, W. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del Volcán Poás (Costa Rica), basado estudio neotectónicos y de sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 13–36. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3456>
- Montero-Pohly, W. (2021). Análisis retrospectivo del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,7) y de la actividad sísmica disparada en las fallas Ayil, Pacuare, Atirro, División y Navarro. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1–26. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.47012>
- Ponce, L., Pardo, M., Domínguez, J., Montero, W., Rojas, W., Boschini, I., Suárez, G., y Camacho, E. (1994). Estudio de réplicas del terremoto de Limón usando datos locales: resultado e implicaciones tectónicas. *Revista Geológica de América Central, Vol. Especial Terremoto de Limón*, 103–110. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13437>
- Protti, M., González, V., Newman, A. v., Dixon, T. H., Schwartz, S. Y., Marshall, J. S., Feng, L., Walter, J. I., Malservisi, R., y Owen, S. E. (2014). Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nature Geoscience*, 7(2), 117–121. <https://doi.org/10.1038/ngeo2038>
- Protti, M., Gündel, F., y McNally, K. (1994). The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: results from a high-resolution local seismographic network. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 84, 271–287.
- Quintero, R., Zahradník, J., Gündel, F., Campos-Durán, D., Alvarado, G.E., y Boutet, J.T. (2023). Subduction transition and relation to upper plate faults revealed by the 2019 Mw 6.0 and 6.2 Costa Rica-Panama border earthquakes. *Tectonophysics*, 851. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229759>
- Red Sismológica Nacional de Costa Rica. (2021). *The Costa Rica National Seismological Network Catalog during 1975-2020*. <https://doi.org/10.15517/TC>
- Rodríguez, J. M. (2017). Potencial sísmico de las fallas del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica. Universidad de Costa Rica. (Tesis de licenciatura inédita). Repositorio Sibdi. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/4112/1/40520.pdf>
- Rojas, W., Bungum, H., y Lindholm, C. (1993). Historical and recent earthquakes in Central America. *Revista Geológica de América Central*, 16, 5–22. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i16.13242>

- Schellart, W. P., y Rawlinson, N. (2013). Global correlations between maximum magnitudes of subduction zone interface thrust earthquakes and physical parameters of subduction zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 225, 41–67. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.10.001>
- Schmidt, V. (2010). *Avances para estudios del riesgo a escala regional y local: aplicación a América Central y la bahía de Cádiz (Sur de España)*. (Tesis doctoral inédita). Universidad Politécnica de Catalunya, Cataluña, España.
- Schmidt, V. (2014). Clasificación de suelos de 15 estaciones acelerográficas, mediante el uso de métodos basados en vibraciones ambientales y del parámetro Vs30. *Revista Geológica de América Central*, 51, 33–67. <https://doi.org/10.15517/rgac.v51i1.16850>
- Schmidt, V., Moya, A., Climent, A., Rojas, W., y Boschini, I. (2005). *Microzonificación sísmica de San José, Costa Rica*. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Schmidt-Díaz, V., y Esquivel-Salas, L. C. (2023). Periodo fundamental y clasificación de sitios en el cantón Central de San José (Costa Rica) usando la técnica H/V. *Revista Geológica de América Central*, 68, 1–17. <https://doi.org/10.15517/rgac.2023.55170>
- Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). (2021). *Servicios OGC*. https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc
- Stirling, M., Goded, T., Berryman, K., y Litchfield, N. (2013). Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6), 2993–3011. <https://doi.org/10.1785/0120130052>
- Thingbaijam, K. K. S., Mai, P. M., y Goda, K. (2017). New empirical earthquake source-scaling laws. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2225–2246. <https://doi.org/10.1785/0120170017>
- UN International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2009). *2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction*. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817>
- van Lidth, M., y Schutte, O. (2011). GAM(ISMO) Cultura y desarrollo urbano en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Serie Cuaderno de Ciencias Sociales, 155. FLACSO Costa Rica.
- Villar-Vega, M., Silva, V., Eeri, M., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., y Coronel, G. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>
- Wells, D. L., y Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Yepes-Estrada, C., y Silva, V. (2017). Probabilistic seismic assesment of the residential building stock in South America. Presentado en *16th World Conference on Earthquake (6WCEE 2017)*. <https://www.wcee.nicee.org/wcee/article/16WCEE/WCEE2017-2050.pdf>
- Zamora, N., Arroyo-Solórzano, M., Porras, H., Chacón-Barrantes, S., Rivera, F., y Murillo, A. (2021). Evaluación del potencial de tsunamis locales con base en análisis sismo-tectónico en el Caribe de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1–23. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.47002>
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., y Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913. <https://doi.org/10.1785/0120050122>