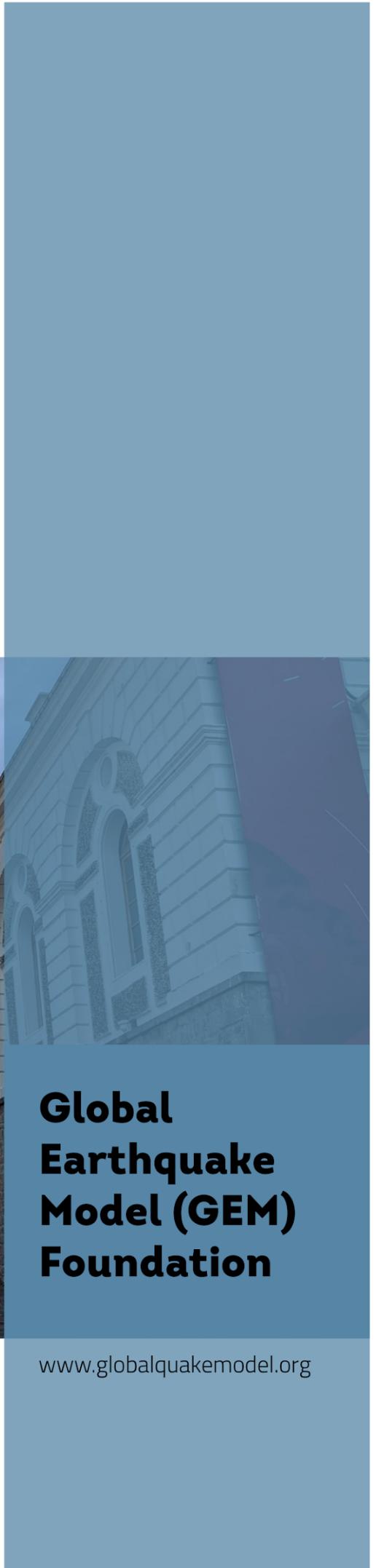


Training and Communication for Earthquake Risk Assessment TREQ Project

Evaluación de Riesgo Sísmico para Santiago de Cali

Entregable 2.6.2 – versión 0.1.0



Evaluación del riesgo sísmico para
Santiago de Cali

www.globalquakemodel.org

Evaluación del riesgo sísmico para Santiago de Cali

Reporte D2.6.2

Reporte técnico producido en el contexto del proyecto TREQ

Versión 0.1.0 – Junio, 2022

EN REVISIÓN

Autores

Nombre	Institución *	Actividad desarrollada

Colaboradores

Cita: Global Earthquake Model Foundation (2022). Evaluación de Riesgo Sísmico para Santiago de Cali. GEM-TREQ Reporte Técnico D2.6.1.

EN REVISIÓN

Agradecimientos

Este informe hace parte del proyecto financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA) para la Capacitación y Comunicación para la Evaluación del Riesgo por Terremotos (TREQ, Training and Communication for Earthquake Risk Assessment), subvención AID-OFDA-G-720FDA19GR00273. La Fundación Global Earthquake Model administra y ejecuta los recursos de USAID e implementa el proyecto en colaboración con las partes interesadas locales.

Se reconoce y agradece el aporte de los equipos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), del Proyecto Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) y de la Universidad EAFIT que aportaron en la generación del presente material y que contribuyeron en la realización de los talleres piloto con la comunidad.

Este informe ha sido posible gracias al apoyo y la generosidad del pueblo estadounidense a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA).

Derechos y permisos

Salvo que se indique lo contrario, este trabajo está disponible bajo los términos de Creative Commons License Attribution - ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0). Puede descargar este informe y compartirlo con otras personas siempre que proporcione el crédito adecuado, pero no puede cambiarlo de ninguna manera, ni utilizarlo comercialmente.

Los puntos de vista e interpretaciones de este documento pertenecen a los autores individuales y no deben atribuirse a la Fundación GEM. En ellos también recae la responsabilidad de los datos científicos y técnicos presentados. Los autores han tenido mucho cuidado para asegurar la exactitud de la información en este informe, pero no aceptan responsabilidad por el material, ni aceptan responsabilidad por ninguna pérdida, incluida la pérdida consecuente incurrida por el uso del material.

Copyright © 2022 GEM Foundation

<http://www.globalquakemodel.org/>

CONTENIDO

	Página
Contenido	4
Lista de Figuras	6
Lista de Tablas.....	8
Resumen Ejecutivo	9
Introducción.....	13
1. Amenaza Sísmica	18
1.1 Fuentes de amenaza sísmica	19
1.2 Modelos de movimiento del terreno e incertidumbre epistémica	21
1.3 Resultados de amenaza sísmica en roca	22
2. Caracterización de los efectos de sitio	27
2.1 Información geotécnica y geofísica.....	27
2.2 Metodología para el análisis de efectos de sitio	29
2.3 Funciones de amplificación del movimiento del suelo (AF)	32
3. Modelo de Exposición	34
3.1 Demografía y división administrativa de la ciudad.....	34
3.2 Recopilación de datos	34
3.3 Clasificación de las edificaciones.....	35
3.4 Tipologías o clases constructivas predominantes	37
3.5 Modelo de exposición de la ciudad.....	41
4. Modelos de Vulnerabilidad.....	43
4.1 Base de datos de vulnerabilidad global GEM.....	43
5. Riesgo Sísmico	46
5.1 Riesgo determinista: escenarios de riesgo para la ciudad.....	46
Lista de escenarios sísmicos.....	47
Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos	48

Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias	49
Limitaciones de los perfiles de riesgo	51
5.2 Evaluación probabilista: eventos estocásticos para la ciudad.....	63
Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos	63
Perfil de mitigación y gestión del riesgo.....	64
6. Referencias	66

EN REVISIÓN

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Uno de trece de un perfil de preparación y respuesta ante emergencias para un evento sísmico originado en la falla Dagua Calima en las cercanías de la ciudad.</i>	11
<i>Figura 2. Perfil de mitigación y gestión del riesgo a largo plazo para Cali.</i>	12
<i>Figura 3: Mapa de división administrativa de Cali en corregimientos (azules) y comunas (púrpura) subdivididas en barrios.</i>	13
<i>Figura 4. Los tres componentes del riesgo catastrófico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Fuente GFDRR (2014).</i>	14
<i>Figura 5: Vistazo del repositorio de acceso abierto en línea con los modelos y resultados del Proyecto TREQ</i>	16
<i>Figura 6. Modelos de corteza superficial en Colombia. [Izquierda] Modelo clásico de fuentes tipo área. [Derecha] Modelo de sismicidad distribuida (zonas anchas) + fallas activas. Fuente: Arcila et al. (2020).</i>	19
<i>Figura 7. Modelos de la subducción interface para Colombia. [Izquierda] Modelo no segmentado. [Derecha] Modelo segmentado. Fuente: Arcila et al. (2020).</i>	20
<i>Figura 8. Fuentes de amenaza para Colombia. [Izquierda] Modelos en placa de subducción. [Derecha] Modelo de sismicidad profunda. Fuente: Arcila et al. (2020).</i>	20
<i>Figura 9. Modelos de movimiento del terreno (GMPEs) para cada ambiente tectónico en Colombia y sus correspondientes pesos en el árbol lógico. Fuente: Arcila et al. (2020).</i>	21
<i>Figura 10. Mapa de aceleración pico-efectiva (PGA) promedio para el 2% de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 760 \text{ m/s}$). Fuente: Arcila et al. (2020).</i>	22
<i>Figura 11. Resultados de desagregación sísmica para la ciudad de Cali para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años. [Izquierda] PGA medio y una combinación de magnitud y distancia. [Derecha] desagregación por ambiente tectónico para diferentes medidas de intensidad. Fuente: Arcila et al. (2020).</i>	23
<i>Figura 12. Fallas activas en la región del Valle del Cauca, Colombia. Las líneas azules son las trazas de la falla Cauca-Cali-Patía (segmentos) y en rojo las fallas consideradas por Arcila et al. (2020).</i>	24
<i>Figura 13. Mapas de PGA promedio para Cali (en de roca) para el 10% (izquierda) y 2% (derecha) de probabilidad de excedencia en 50 años.</i>	25
<i>Figura 14. Desagregación de la amenaza sísmica en PGA (en roca) para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años para la ciudad de Cali. [Izquierda] Magnitud - Distancia - Epsilon. [Derecha] Latitud - Longitud - Región Tectónica.</i>	26
<i>Figura 15. Mapas de amenaza en roca ($V_{s30}=800\text{m/s}$) para PGA con 10% PoE en 50 años, junto con microzonas, estaciones y exposición consideradas en este estudio.</i>	28

Figura 16. [Izquierda] Perfiles Vs digitalizados para Cali (atos de Ingeominas and Dagma, 2005). [Derecha] Perfiles Vs extendidos al lecho rocoso de referencia (Vs = 800 m/s).....	29
Figura 17. Esquema con metodología para la caracterización de los efectos de sitio. Fuente: Reporte TREQ D.2.2.4 (Gee et al, 2021).....	31
Figura 18. Ejemplo de las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: a) suelo rígido con Vs30=418m/s (izquierda), y b) suelo blando con Vs30=273 m/s (derecha). Las funciones se estimaron para cuatro períodos (PGA, 0.3, 0.6 y 1.0 segundo) y los círculos negros representan la mediana de la amplificación usando el método "LOWESS" en la regresión.....	32
Figura 19. Modelo de respuesta del suelo para Cali. Funciones de amplificación (AF) indicando la mediana en cada zona homogénea para diferentes períodos.	33
Figura 20. Distribución de las 580 mil viviendas en la ciudad de Cali por tipo, material de construcción predominante y material de pisos predominante. Fuente: Censo de Población y Vivienda de 2018 (DANE, 2018).....	38
Figura 21. Casas de mampostería confinada cumpliendo e incumpliendo la normativa NSR-10 en los barrios San Fernando y El Caney, respectivamente. Tomadas de: Google Maps (2020).....	39
Figura 22. Edificios de muros colados en sitio y prefabricados de concreto reforzado en el Barrio Buenos Aires y Torres Comfandi. Tomados de Google Maps (2020) y OSSO (2017).....	40
Figura 23. Distribución del número de edificaciones y el valor económico de la ciudad a nivel de comuna....	41
Figura 24: Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica de acuerdo con Ingeominas y Dagma (2005).....	42
Figura 25. (Arriba) Modelos de fragilidad utilizados para la estimación de daños en edificios para mampostería reforzada (MR) y pórticos de hormigón armado (CR) de baja ductilidad esperada (DUL) y altura de dos pisos (HEX:2). (Abajo) Modelos de vulnerabilidad estructural utilizados para la estimación de pérdidas económicas para las mismas clases de edificios.....	44
Figura 26. Ejemplo del panel superior del perfil, con las características principales de la ruptura del evento sísmico, el número de estructuras, los ocupantes y el valor económico expuesto de la ciudad.....	50
Figura 27. Ejemplo del mapa con la distribución del daño debido al evento, resaltando las comunidades más vulnerables, considerando la fragilidad física de sus estructuras, las características del suelo local y las características de la ruptura modelada.....	50
Figura 28. Ejemplo de la tabla de comunidades en alto riesgo ante el evento sísmico, mostrando el promedio del resto de métricas de riesgo obtenidos para cada una.	51
Figura 29. Ejemplo de un histograma de colapsos en la ciudad debido al evento, mostrando el rango de resultados obtenidos para todas las simulaciones. En este ejemplo, el 76% de las simulaciones resultaron en menos de 6,500 colapsos. Menos del 2% resulta en más de 12,900 colapsos. El promedio indica 4,100 colapsos como el resultado más probable.	51

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Reportes (deliverables) generados en el marco del proyecto TREQ con respecto a la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano.</i>	17
<i>Tabla 2. Estadísticas principales de tamaño y costo de reemplazo de las edificaciones en la ciudad, por estrato socioeconómico.</i>	42
<i>Tabla 3. Lista de rupturas sísmicas y sus características utilizadas para estimar el riesgo determinista en Cali. Toda la información referente a la ruptura puede encontrarse en el reporte anexo "D2.4.1 Base de rupturas seleccionadas para el análisis de escenarios".</i>	48

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento es el resultado del esfuerzo colaborativo entre la Fundación GEM, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la Secretaría de Gestión del Riesgo de Cali, el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad EAFIT. El objetivo de este reporte es presentar los resultados de la evaluación de riesgo urbano para la ciudad de Santiago de Cali, obtenidos dentro del contexto del Proyecto para la Comunicación y Formación en la Evaluación de Riesgos por Terremotos (TREQ), financiado por la Oficina de Ayuda Humanitaria de los Estados Unidos (BHA, por sus siglas en inglés).

La evaluación del riesgo sísmico a nivel urbano requiere de diversos componentes. Este reporte aborda cada componente en una sección que describe en detalle el conjunto de datos y la metodología utilizada para desarrollarlos. En la sección del modelo de amenaza sísmica de la ciudad, se encuentra la descripción de las fuentes de sismicidad en la región y los modelos de movimiento del terreno que permiten evaluar la intensidad de la agitación sísmica. Para la ciudad se desarrollaron también modelos de amplificación de la intensidad que toman en cuenta la calidad de los estratos de suelo locales. En Cali se utilizó el modelo de amenaza sísmica nacional del Servicio Geológico Colombiano, propuesto por Arcila et al. (2020), el cuál estima que la amenaza sísmica en la ciudad corresponde a una aceleración pico del terreno (PGA) promedio de 0.68 g en roca, con una probabilidad de excedencia del 2 % en 50 años. Para la ciudad también se desarrollaron funciones de amplificación sísmica para tomar en cuenta de forma explícita la calidad de los suelos de la ciudad en las estimaciones de riesgo. Encontramos que en Cali la intensidad sísmica se modifica de forma significativa dependiendo de la zona sísmica. En las zonas sísmicas 4c, 4d, 5 y 6, donde reside más del 70% de los ocupantes y el valor económico expuesto de la ciudad, encontramos la amplificación sísmica es significativamente menor al usar los modelos de respuesta del suelo que hemos desarrollado usando los estudios de microzonificación sísmica disponibles, en comparación con valores aproximados de calidad del suelo.

En la sección del modelo de exposición se describe el inventario de las edificaciones urbanas expuestas a la amenaza sísmica. Este modelo es una representación de la ciudad, sus habitantes y su ambiente construido en el año 2020. Para Cali hemos elaborado un modelo de exposición que abarca todo el límite urbano e incluye el número de estructuras, su ocupación, uso, ubicación, y caracterización estructural (e.g. material constructivo, altura y edad de constructiva), así como una evaluación del costo económico de reconstruir la edificación en caso de ser destruida en un evento sísmico. El modelo de exposición más de 340,000 edificaciones. Incluye estructuras de uso residencial, comercial, industrial, educativas, institucionales y de salud, con un costo de reemplazo superior a los 222 trillones de pesos colombianos (COP) y más de 2 millones de habitantes. Durante la elaboración de la base datos se determinó que más del 48% de los habitantes vive en estructuras de 1 a 2 pisos con un nivel de provisiones sísmicas bajas, lo cual contribuye de forma significativa al riesgo sísmico de la ciudad.

La sección de modelos de vulnerabilidad describe la metodología empleada para estimar la vulnerabilidad física de las edificaciones. La vulnerabilidad asocia la intensidad de agitación del terreno con un índice de pérdida. Por ende, permite estimar las pérdidas en cada estructura dada la ocurrencia de uno o varios eventos sísmicos. Para Cali se utilizaron más de 200 modelos de vulnerabilidad sísmica para realizar estimaciones de pérdidas. Estos incluyen las tipologías estructurales más importantes identificadas durante la caracterización de las edificaciones de la ciudad, que son la mampostería

reforzada y no reforzada de 1 a 2 pisos, y el concreto reforzado utilizado en estructuras de mediana altura (6 a 10 pisos). Con dichos modelos se han hecho estimaciones de diferentes niveles de daño (ligero, moderado, extenso, completo y colapso), afectación humana (desplazados, heridos de gravedad y fatalidades) y de pérdidas económicas para informar políticas de preparación y mitigación del riesgo a futuro.

En la sección de riesgo sísmico se presentan los resultados obtenidos para Cali. En este reporte el riesgo se presenta de forma determinística y probabilística. El riesgo determinístico es el riesgo estimado debido a la ocurrencia de un solo evento sísmico de características definidas. Dicho evento puede ser un sismo pasado o un sismo hipotético que es de gran relevancia para la ciudad debido a sus características (e.g. cercanía a la ciudad, régimen tectónico, y frecuencia de ocurrencia). Para Cali se realizó una selección de 13 escenarios sísmicos relevantes para la ciudad. Para cada uno se ha evaluado el impacto que tendría en la ciudad en sus condiciones actuales. Los resultados de riesgo determinístico tienen la intención de informar las políticas de preparación y respuesta para eventos de impacto mediano hasta muy alto, dependiendo de la magnitud y la ubicación del evento analizado. De los eventos analizados concluimos que un evento hipotético al noroeste en la Saliente de Buga, con una magnitud de 6.5 y una profundidad de 10 km, sería de mediano impacto para la ciudad, causando en promedio más de 480 estructuras colapsadas, 300 fatalidades y 6,400 miles de millones de pesos colombianos, equivalentes al 3% del valor económico total de la construcción en la ciudad. El escenario de mayor impacto es un sismo hipotético superficial, con origen en la falla de Dagua Calima, con una magnitud de 6.5 y una profundidad de 10 kilómetros. En este caso estimamos que el resultado promedio sería más de 1,800 colapsos, 1,200 fatalidades y 22 mil millones de pesos colombianos, equivalentes a un 11% del valor económico total de la construcción de la ciudad. El riesgo estimado por escenarios provee métricas del impacto total en la ciudad en términos de estructuras colapsadas, desplazados, heridos y fatalidades. Por consiguiente, tiene la intención de apoyar acciones de preparación ante desastres probables. Los resultados para cada escenario se presentan en una serie de perfiles de riesgo de preparación y respuesta ante emergencias. Estos perfiles han sido trabajados en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria. El marco metodológico y el resto de los eventos analizados pueden encontrarse en la sección de riesgo sísmico para la ciudad.

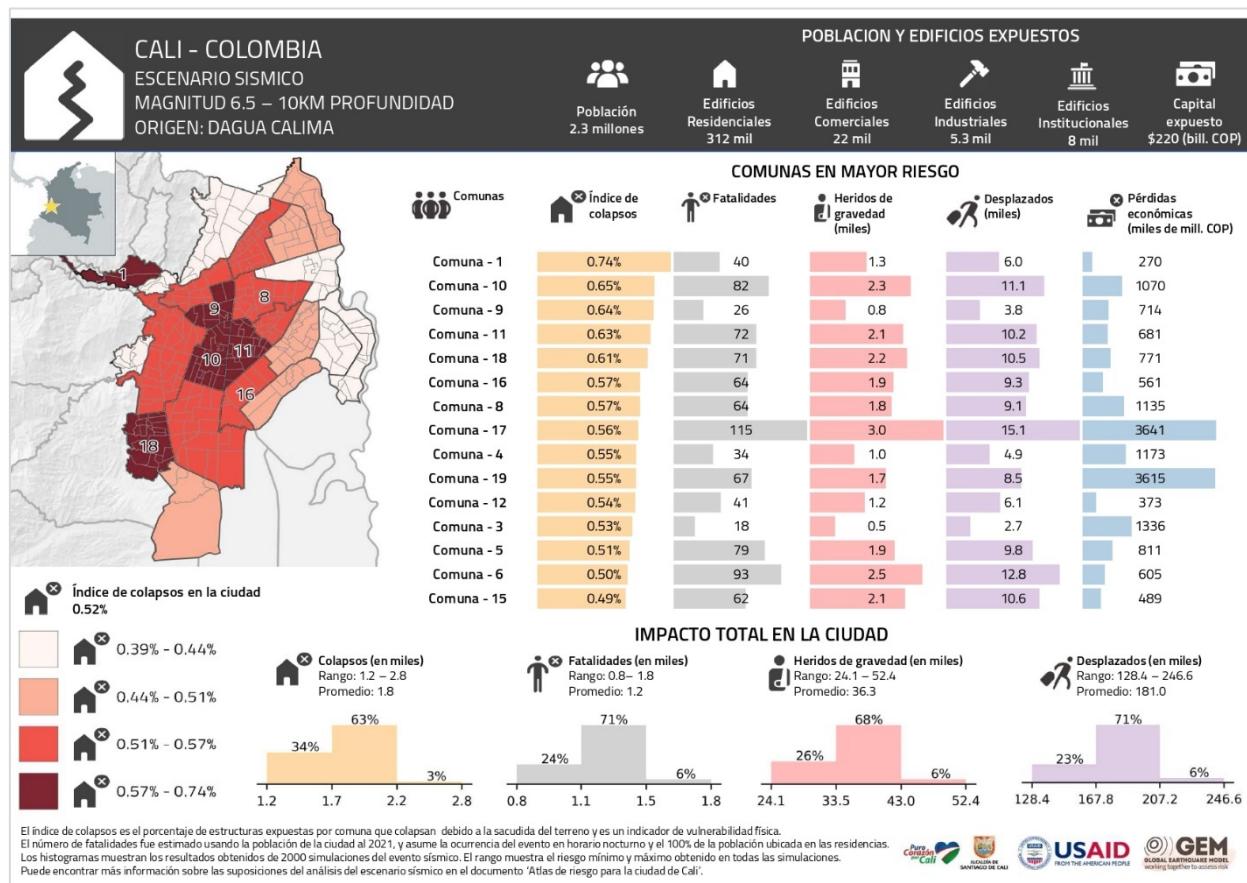


Figura 1. Uno de trece de un perfil de preparación y respuesta ante emergencias para un evento sísmico originado en la falla Dagua Calima en las cercanías de la ciudad.

El riesgo probabilístico es el riesgo estimado tomando en cuenta todos los eventos sísmicos que pueden ocurrir dentro de un periodo de tiempo determinado. Debido a esto, es el riesgo que la sismicidad de la región representa para la ciudad a futuro y puede informar políticas de gestión del riesgo y mitigación de vulnerabilidad física y social a largo plazo. Para Cali evaluamos el riesgo probabilístico para un periodo de 100,000 años. Para cada uno de los eventos sísmicos dañinos simulados dentro de este periodo estimamos el daño y las pérdidas humanas y económicas para la ciudad. En el análisis determinamos cuáles comunidades sufren mayores pérdidas a lo largo del tiempo de sismicidad, identificamos los factores que contribuyen más al daño y las pérdidas, y determinamos la frecuencia con la que pueden ocurrir eventos sísmicos con el mayor potencial destructivo. Los resultados indican que dentro del tiempo de sismicidad, Cali puede tener pérdidas de 8 fatalidades y 168 miles de millones de pesos colombianos en un promedio anual. En el análisis los 5 barrios más afectados debido a su vulnerabilidad física, exposición a los eventos sísmicos y la condición de los suelos son Bretaña, El Nacional, Marco Fidel Suárez, San Antonio y la Isla. Los resultados probabilísticos del riesgo se presentan en este reporte en la forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo. Este perfil también ha sido elaborado en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria.

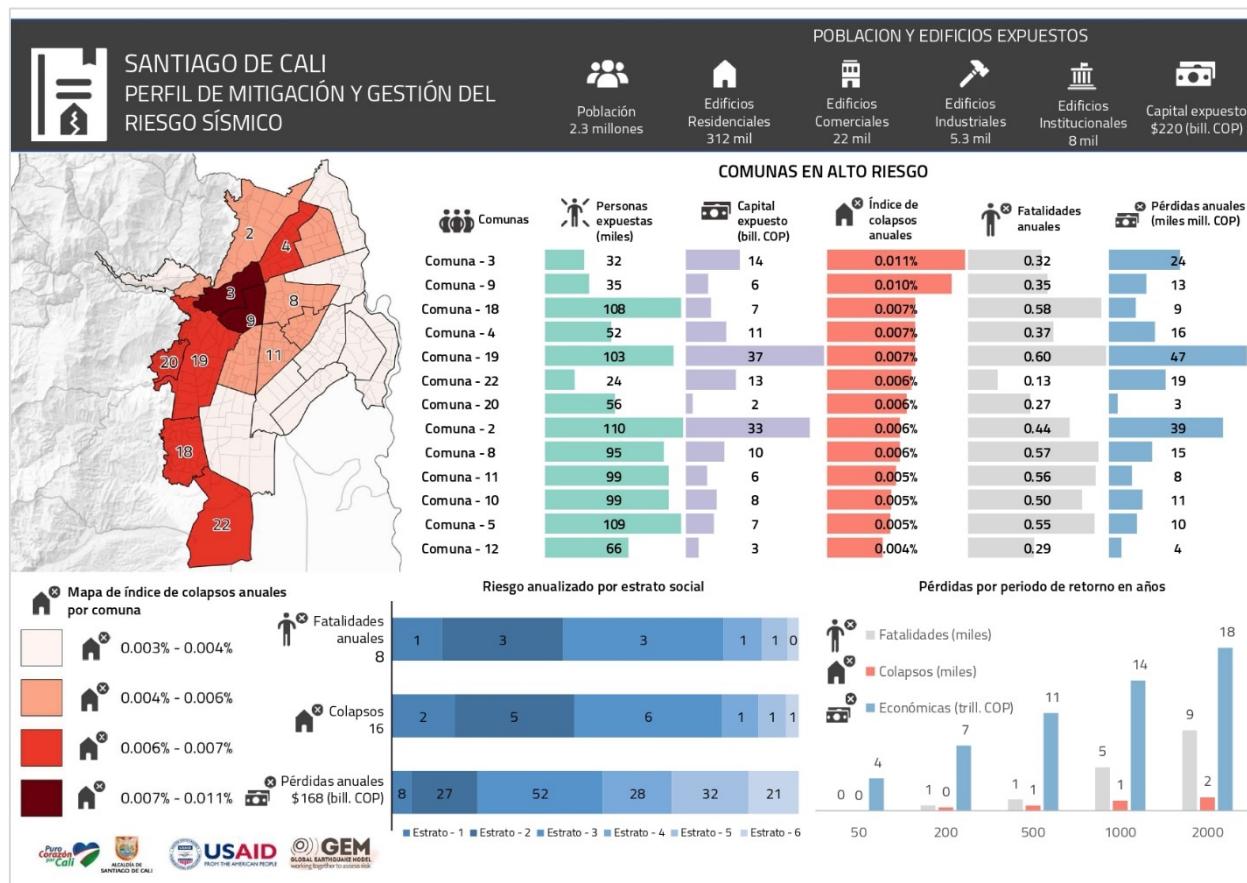


Figura 2. Perfil de mitigación y gestión del riesgo a largo plazo para Cali.

INTRODUCCIÓN

Santiago de Cali, más conocida como Cali, es la ciudad del suroccidente colombiano de mayor importancia. Es el centro urbano más grande conectado al puerto de Buenaventura en la costa pacífica y al centro de producción industrial de Yumbo. Actualmente alberga cerca del 5% de la población nacional, la mitad de la población del departamento Valle del Cauca y es una de las economías de mayor crecimiento en el país. De acuerdo con estadísticas oficiales (DANE, 2018; Cali en Cifras, 2020). Cali pasó de tener 2.11 millones de habitantes en el año 1999 a 2.46 millones en el 2020. De estos, 2.45 millones (98%) se encuentran dentro del perímetro urbano de la ciudad, distribuidos en 22 divisiones administrativas llamadas Comunas y 335 barrios. En las zonas rurales habitan aproximadamente 37 mil habitantes en 15 divisiones administrativas denominadas corregimientos y 84 veredas. De acuerdo con el Atlas de Riesgo de Colombia (UNGRD, 2018) las principales amenazas de la ciudad son los terremotos y las inundaciones.

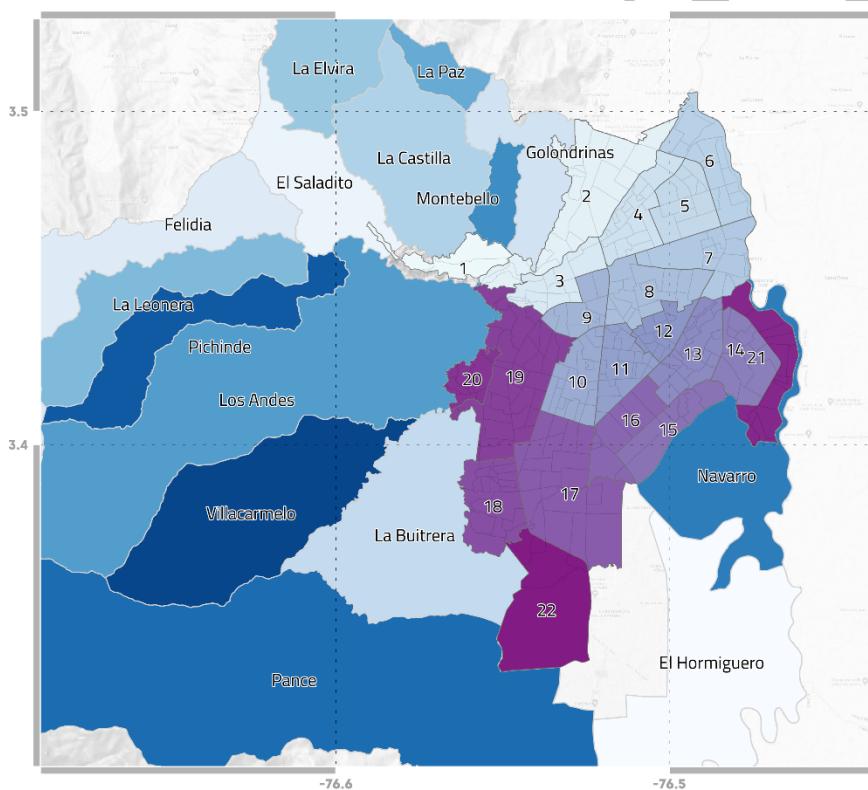


Figura 3: Mapa de división administrativa de Cali en corregimientos (azules) y comunas (purpura) subdivididas en barrios.

Cali está ubicada en una cuenca entre la Cordillera Occidental al oeste y el Río Cauca al este. Los depósitos de la cuenca están compuestos principalmente por suelos arcillosos, limosos y materiales de origen volcánico, y el espesor de los depósitos aumenta de oeste a este, alcanzando cientos de metros en el este de la ciudad (Ingeominas y Dagma, 2005). Según la clasificación del territorio establecida en la más reciente Norma Sismo Resistente, NSR-10 (AIS 2010), Cali es la ciudad más grande de Colombia ubicada en una zona de alta sismicidad. Desde 1566 ha habido más de 20 terremotos que han causado importantes daños a la ciudad. Entre los más relevantes en su historia moderna se encuentran los sismos de Manizales (Mw 7.2) y Tumaco (Mw 8.1) de 1979 que causaron más de 450 muertos en la costa del Pacífico, así como el terremoto de Popayán de 1983 (Mw 5.7) que

provocó más de 400 millones de dólares en pérdidas en el departamento del Valle del Cauca y casi el 1% de pérdida del PIB del país (Días, 1999).

Dada la historia de los terremotos que ha experimentado la ciudad y que comprometieron la estabilidad de su infraestructura y la seguridad de sus habitantes, hoy en día se cuenta con un plan de ordenamiento territorial (POT) en el que existe el mandato de mejorar el entendimiento de las amenazas naturales y sus asociados riesgos, así como de reducir y mitigar los efectos de los mismos (Plan de Ordenamiento Territorial - POT, 2014).

Para realizar una evaluación de riesgo sísmico a nivel urbano es necesario contar con tres componentes: la amenaza sísmica y su posible amplificación debido a la calidad de los suelos locales, la exposición y la vulnerabilidad, como se esquematiza en la Figura 4. La amenaza se refiere a la probabilidad de que ocurra un fenómeno natural potencialmente destructivo en un lugar dado (en este caso, un terremoto); en el caso del análisis a nivel urbano es importante incorporar las características del suelo de la ciudad (resultados de microzonificaciones sísmicas), con el fin de proporcionar estimativos más certeros según las condiciones locales. Un modelo de exposición debe describir, de la forma más detallada posible, los elementos que se encuentran amenazados por el fenómeno natural; dichos elementos, pueden ser edificios residenciales, escuelas hospitalares, puentes y demás, y deben ser examinados para cuantificar correctamente su vulnerabilidad física y potencial estado de riesgo (GFDRR 2014).

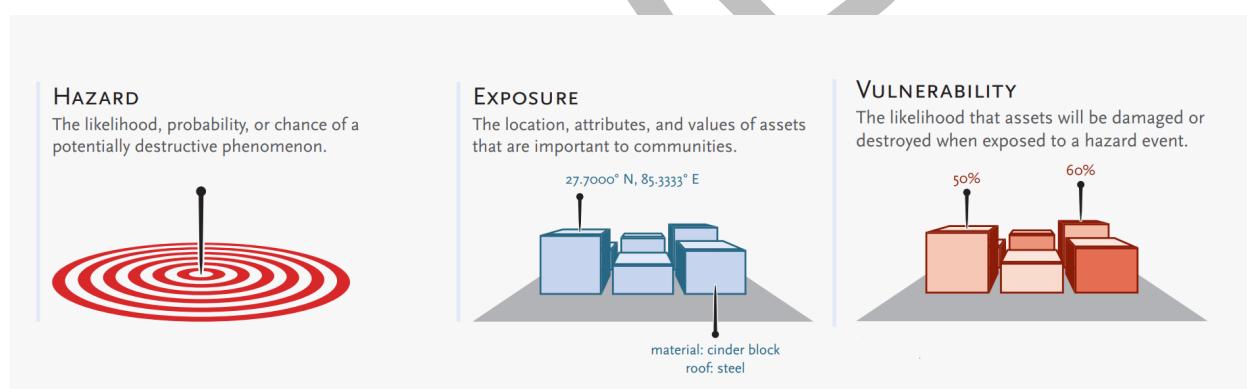


Figura 4. Los tres componentes del riesgo catastrófico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Fuente GFDRR (2014).

El presente reporte sintetiza los modelos y resultados de la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico para la ciudad de Santiago de Cali. Primero se describe el modelo de amenaza sísmica utilizado (fuentes de sismicidad, árboles lógicos) y se presentan los resultados, tales como mapas y curvas de amenaza sísmica, enfocándose en la situación actual de la ciudad. Seguidamente se presentan las suposiciones y resultados de las consideraciones de los efectos de sitio, es decir, la incorporación de los resultados disponibles de la microzonificación sísmica y la exploración de los suelos. En esta sección se presentan las funciones de amplificación del movimiento del suelo obtenidas para las diferentes zonas homogéneas. Posteriormente se resume la metodología y resultados del modelo de exposición desarrollado conjuntamente con la comunidad científica de la ciudad, resaltando las tipologías constructivas más comunes en la ciudad y mapas que permiten visualizar la distribución espacial de las edificaciones según sus características constructivas. Para la componente de la vulnerabilidad, se resume la metodología y se referencia las funciones de fragilidad y vulnerabilidad utilizadas en los

análisis. Finalmente, se presentan los resultados de la evaluación del riesgo sísmico en la ciudad. Los resultados incluyen la evaluación del riesgo determinista y probabilista. Para el riesgo determinista presentamos los resultados en forma de perfiles de preparación y respuesta. Para el riesgo probabilista presentamos los resultados en forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo.

Este trabajo es el resultado de las actividades desarrolladas en el marco del proyecto TREQ (Training and Communication for Earthquake Risk Assessment, por sus siglas en inglés, o Capacitación y Comunicación para la Evaluación del Riesgo por Terremotos), el cual está financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA). El proyecto TREQ está diseñado para demostrar cómo la evaluación de amenazas y riesgos de terremotos puede informar a los tomadores de decisiones sobre el desarrollo de políticas de reducción de riesgos, así como el riesgo de terremotos puede comunicarse adecuadamente a las partes interesadas y al público en general. Los resultados de este trabajo pueden utilizarse para informar estrategias de reducción del riesgo de desastres, así como el entendimiento y conocimiento del riesgo sísmico a nivel público.

El proyecto TREQ se enfocó en dos objetivos principales: 1) la evaluación detallada de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano y 2) el entrenamiento y comunicación de dichas ciencias a las comunidades y gobiernos involucrados. Por su importancia estratégica, nivel patrimonial y estado de amenaza, tres ciudades de Suramérica y el Caribe fueron seleccionadas para la implementación de esta iniciativa: Quito (Ecuador), Cali (Colombia) y Santiago de los Caballeros (República Dominicana). La Tabla 1 presenta los reportes ("Deliverables") generados en el marco del proyecto TREQ, con respecto a la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano. La documentación complementaria a este reporte está disponible en la página web del proyecto TREQ (<https://www.globalquakemodel.org/proj/treq>) y a lo largo del reporte se mencionan documentos que profundizan en los diferentes temas presentados. Por último, para facilitar la transferencia del conocimiento adquirido por las partes involucradas hemos creado un repositorio en línea de acceso abierto en este enlace: <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>. Este repositorio contiene los diferentes componentes del modelo de riesgo desarrollados junto al grupo técnico de la ciudad y los resultados que presentamos en este reporte. La Figura 5 contiene un vistazo del repositorio.

SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA

Evaluación del riesgo sísmico a nivel urbano

En este repositorio

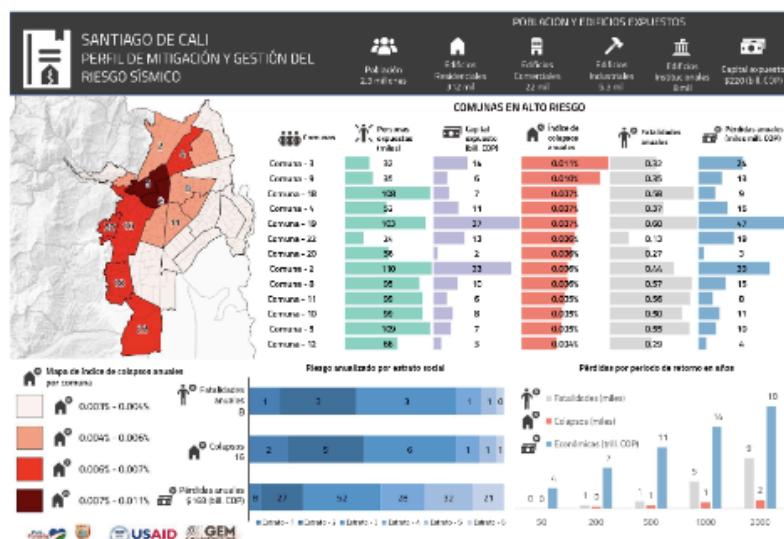
En este repositorio se puede encontrar los modelos desarrollados y resultados obtenidos para la evaluación del riesgo sísmico en la ciudad.

- Amenaza:** Incluye información relativa al modelo de amenaza sísmica de referencia utilizado en los cálculos probabilísticos y para la selección de los escenarios sísmicos
- Condiciones_Sitio:** Archivos con los modelos de las condiciones de sitio en formato compatible con OpenQuake
- Exposición:** Archivos con el modelo de exposición para la ciudad y los esquemas de clasificación que relacionan las tipologías constructivas y su vulnerabilidad (taxonomy_mapping) en formato compatible con OpenQuake.
- GIS:** Capas georeferenciadas con los mapas de la ciudad con diferentes niveles administrativos
- Mapas:** Mapas e imágenes con los modelos o resultados para la ciudad
- OpenQuake:** Archivos de configuración para realizar los escenarios de riesgo o los cálculos probabilísticos
- Riesgo:** Resultados del análisis de riesgo usando OpenQuake y perfiles para la ciudad
- Rupturas_Sísmicas:** Rupturas de los escenarios de riesgo sísmico seleccionados en formato compatible con OpenQuake

Vistazo de los resultados de riesgo sísmico

El reporte [Evaluación del riesgo sísmico para Santiago de Cali](#) presenta los detalles de los modelos utilizados y resultados obtenidos.

Perfiles de mitigación del riesgo sísmico (mediano y largo plazo)



Perfiles de respuesta (escenarios sísmicos)

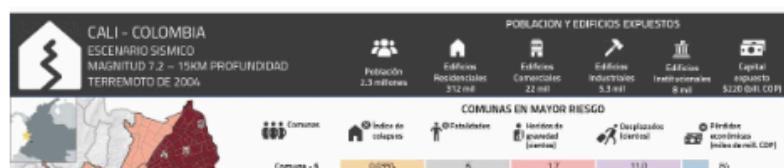


Figura 5: Vistazo del repositorio de acceso abierto en línea con los modelos y resultados del Proyecto TREQ

Tabla 1. Reportes (deliverables) generados en el marco del proyecto TREQ con respecto a la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano.

Evaluación de la amenaza sísmica

- D2.2.1 Description of the compiled datasets and the selected seismic hazard models.
[Descripción de las bases de datos recopiladas y los modelos de amenaza sísmica seleccionados]
- D2.2.2 National earthquake hazard model for the Dominican Republic.
[Modelo nacional de amenaza sísmica para la República Dominicana]
- D2.2.3 Seismic hazard results (rock and soil conditions)
[Resultados de amenaza sísmica (condiciones en roca y en suelo)]
- D2.2.4 Seismic hazard analysis at the urban scale
[Análisis de la amenaza sísmica a escala urbana]

Evaluación del riesgo sísmico

- D2.3.1 Technical report with description of building classes identified in each city
[Reporte sobre tipologías constructivas en las ciudades del Proyecto TREQ]
- D2.3.2 Geo-referenced exposure database of population and residential, industrial and commercial buildings, and where available, other occupancy classes. One database per city.
[Base de datos de exposición georreferenciada de población y edificios residenciales, industriales y comerciales, y donde esté disponible, otras clases de ocupación. Una base de datos por ciudad.]
- D2.3.3 Database of fragility and vulnerability functions for each building class present in the exposure model.
[Base de datos de funciones de fragilidad y vulnerabilidad para cada clase de edificio presente en el modelo de exposición.]
- D2.3.4 Maps and risk metrics generated for each city
[Mapas y métricas de riesgo para cada ciudad]
- D2.3.5 An executive summary report with findings and highlights of the exposure, vulnerability and risk models.
[Resumen ejecutivo con los hallazgos y los aspectos destacados de los modelos de exposición, vulnerabilidad y riesgo.]

Escenarios de riesgo sísmico

- D2.4.1 Database with ruptures selected for scenario analysis
[Base de datos con rupturas seleccionadas para análisis de escenarios]
- D2.4.2 Scenario hazard assessment for the representative earthquakes in each city. A report illustrating the methodologies, the selected scenarios and the results will be provided.
[Evaluación de la peligrosidad del escenario para los sismos representativos de cada ciudad. Se proporcionará un informe ilustrativo de las metodologías, los escenarios seleccionados y los resultados.]

Aplicaciones específicas de los modelos de riesgo urbano

- D2.5.1 Earthquake related Sendai Indicators for the Metropolitan District of Quito.
[Indicadores de Sendai relacionados con el sismo para el Distrito Metropolitano de Quito.]
- D2.5.2 Report for earthquake induced landslides and liquefaction in Cali.
[Reporte de deslizamientos y licuefacción inducidos por sismo en Cali.]

1. AMENAZA SÍSMICA

Para evaluar la amenaza y el riesgo sísmico a escala urbana es necesario generar estimaciones de amenaza sísmica que incorporen las características de la geología local y de los efectos no lineales de los suelos, los cuales generalmente no se consideran en los estudios nacionales o regionales de amenaza sísmica.

El primer paso para seleccionar un modelo de amenaza sísmica de referencia para los análisis (tanto en roca como en suelo) fue la revisión crítica de los modelos disponibles para la ciudad. A pesar de que los principios básicos para construir este tipo de modelos siguen siendo casi los mismos en los últimos 50 años (Cornell, 1968; McGuire, 2004), existe una amplia variedad de metodologías y aplicaciones para desarrollar sus componentes principales y estimar la amenaza. El reporte "*D2.2.1 Descripción de las bases de datos recopiladas y los modelos de amenaza sísmica seleccionados*" presenta en detalle la revisión de los modelos existentes, sus potencialidades y limitaciones.

El modelo propuesto por Arcila et al. (2020) fue seleccionado como modelo de referencia para el municipio de Cali. Este modelo fue creado en el marco de una colaboración científica de tres años entre el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Fundación GEM. Para construir el modelo, el SGC compiló un nuevo catálogo homogéneo de terremotos, utilizando información histórica revisada e información instrumental de distintas fuentes globales (como ISC, ISC-GEM, Storchak et al. 2013) y de fuentes regionales y locales. Adicionalmente, por medio de un enfoque multidisciplinario (ver detalles en Arcila et al., 2017, 2020) se mejoró el conocimiento actual sobre la tectónica activa y la deformación de la corteza en el territorio colombiano, brindando la posibilidad de desarrollar una caracterización compleja de las fuentes sísmicas.

Este modelo se utilizó para estimar las aceleraciones en el lecho rocoso (estimativos en roca), así como considerando una condición del suelo simplificado, la cual considera los efectos de sitio a partir de la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad (V_{s30}). La velocidad V_{s30} hace parte del término que se encarga de los efectos de sitio en los modelos más recientes para estimar el movimiento del terreno, más conocidos como ecuaciones de atenuación o de predicción del movimiento del suelo (GMPE por sus siglas en inglés). El reporte "*D2.2.3 Resultados de amenaza sísmica (condiciones en roca y en suelo)*" presenta en detalle las características del modelo usado y sus resultados en la ciudad.

Este sección presenta de forma resumida las características principales del modelo de amenaza y sus resultados para condiciones de roca utilizando el software OpenQuake Engine (Pagani et al. 2014). Se utilizó una malla de puntos uniformemente distribuidos (1 km de distancia) que cubre toda la ciudad y se estimaron aceleraciones para un 10% y un 2% de probabilidad de excedencia (PoE) en 50 años. Se consideraron varios períodos estructurales (es decir, aceleración máxima del suelo y aceleración espectral a 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 segundos). Los espectros uniformes de amenaza se derivaron utilizando estos períodos espectrales para las probabilidades de excedencia consideradas. Además, se realizó un análisis de desagregación para identificar las fuentes que más contribuyen a la amenaza en roca de la ciudad.

1.1 Fuentes de amenaza sísmica

El modelo de Arcila et al (2020) propone cuatro componentes para la caracterización de los diferentes ambientes sismotectónicos identificados en el país. El primero utiliza un modelo de fuentes superficiales activas, que contiene 30 fuentes de área independientes, definidas usando el enfoque clásico (es decir, regiones con características temporales y espaciales homogéneas de sismicidad, tectónica y geodinámica). El segundo componente, también para un entorno poco profundo activo, integra fallas activas y fuentes puntuales (Figura 6 derecha). Para modelar la sismicidad distribuida, agrupa la sismicidad superficial compilada en el catálogo en 10 amplias fuentes tipo área y calcula la distribución de frecuencia de magnitud representativa siguiendo el mismo enfoque del componente anterior; posteriormente, la fuente tipo área se transforma en una cuadrícula igualmente espaciada de fuentes puntuales que representa de forma discreta la sismicidad. La distribución de las tasas de sismicidad en cada punto se "suaviza" utilizando un núcleo gaussiano (Frankel, 1995). Para las fallas activas corticales, estas se construyeron utilizando estimaciones tectónicas (geometría de las fallas, área de ruptura máxima, tasa de deslizamiento) en lugar de la sismicidad recopilada en el catálogo. Esta componente considera 171 fallas activas distribuidas espacialmente a lo largo de la cordillera de Los Andes.

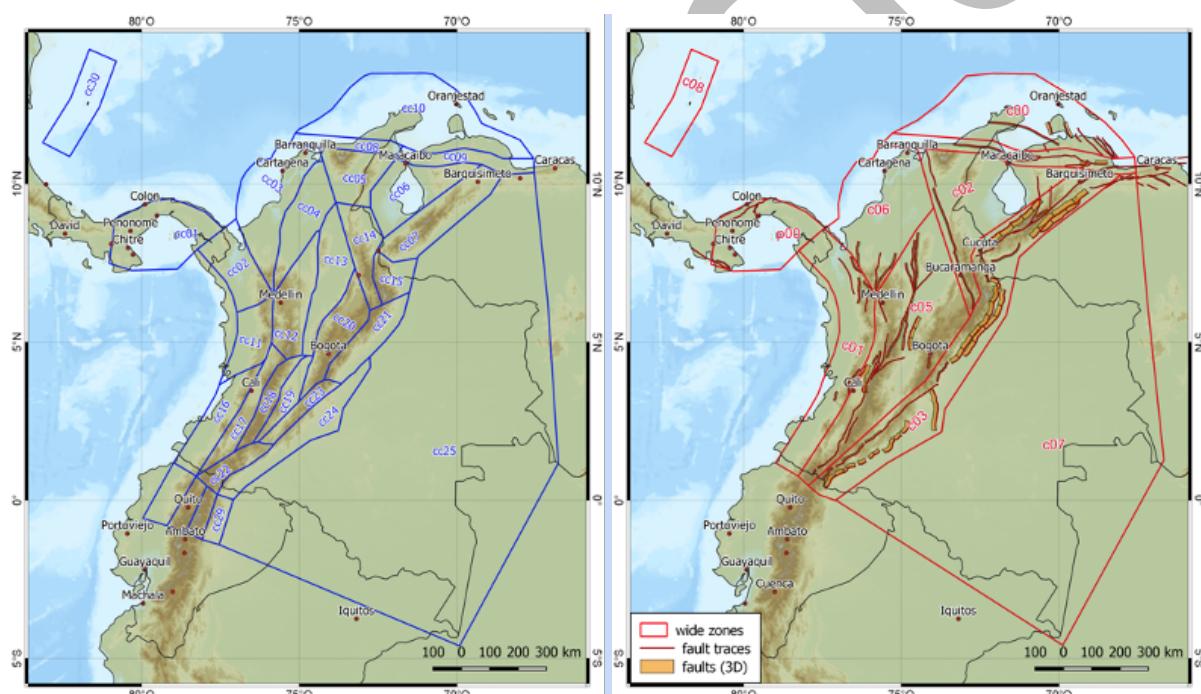


Figura 6. Modelos de corteza superficial en Colombia. [Izquierda] Modelo clásico de fuentes tipo área. [Derecha] Modelo de sismicidad distribuida (zonas anchas) + fallas activas. Fuente: Arcila et al. (2020).

El tercer componente caracteriza las fuentes sísmicas relacionadas con la subducción de Nazca en el occidente del país. Se utilizaron grandes fallas "complejas" para modelar las fuentes de interface, mientras que un conjunto de rupturas no paramétricas con buzamiento de 45° y 135° y restringidas por los límites superior e inferior de la placa que caracterizan la sismicidad intraplaca. Se consideraron dos modelos de subducción alternativos: segmentado y no segmentado. Estos modelos se presentan en la Figura 7 y la Figura 8 (izquierda).

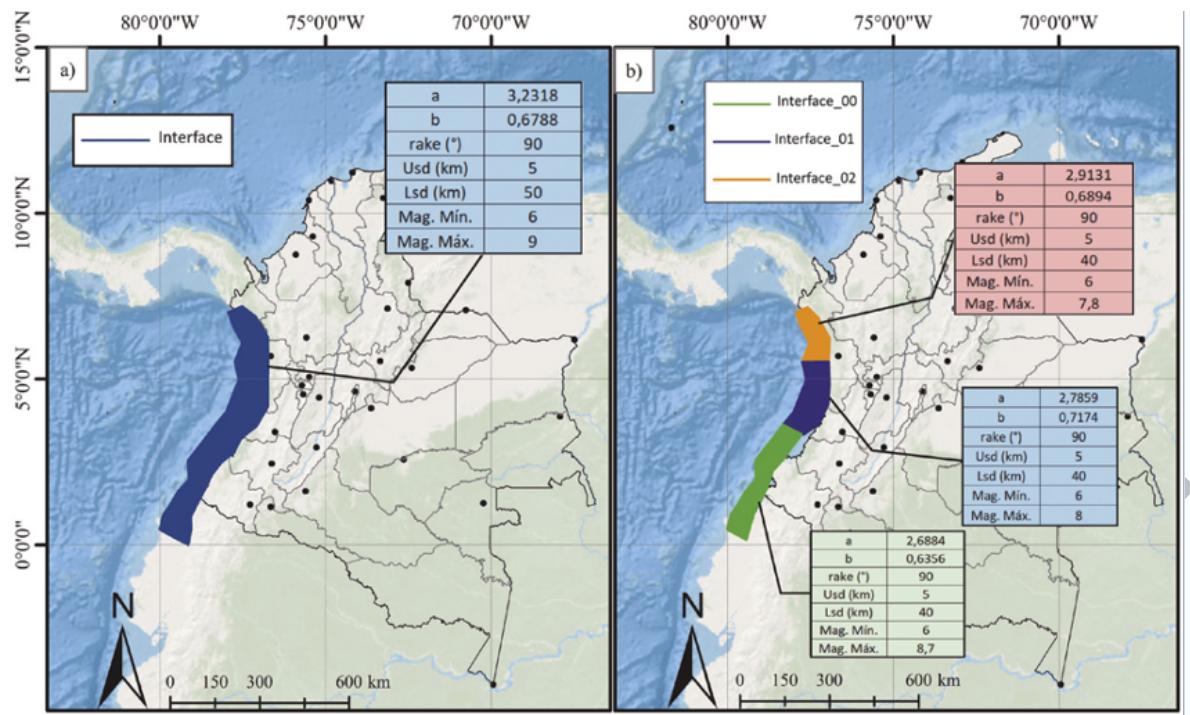


Figura 7. Modelos de la subducción interface para Colombia. [Izquierda] Modelo no segmentado. [Derecha] Modelo segmentado.
Fuente: Arcila et al. (2020).

El último componente caracteriza al Nido de Bucaramanga, un ambiente tectónico colombiano único de sismicidad profunda no relacionado con la subducción de Nazca. Se utilizó un conjunto de rupturas no paramétricas (Figura 8 derecha) divididas en dos segmentos para caracterizar las fuentes relacionadas con este ambiente tectónico.

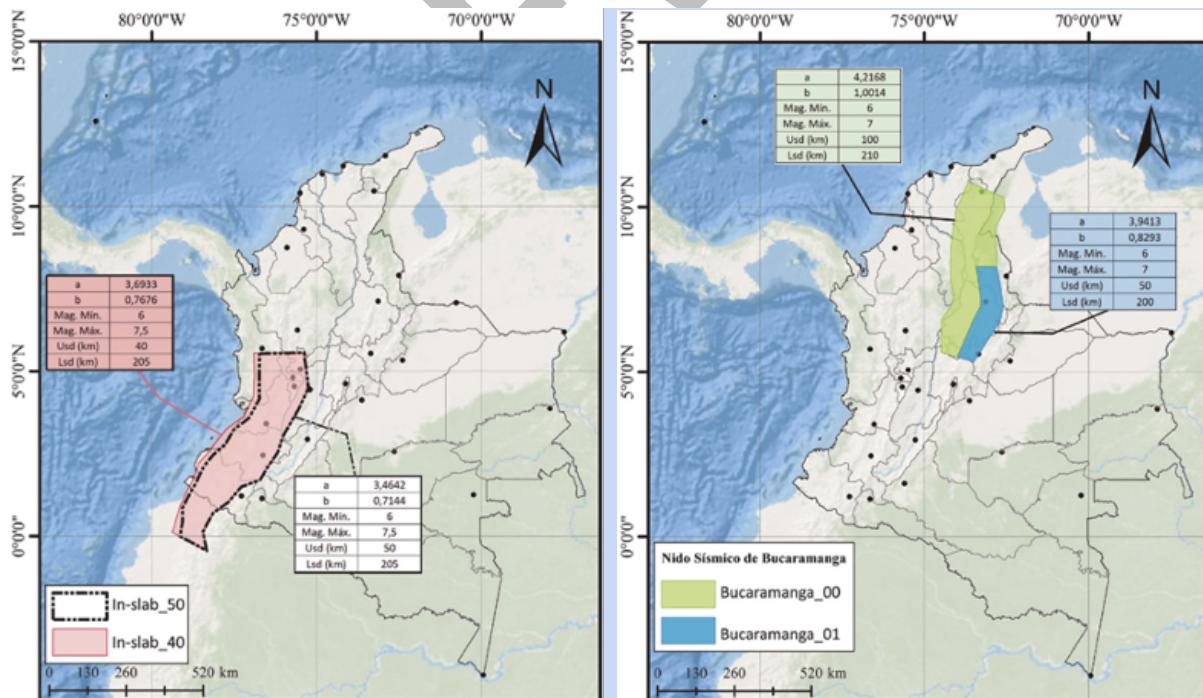


Figura 8. Fuentes de amenaza para Colombia. [Izquierda] Modelos en placa de subducción. [Derecha] Modelo de sismicidad profunda.
Fuente: Arcila et al. (2020).

1.2 Modelos de movimiento del terreno e incertidumbre epistémica

La caracterización del movimiento del suelo del modelo nacional se beneficia de los registros de movimiento fuerte recopilados por el SGC en las últimas décadas. Estos datos se utilizaron para realizar una selección precisa de las ecuaciones de atenuación, GMPEs, más apropiadas para cada ambiente tectónico (es decir, fuentes corticales, intraplaca, interface y sismicidad profunda), de acuerdo los modelos disponibles en la literatura. El proceso de selección sigue el procedimiento clásico: i) preselección de posibles GMPEs; ii) comparación del movimiento del suelo pronosticado por las GMPE preseleccionados utilizando un conjunto de escenarios de ruptura con un rango de magnitudes y distancias de fuente a sitio para varios parámetros de movimiento del suelo (diagramas tipo Trellis); y iii) análisis residual para comparar los movimientos del suelo calculados por los GMPE preseleccionados y los movimientos del suelo observados (es decir, valores máximos de registros de movimientos fuertes en el área de estudio). La Figura 9 presenta los modelos de movimiento del terreno definidos para cada ambiente tectónico y sus correspondientes pesos en el árbol lógico.

Active Shallow Crust	
Idriss2014	0.399
CauzziEtAl2014	0.390
AbrahamsonEtAl2014	0.211
Subduction Interface	
AbrahamsonEtAl2015SInter	0.437
ZhaoEtAl2006SInterNSHMP2008	0.348
MontalvaEtAl2017SInter	0.215
Subduction IntraSlab	
MontalvaEtAl2017SSlab	0.437
AbrahamsonEtAl2015SSlab	0.358
ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014	0.205
Deep Seismicity	
ZhaoEtAl2006SSlabNSHMP2014	0.443
AbrahamsonEtAl2015SSlab	0.285
MontalvaEtAl2017SSlab	0.272

Figura 9. Modelos de movimiento del terreno (GMPEs) para cada ambiente tectónico en Colombia y sus correspondientes pesos en el árbol lógico. Fuente: Arcila et al. (2020).

El modelo de Arcila et al. (2020) considera incertidumbres epistémicas relacionadas tanto con la caracterización de las fuentes sísmicas como con la caracterización del movimiento del terreno. El árbol lógico del modelo de amenaza contiene cuatro regímenes tectónicos, cada uno con tres modelos de movimiento del terreno, en combinación dos modelos de fuentes, para un total 162 combinaciones o ramas conteniendo la incertidumbre epistémica del modelo de amenaza sísmica.

1.3 Resultados de amenaza sísmica en roca

La Figura 10 presenta el mapa de amenaza sísmica para el PGA promedio para el 2% de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 760\text{m/s}$). Los valores de amenaza más altos se distribuyen a lo largo de la costa del Pacífico, donde el peligro está dominado por la contribución de las fuentes de subducción. El impacto de algunas fallas activas poco profundas también es evidente (es decir, región de Cúcuta). En Cali, el peligro alcanza alrededor de 0.68g para PGA y más de 1.75g para SA(0.2s). Esto confirma que la ciudad de Cali es la ciudad colombiana más grande y económicamente importante expuesta a un nivel amenaza sísmica alto.

Los resultados de amenaza de este modelo incluyen mapas, curvas, espectros uniformes y desagregación, para varios períodos de retorno (31, 225, 475, 975 y 2475 años) en una cuadrícula regular, espaciada cada 10km, cubriendo la totalidad del territorio colombiano. Como referencia se consideró un terreno tipo roca con un valor de V_{s30} uniforme de 760m/s, y se utilizaron varias medidas de intensidad (aceleración pico efectiva, PGA, y aceleración espectral, SA, a 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 y 5.0 segundos).

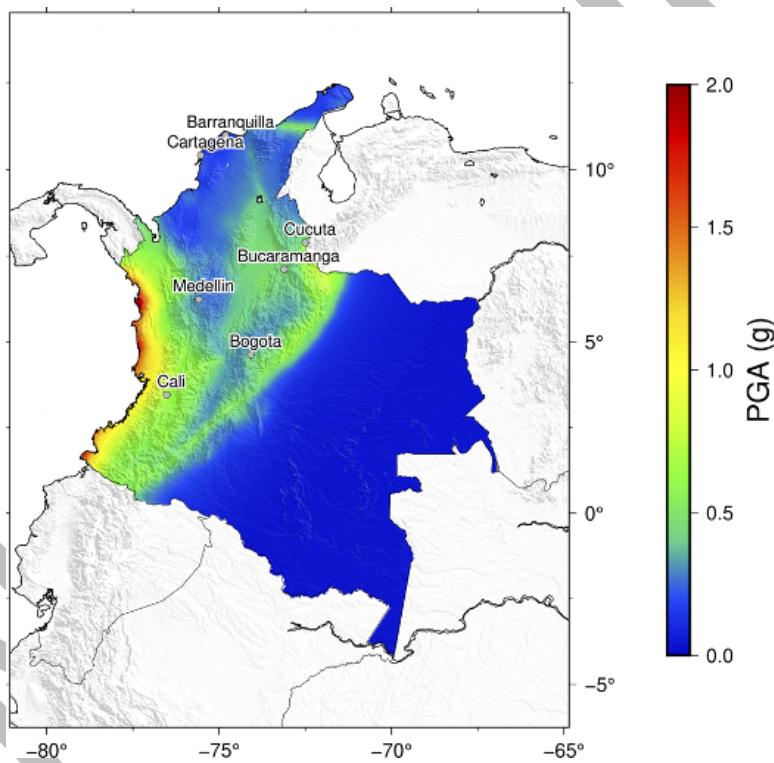


Figura 10. Mapa de aceleración pico-efectiva (PGA) promedio para el 2% de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 760\text{ m/s}$). Fuente: Arcila et al. (2020).

Considerando la ubicación geográfica de Cali, esta podría verse afectada tanto por terremotos corticales cercanos, así como por eventos en la zona de subducción de Nazca. La Figura 11 presenta las contribuciones a la amenaza según la desagregación para Cali mediante una combinación de magnitud y distancia (izquierda) y ambiente tectónico (derecha). Esta figura evidencia que eventos en dos posibles distancias diferentes podrían generar movimientos del terreno significativos en la ciudad. La primera posibilidad son eventos localizados cerca de la ciudad (aproximadamente a 25 km) con magnitudes entre 5.5 y 7.0, generados por fallas corticales activas. La segunda posibilidad son eventos localizados a una distancia de entre 80 y 100 km de la ciudad, con magnitudes (y contribuciones) más

grandes. Los resultados de desagregación en la Figura 11, también evidencian que la fuente de subducción que más contribuyen con la amenaza es la intraplaca, mientras que la ciudad de no se ve afectada por las fuentes de sismicidad profundas.

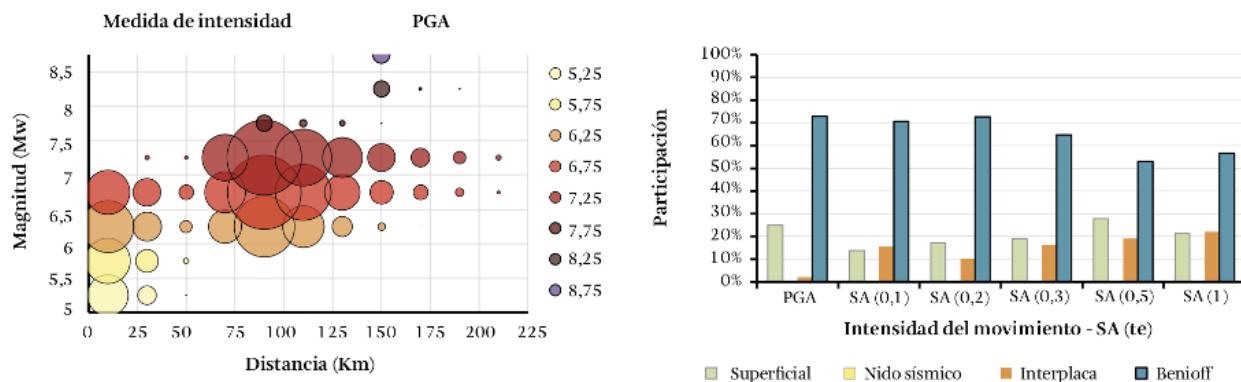


Figura 11. Resultados de desagregación sísmica para la ciudad de Cali para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años. [Izquierda] PGA medio y una combinación de magnitud y distancia. [Derecha] desagregación por ambiente tectónico para diferentes medidas de intensidad. Fuente: Arcila et al. (2020).

El modelo original de Arcila et al. (2020) solamente considera las fallas con actividad tectónica reconocida, razón por la cual se excluyó a priori la falla Cauca-Cali- Patia, clasificada como potencialmente activa en la base de datos de fallas activas del SGC. Sin embargo, esta falla ha sido modelada en otros estudios, como la microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS-DAGMA, 2005) y en los dos últimos estudios de amenaza utilizados como referencia para los códigos de diseño y construcción colombianos (AIS, 2019; Salgado et al. 2016; Bernal, 2014). Debido a la cercanía de la falla a la ciudad, su contribución a la amenaza total es significativa.

Consecuentemente, se decidió implementar la falla Cauca-Cali- Patia añadiéndola a las fuentes activas del estudio de referencia. La implementación sigue la misma metodología utilizada en Arcila et al. (2020), los parámetros relacionados con la geometría de la falla (es decir, traza de falla, estilo de falla y segmentación) se obtuvieron de la base de datos de fallas activas del SGC. Las estimaciones de la cinemática de la falla y la tasa de deslizamiento se basaron en un estudio reciente sobre el régimen de tensión y deformación en Colombia utilizando mecanismos focales de terremotos y datos geodésicos de Arcila y Muñoz-Martín (2020). En la Figura 12 se presenta la traza de la falla y su posición con respecto a la ciudad de Cali.

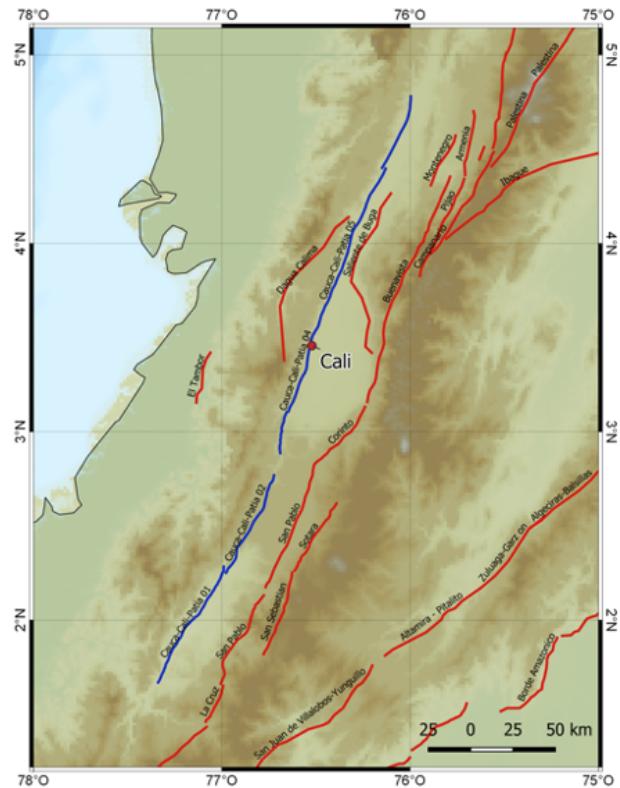


Figura 12. Fallas activas en la región del Valle del Cauca, Colombia. Las líneas azules son las trazas de la falla Cauca-Cali-Patía (segmentos) y en rojo las fallas consideradas por Arcila et al. (2020).

La Figura 13 presenta los mapas de amenaza sísmica para la aceleración pico efectiva (PGA) media incluyendo la falla Cauca-Patía. Los valores más altos de PGA alcanzan 0.38g y 0.70g para el 10% y 2% de probabilidad de excedencia en 50 años, los cuales están ubicados en la parte norte-oeste de la ciudad y los valores de amenaza disminuyen en la parte central y este de la ciudad. Predominantemente los valores de amenaza en la ciudad oscilan entre 0.35 y 0.37 g para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y entre 0.66 y 0.70 g para el 2 % de probabilidad de excedencia en 50 años.

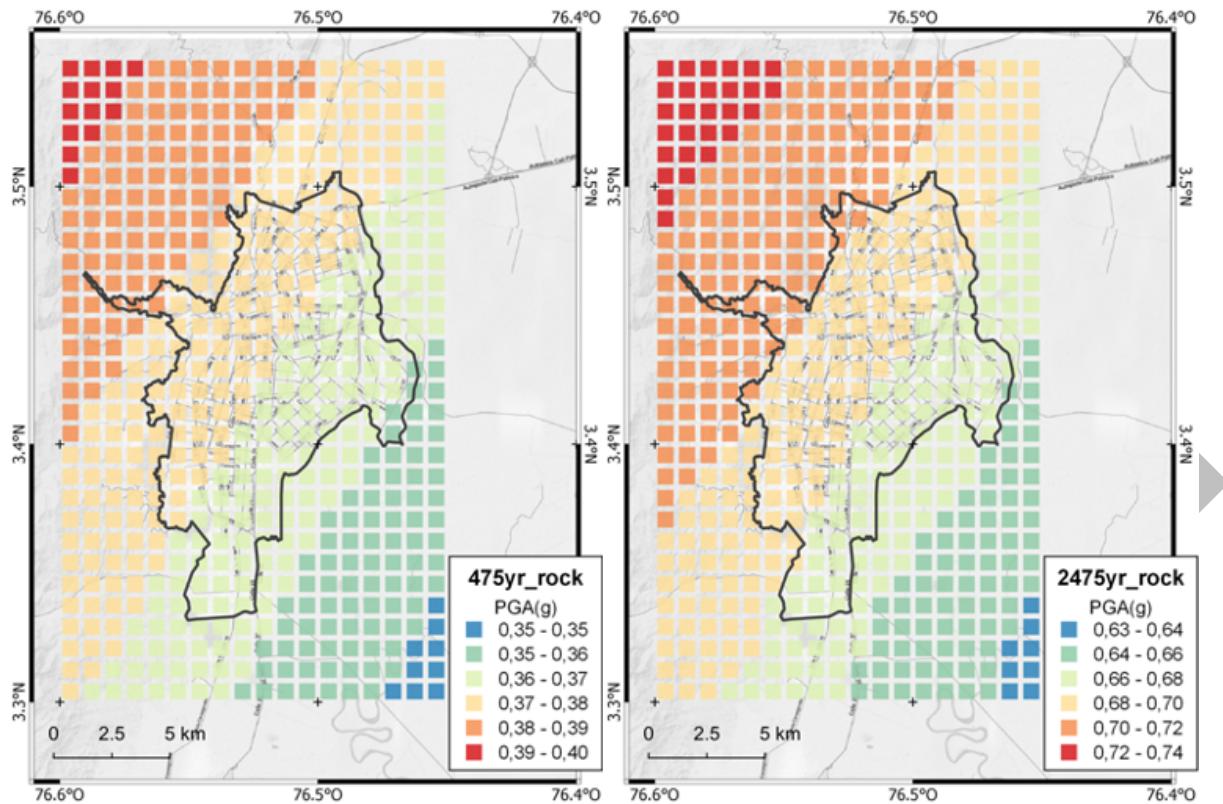


Figura 13. Mapas de PGA promedio para Cali (en de roca) para el 10% (izquierda) y 2% (derecha) de probabilidad de excedencia en 50 años.

La desagregación de la amenaza sísmica se utiliza para identificar qué combinaciones de variables explicativas (por ejemplo, magnitud y distancia) tienen mayores contribuciones a un parámetro determinado del movimiento del terreno en un sitio específico y para una medida de intensidad y una probabilidad de excedencia específicos. En otras palabras, la desagregación indica qué fuentes, agrupadas por sus parámetros de control, controlan la amenaza para un período de retorno determinado.

En este caso se realizó la desagregación de la amenaza sísmica siguiendo a Pagani y Marcellini (2007) para un sitio en la ciudad (76.523°O y 3.443°N) como una combinación de: i) magnitud, distancia y épsilon; ii) longitud, latitud y región tectónica; y iii) longitud, latitud y magnitud. El análisis se centró en la aceleración pico-efectiva (PGA) para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años y suelo tipo roca. Se consideraron fuentes sísmicas en un radio de 200 km del perímetro de la ciudad. La Figura 14 muestra los resultados de una combinación de Magnitud - Distancia - Épsilon (número de desviaciones estándar de la media de una GMPE) agrupada en rangos de 0.5 Mw y 10 km. Al igual que los resultados presentados por Arcila et al. (2020), la mayor contribución proviene de fuentes localizadas entre 80 y 100 km de distancia y magnitudes, Mw, entre 7.0 y 7.5. Este grupo se puede asociar a fuentes intraplaca de subducción teniendo en cuenta los resultados de contribución de peligros presentados en la Figura 14, donde se considera una combinación de Latitud - Longitud - Región Tectónica. El segundo grupo en la Figura 14 está cerca o dentro de la ciudad (aproximadamente a 5 km) con magnitudes entre 6.0 y 7.0, dominando la amenaza las fallas corticales activas.

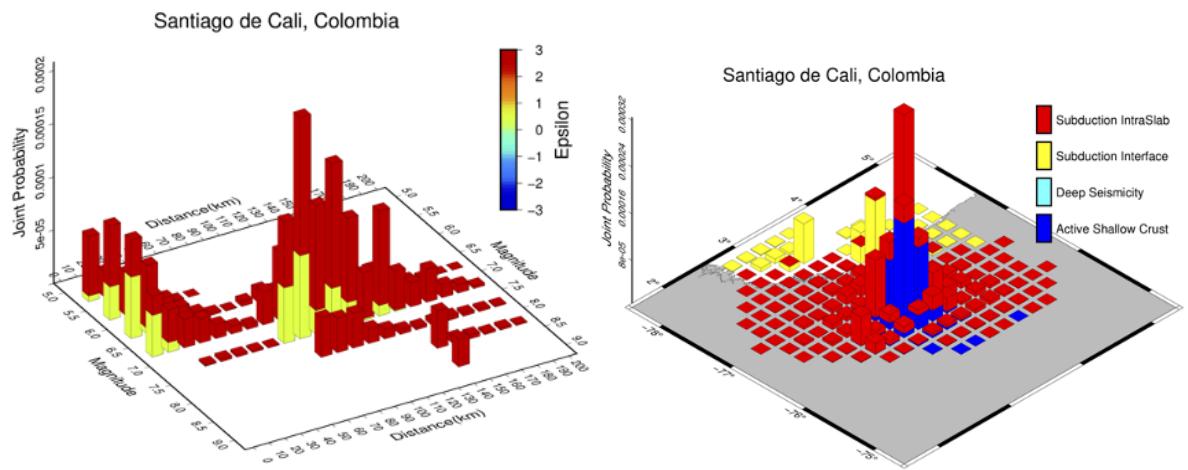


Figura 14. Desagregación de la amenaza sísmica en PGA (en roca) para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años para la ciudad de Cali. [Izquierdo] Magnitud - Distancia - Épsilon. [Derecha] Latitud - Longitud - Región Tectónica.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO

Existen dos enfoques principales para modelar la respuesta del sitio en el análisis de amenaza sísmica. El primero, y más común, es modelar la respuesta del sitio a través de funciones de amplificación ergódicas genéricas dentro de las ecuaciones de atenuación del movimiento del terreno, GMPEs, (por ejemplo, Kamai et al., 2014), que comúnmente usan el parámetro Vs30 como un proxy para la respuesta del sitio. Esto generalmente se usa para análisis a escala nacional o regional, ya que Vs30 se puede estimar fácilmente a partir de la topografía de la superficie (Allen y Wald, 2007; Heath et al., 2020). Si bien este enfoque es práctico, no siempre es posible capturar todos los aspectos de la respuesta del sitio, como los efectos de resonancia y la no linealidad del suelo. El segundo enfoque requiere datos geotécnicos o geofísicos locales e implica modelar explícitamente la respuesta del suelo y luego ajustar el modelo de amenaza o los resultados de la amenaza en el lecho rocoso de referencia, para lo cual se han propuesto varios métodos, como lo presenta la revisión disponible en Aristizábal et al., 2016. El segundo enfoque se usa comúnmente en estudios específicos del sitio, donde se requiere un mayor nivel de detalle al modelar la respuesta del suelo. Los estudios de microzonificación también siguen el segundo enfoque para el modelado de la respuesta del suelo; sin embargo, estos estudios generalmente no calculan los resultados de la amenaza probabilística, sino que se centran en identificar zonas con comportamiento sísmico homogéneo y proporcionar acciones de diseño sísmico.

Para realizar el estudio de amenaza y riesgo sísmico para la ciudad de Santiago de Cali a escala urbana se utilizó el enfoque detallado (segundo enfoque) y se desarrollaron modelos de respuesta del suelo con base en los resultados disponibles en la microzonificación sísmica de la ciudad. Uno de los objetivos del proyecto TREQ en la ciudad fue desarrollar funciones de amplificación del movimiento del terreno que permitan determinar con mayor precisión la amenaza sísmica (y por lo tanto, el riesgo sísmico) en comparación con los enfoques estándar que se basan en el parámetro de Vs30.

Las siguientes secciones resumen los resultados de las funciones de amplificación para la ciudad con respecto a la amenaza sísmica. El reporte “D2.2.4 Análisis de la amenaza sísmica a escala urbana” presenta en detalle la metodología, resultados y análisis de la estimación de los efectos de sitio en las tres ciudades del proyecto TREQ.

2.1 Información geotécnica y geofísica

El primer paso es la recopilación de la información geotécnica para definir los parámetros necesarios para el análisis de respuesta del sitio, los cuales incluyen el espesor de la capa, la velocidad de la onda de corte (Vs), el peso unitario (γ), el índice de plasticidad (PI), la clasificación del suelo siguiendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y la profundidad del nivel freático. Posteriormente, los datos se homogenizan para tener en cuenta los valores faltantes y las diferencias en las unidades medidas. Finalmente, los perfiles se extendieron hasta la condición del lecho rocoso de referencia para el cual se calcula el peligro, que se define como la profundidad cuando se alcanza Vs=800 m/s.

Para la ciudad de Cali, estudios relacionados con la microzonificación sísmica en Cali incluyen Ingeominas y Dagma (2005), que corresponde a la microzonificación oficial de la ciudad en una extensa zona; Castro Villamarín (2011), que se centró en la respuesta no lineal del suelo en la región de Cañaveralejo, y CI Ambiental (DAGMA, 2019), que amplió el estudio de 2005 para incluir el análisis de

riesgos para las edificaciones de grupo de uso I de la norma sismoresistente. Para el análisis se utilizaron los datos geotécnicos y la zonificación de Ingeominas y Dagma (2005) proporcionados por el Servicio Geológico de Colombia. Se recolectaron datos geotécnicos en 39 estaciones y la ciudad se dividió en 10 microzonas propuestas, que abarcan el 98% de la exposición considerada en este estudio (Figura 15). La mayoría de los ocupantes expuestos, los edificios y el valor económico se encuentran en la zona 6.

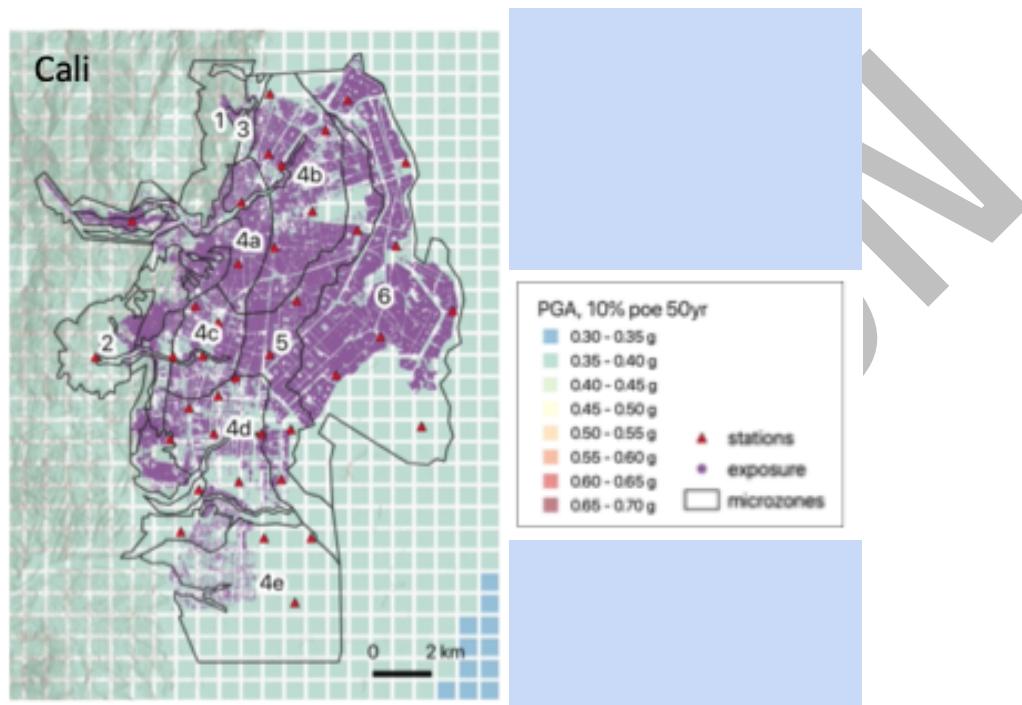


Figura 15. Mapas de amenaza en roca ($V_s=800\text{ m/s}$) para PGA con 10% PoE en 50 años, junto con microzonas, estaciones y exposición consideradas en este estudio.

Para todos los sitios, los perfiles de referencia no alcanzan el lecho rocoso ($V_s=800\text{ m/s}$) y, por lo tanto, deben extenderse. Se utilizó el método V_s normalizado por tensión (por ejemplo, Moon y Ku, 2016), que también se usó en el estudio microzonificación (Ingeominas y Dagma, 2005), y en el cual los perfiles V_s se amplían utilizando la ecuación 1, más los dos parámetros adicionales necesarios: la tensión vertical en cada capa y la presión atmosférica (101,3 kPa).

Los perfiles resultantes se caracterizan por un gradiente V_s decreciente con la profundidad (es decir, las curvas aumentan con la profundidad), y cuando se usa este método, es necesario imponer manualmente el lecho rocoso a profundidades específicas, de lo contrario, los perfiles se extienden a profundidades poco realistas antes de alcanzar el horizonte V_s de referencia. Por lo tanto, el método es adecuado solo cuando se conoce la profundidad del lecho rocoso. En Cali, se proporcionan estimaciones de los depósitos Cuaternario ($V_s > \sim 450\text{ m/s}$) y Terciario ($V_s > \sim 1000\text{ m/s}$) para cada sitio (Ingeominas y Dagma , 2005, Informe 5.2, Tabla 4.26), y se utiliza el límite entre los dos como la profundidad del lecho rocoso de referencia. Los perfiles extendidos resultantes se presentan en la Figura 16, donde se observa que los perfiles más profundos se extienden hasta una profundidad de 1,750 m.

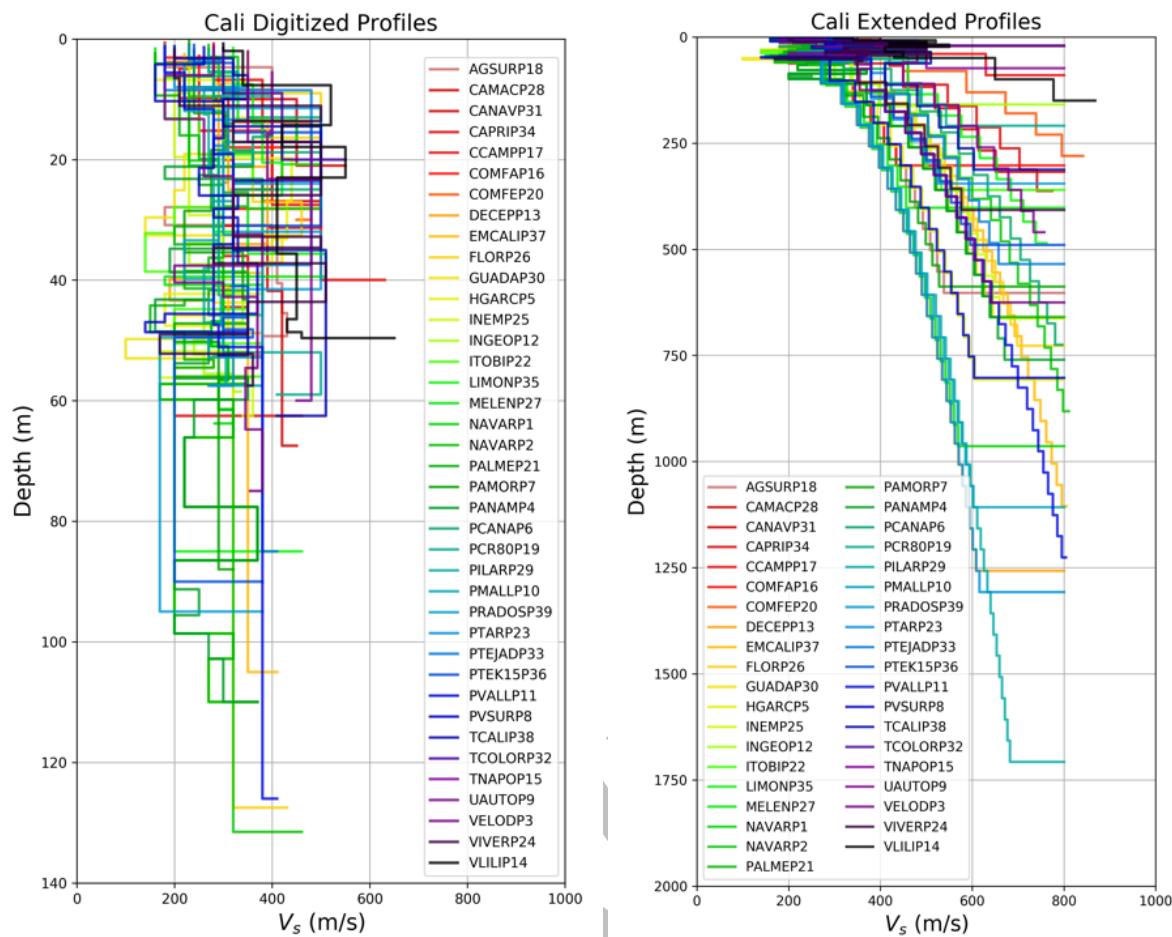


Figura 16. [Izquierda] Perfiles V_s digitalizados para Cali (atos de Ingeominas and Dagma, 2005). [Derecha] Perfiles V_s extendidos al lecho rocoso de referencia ($V_s = 800$ m/s).

2.2 Metodología para el análisis de efectos de sitio

La metodología para la modelación de los efectos de sitio en la ciudad puede resumirse en cinco etapas como se presenta a continuación. Adicionalmente, la Figura 17 esquematiza el proceso para el desarrollo del modelo de respuesta de suelo y la cuantificación de sus efectos.

1. Desarrollo del modelo de respuesta del suelo utilizando los datos geotécnicos y geofísicos locales disponibles (presentados previamente).

El modelo de amenaza sísmica se utiliza para simular posibles movimientos de entrada en el lecho rocoso necesarios para el análisis de la respuesta de sitio en la ciudad (SRA, Soil Response Analysis, por sus siglas en inglés). Estas simulaciones se realizan utilizando la teoría de vibraciones aleatorias (Rathje y Ozbey , 2006; Kottke y Rathje , 2013) que se usa comúnmente para análisis de amenaza en sitios específicos (por ejemplo, Rodriguez-Marek et al., 2014, 2017; Ameri et al., 2017; Tromans et al., 2019). El principal beneficio de este enfoque (además de eliminar la necesidad de seleccionar y escalar series de tiempo) es que se pueden considerar muchos escenarios que permiten cubrir una amplia gama de intensidades de sacudidas del

suelo, que son importantes para estimar con precisión la amenaza y el riesgo para múltiples períodos de retorno.

2. Simulación de la respuesta del suelo utilizando análisis lineal equivalente 1D por medio del software pySRA (<https://github.com/arkottke/pysra>) y el conjunto de movimientos de entrada generados a partir del modelo de amenaza sísmica, los cuales tienen en cuenta la incertidumbre asociada al fenómeno. Con este software la respuesta del suelo se trata como lineal, pero las propiedades dinámicas del suelo (es decir, módulo de corte y amortiguamiento) se actualizan en función del nivel de deformación en cada capa para capturar el no-comportamiento lineal del suelo.

El conjunto de movimientos de entrada se propaga a través de cada columna de suelo para obtener los movimientos de superficie. El comportamiento no lineal de los suelos se modela utilizando las curvas de reducción del módulo y de amortiguamiento del material, y se consideran propiedades específicas, tales como el índice de plasticidad, el índice de sobreconsolidación y la profundidad del nivel freático en cada sitio caracterizado.

3. Definición de las funciones de amplificación del suelo (AF) y su incertidumbre asociada ($\sigma_{\ln AF}$), las cuales representan los modelos de respuesta del suelo en diferentes zonas homogéneas. Las funciones de amplificación se calculan dividiendo los movimientos de superficie calculados por los respectivos movimientos de entrada, para cada período de interés y en cada sitio de análisis. Las funciones de amplificación se definen para períodos relevantes para el análisis de amenaza (entre PGA y 2.0 segundos), así como para una amplia gama de niveles de intensidad de sacudidas del lecho rocoso (entre 0.05 y 4.0 g) y, por lo tanto, pueden usarse fácilmente para el análisis probabilístico de amenaza y riesgo sísmico.

Dado que el objetivo es aplicar el modelo de respuesta del suelo en cualquier ubicación dentro de la ciudad, las funciones de amplificación y su incertidumbre se calcularon por zonas, y no solo en sitios individuales. La suposición subyacente es que la respuesta del suelo es similar dentro de cada zona homogénea, usando como referencia la zonificación propuesta en el estudio de microzonificación sísmica. Como ejemplo, la [Figura 18](#) muestra las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: uno rígido y otro blando. Factores de amplificación mayores a 1 indican amplificación, mientras que valores menores a 1 indican deamplificación.

4. Cálculo de curvas de amenaza sísmica en superficie y verificación de los resultados.

Las curvas de amenaza en la superficie se calculan utilizando el enfoque de convolución numérica (Bazzurro y Cornell, 2004, ec. 3) implementado en el motor de OpenQuake, en el cual se combina la curva de amenaza calculada en el lecho rocoso de referencia con la función de densidad de probabilidad de la función de amplificación (es decir, la mediana de AF y $\sigma_{\ln AF}$). En el enfoque de convolución, cada intensidad de movimiento del suelo de la curva de amenaza del lecho rocoso contribuye a la amenaza en cada intensidad de movimiento del suelo en la superficie, según su respectiva probabilidad de excedencia. Una ventaja de este método es que permite incorporar la incertidumbre de la AF (es decir, $\sigma_{\ln AF}$), a pesar de considerarla en su totalidad como un fenómeno aleatorio.

Las curvas de amenaza sísmica obtenidas por medio de diferentes metodologías se comparan y analizan con el fin de revisar y verificar el impacto de la incorporación de los efectos de sitio en la estimación del movimiento del suelo.

5. Para los cálculos de riesgo sísmico el modelo de amplificación del suelo se incorpora utilizando un enfoque diferente. Primero se genera un catálogo estocástico de terremotos. Para cada evento, se calcula un campo de movimiento del suelo en el lecho rocoso de referencia, donde los componentes de la variabilidad del movimiento del terreno entre eventos y dentro de un mismo evento se simulan por separado, si de esta forma lo especifican las GMPE. Para cada sitio, el movimiento del suelo en el lecho rocoso de referencia se multiplica por un valor aleatorio de la función de densidad de probabilidad AF (es decir, la mediana AF y $\sigma_{\ln AF}$) para obtener el movimiento del suelo en la superficie.

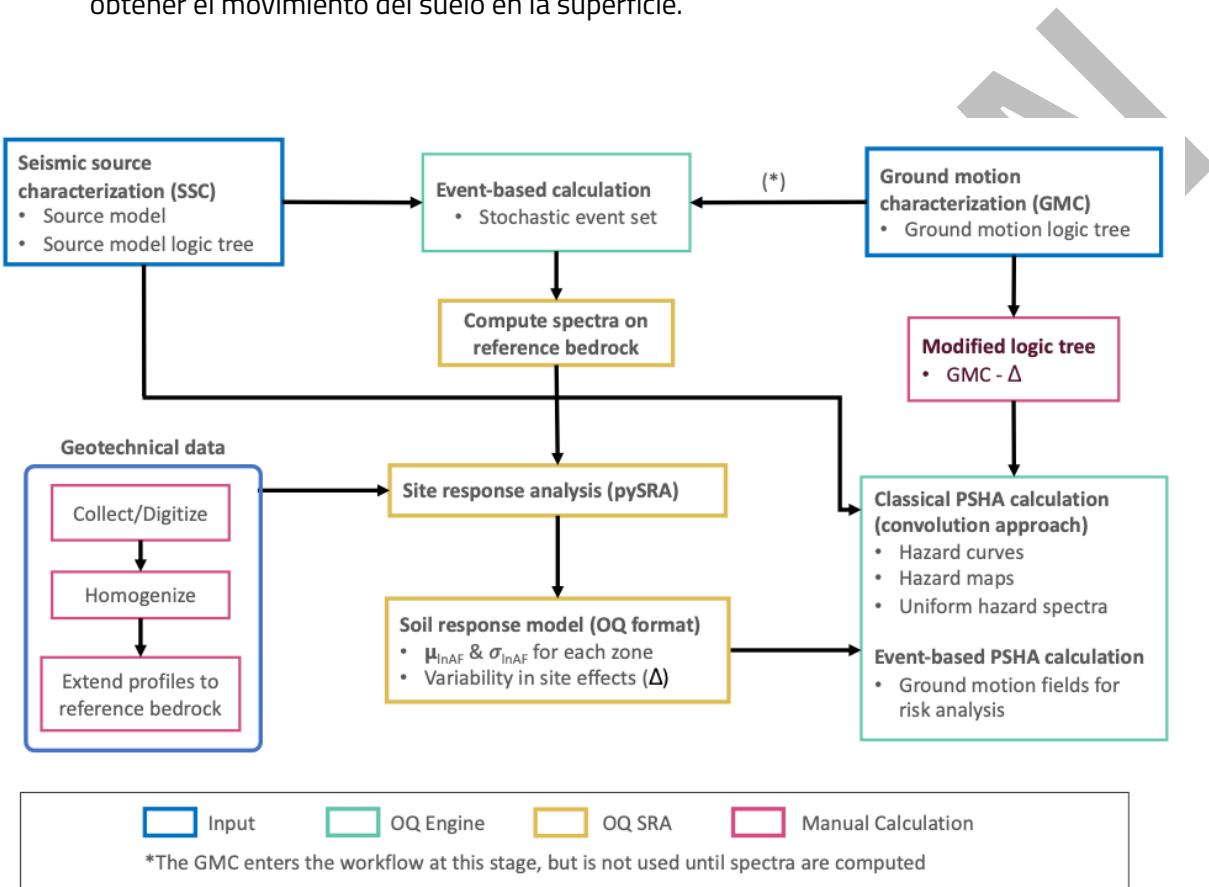


Figura 17. Esquema con metodología para la caracterización de los efectos de sitio.

Fuente: Reporte TREQ D.2.2.4 (Gee et al., 2021)

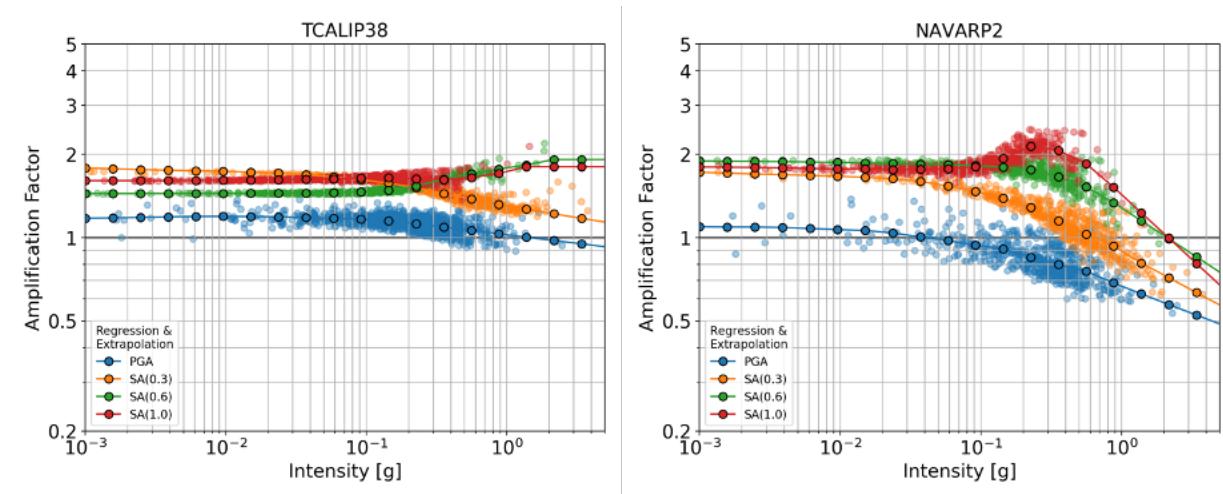


Figura 18. Ejemplo de las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: a) suelo rígido con $V_{s30}=418\text{ m/s}$ (izquierda), y b) suelo blando con $V_{s30}=273\text{ m/s}$ (derecha). Las funciones se estimaron para cuatro períodos (PGA, 0.3, 0.6 y 1.0 segundo) y los círculos negros representan la mediana de la amplificación usando el método "LOWESS" en la regresión.

2.3 Funciones de amplificación del movimiento del suelo (AF)

El resultado de la caracterización de los efectos de sitio en la ciudad es un modelo de respuesta del suelo en formato compatible con el software OpenQuake. Este es esencialmente un archivo separado por comas (*.csv) que contiene las funciones de amplificación del suelo (AF) y su incertidumbre asociada ($\sigma_{\ln AF}$) para diferentes períodos espectrales y diferentes niveles de intensidad. Cada función de amplificación se define como la relación espectral entre el movimiento en superficie y el movimiento del lecho roca ($Sa_{\text{superficie}} / S_{\text{a roca}}$), y $\sigma_{\ln AF}$ es la desviación estándar del logaritmo de las FA.

En el repositorio <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano> están disponibles los archivos de texto con las funciones en formato compatible con OpenQuake. La zona "noaf" se usa para zonas por fuera del área definida en la microzonificación sísmica, para las cuales se asumió $AF=1$ (sin amplificación) y en su lugar se utiliza el valor de V_{s30} de referencia para la ciudad.

De acuerdo con los mapas y curvas generadas en la ciudad para comprender la influencia (y la variabilidad) de las condiciones del sitio en los resultados de amenazas, es evidente que los movimientos de períodos largos (SA a 1,0 s) están más influenciados por las variaciones en las condiciones del sitio que los de períodos cortos (PGA y/o SA a 0,2 s).

El modelo de respuesta del suelo para Cali se muestra en la Figura 19. Las funciones de amplificación se calcularon para todas las zonas excepto la zona 1 y la zona 3, donde no había datos disponibles. Como la zona 1 es roca, se asumió $AF=1$ para todas las intensidades, y en la zona 3 se asumieron las mismas amplificaciones que en la zona 4A, debido a las similitudes en las propiedades del suelo. En las zonas occidentales (2, 3, 4A y 4B), que se caracterizan por suelos rocosos y rígidos, hay amplificación en todos los períodos e intensidades, llegando a 2.5 en la zona 4a. En las zonas orientales (4B, 4C, 4D, 5 y 6), que se caracterizan por suelos blandos, prevalece una amplificación de mayor período (2.0 segundos), alcanzando un factor de 2.5 en la Zona 4C, y también una deamplificación pronunciada en períodos cortos (es decir, PGA) con el aumento de la intensidad de la sacudida del lecho rocoso. Esta

deamplificación es particularmente fuerte en la zona 6 (junto con las zonas 4C y 5), que es la zona que tiene el mayor impacto en el riesgo. Esta deamplificación no está presente en las zonas occidentales, ni es tan frecuente en las otras dos ciudades.

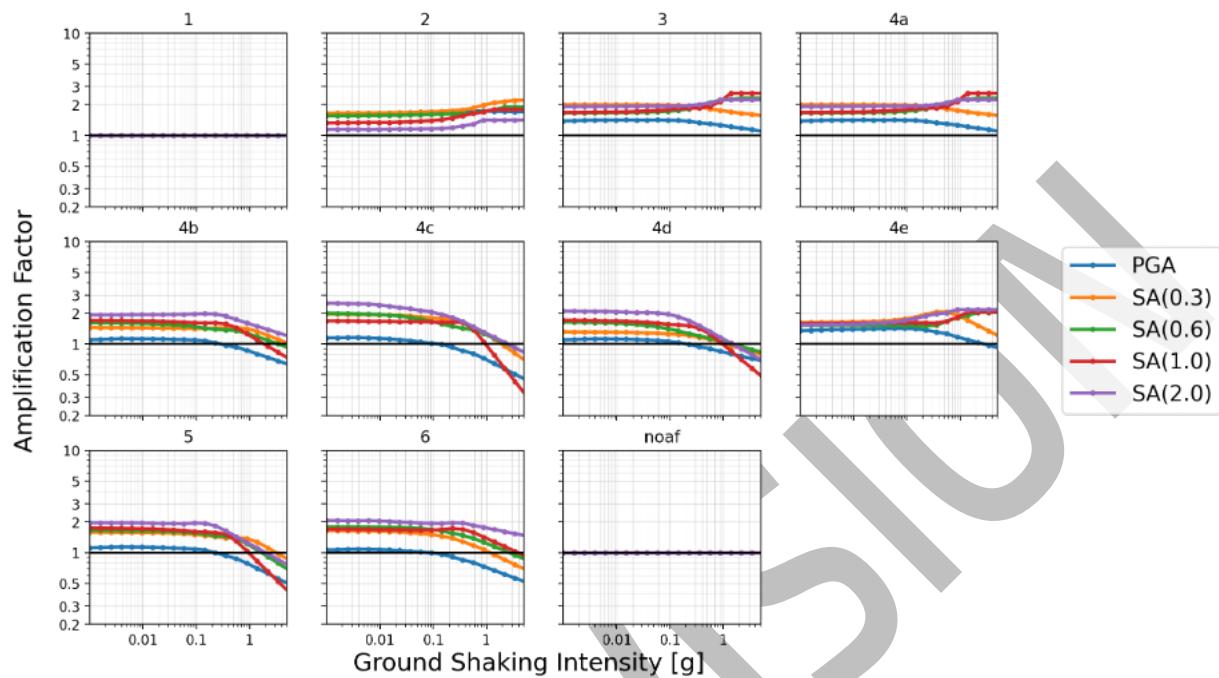


Figura 19. Modelo de respuesta del suelo para Cali. Funciones de amplificación (AF) indicando la mediana en cada zona homogénea para diferentes períodos.

En Cali es posible hacer una comparación general entre los resultados de este estudio y los factores de amplificación calculados por Ingeominas y Dagma (2005) (Informe 5.2, Anexo 4), más no una comparación directa porque sus AF fueron calculados en función del período en lugar de la intensidad del movimiento del suelo. Ingeominas y Dagma (2005) realizó análisis de la respuesta de sitio lineal equivalente 1D usando ProSHAKE y DEEPSOIL usando 10 series de tiempo con intensidad ~0.2 g (según Informe 5.2, Tabla 6.2). De manera similar a Ingeominas y Dagma (2005), se encontró amplificación en las zonas orientales en períodos más largos (2.0 segundos), amplificación en las zonas occidentales en todos los períodos y deamplificación en las zonas orientales en períodos cortos. Una diferencia notable se observa en la Zona 3, ya que esta se modeló mediante secciones transversales 2D en Ingeominas y Dagma (2005), mientras que el presente estudio usa los valores de referencia de la Zona 4a.

3. MODELO DE EXPOSICIÓN

Un modelo de exposición es fundamental para la evaluación del impacto debido a las amenazas naturales, ya que contiene información sobre la ubicación geográfica, las características físicas y el valor económico de las edificaciones expuestas a las amenazas. El entorno creado por el hombre, su contenido y sus ocupantes son todos elementos expuestos a amenazas naturales y deben ser examinados para cuantificar correctamente su vulnerabilidad física y riesgo potencial (GFDRR 2014). La Fundación GEM desarrolló conjuntos de datos de exposición para Ecuador, Colombia y República Dominicana como parte de las actividades del Modelo de Riesgo Global en 2018 (Silva et al. 2020). Dichas bases de datos se utilizaron para estudiar el riesgo sísmico a nivel nacional. Como parte de las actividades del proyecto TREQ hemos mejorado la información de exposición disponible para cada ciudad con el fin de proporcionar modelos detallados adecuados para la evaluación del riesgo sísmico a escala urbana. Entre las principales mejoras a los conjuntos de datos, destacamos la resolución espacial detallada de las edificaciones, una robusta caracterización física de las estructuras, la inclusión de estructuras de uso educativo, institucional y de salud, y actualizaciones en el costo de la construcción en la ciudad. El resultado es un modelo de exposición de alta resolución por ciudad, los cuales están disponibles en el entregable '*D2.3.2 Bases de datos de exposición georreferenciada de edificios y población en las ciudades TREQ*'. En esta sección hacemos una reseña de las bases de datos y el marco metodológico con el cual se ha desarrollado el modelo de exposición, así como sus resultados más relevantes.

3.1 Demografía y división administrativa de la ciudad

Santiago de Cali es la ciudad del suroccidente colombiano de mayor importancia. Es el centro urbano más grande conectado al puerto de Buenaventura en la costa pacífica y al centro de producción industrial de Yumbo. Actualmente alberga cerca del 5% de la población nacional, la mitad de la población del departamento Valle del Cauca y una de las economías de mayor crecimiento en el país. De acuerdo con estadísticas oficiales (DANE 2018, Cali en Cifras 2018-2020), Cali pasó de tener 2.11 millones habitantes en el año 1999 a 2.46 millones en el 2020. De estos, 2.45 millones (98%) se encuentran dentro del perímetro urbano de la ciudad, distribuidos en 22 divisiones administrativas llamadas Comunas y 335 unidades barriales. En las zonas rurales habitan 36.6 mil habitantes en 15 divisiones administrativas denominadas Corregimientos y 84 veredas. Al mismo tiempo es la ciudad más grande de Colombia ubicada en una zona de sismicidad alta, según la clasificación del territorio por la normativa sísmica NSR-10. Desde 1566 se han registrado más de 20 sismos que ocasionaron daños importantes en la ciudad. Entre los más relevantes de su historia moderna están los terremotos de Manizales (Mw 7.2) y Tumaco (Mw 8.1) de 1979 que causaron más 450 muertes en la costa pacífica, así como el sismo de Popayán de 1983 (Mw 5.7) que causó más de 400 millones de USD en pérdidas en el departamento Valle del Cauca y casi 1% de pérdida del PIB del país (Días 1999).

3.2 Recopilación de datos

Las entidades de ordenamiento territorial han recopilado información sobre las construcciones en la ciudad en bases de datos oficiales y públicas. Se revisó una gran cantidad de información existente,

que va desde documentos de planificación urbana, límites administrativos, censos de la ciudad, encuestas in situ y bases de datos catastrales. La información se recopiló a través de consultas en línea en las bases de datos de la ciudad o directamente de la Secretaría de la Gestión del Riesgo. De esta forma obtuvimos conjuntos de datos actualizados de alta resolución sobre el uso del suelo, las características de las estructuras, su ocupantes e indicadores socioeconómicos que permiten hacer una adecuada caracterización de la vulnerabilidad física y social de los bienes y habitantes de la ciudad.

Para Cali, las bases datos principales fueron último censo de población y vivienda que incluye información sobre la vivienda y el estrato social de sus habitantes por cuadra de la ciudad, último registro catastral de la ciudad y utilizamos los modelos de exposición desarrollados previamente por investigadores locales como referencia. También se procesaron más de 30 mil levantamientos de edificios que la ciudad ha recolectado mediante estudios de exposición y riesgo anteriores a TREQ.

3.3 Clasificación de las edificaciones

El desarrollo de los conjuntos de datos de exposición requiere el procesamiento de los datos recopilados y la obtención de atributos que puedan usarse para clasificar los activos por su vulnerabilidad, tipo de ocupación y costo de reemplazo. Como las bases de datos provienen de diferentes fuentes, las mismas varían en formato, calidad y complejidad. En este estudio trabajamos principalmente con fuentes de información: alfanumérica y geográfica. Por ejemplo, las bases de datos censales, que contienen la información demográfica y social de los habitantes de la ciudad pertenecen al primer grupo. Las bases de datos con el uso del suelo, y las características constructivas de las edificaciones pertenecen al segundo grupo. Como ambos tipos son bases de datos georreferenciadas (e.g. contienen información sobre su ubicación en el espacio ya sea por nombre administrativo o por coordenada geográfica), toda la información recolectada fue enlazada por medio de una unión espacial o por medio de un campo común. A la base de datos que contiene toda la información enlazada la llamamos capa de información constructiva de la ciudad.

Una vez obtenida la capa de información constructiva, la misma es procesada para clasificar cada una de las estructuras según su fragilidad y vulnerabilidad sísmica. Este es el enfoque de mapeo propuesto por Yepes-Estrada et al. (2017). La metodología consiste en utilizar variables categóricas de las bases de datos que describen las estructuras y los ocupantes (p. ej., material de construcción o nivel socioeconómico) y utilizarlas para la clasificación. Cuanto mayor sea la cantidad y la calidad de las variables que describen los activos, mejor será la clasificación. Para cada estructura, analizamos variables como el material de la pared, el material de la estructura, el tipo de piso, el tipo de techo, los acabados, el año de construcción, la altura, el propósito económico, el uso principal de la estructura, el área de construcción y el estrato socioeconómico. Cada una de estas variables nos ayuda a determinar un atributo estructural de la edificación. Siguiendo la clasificación de edificaciones propuestas por Silva et al. (2021), determinamos como mínimo los siguientes atributos estructurales:

- **Material constructivo:** es el material predominante del sistema constructivo de la edificación. Los más comunes son la mampostería y sus variantes, el concreto reforzado y la madera. Las variables más importantes para determinar el material constructivo son el material de las paredes exteriores y el tipo de armazón o estructura exterior. En ausencia de estas, el uso o

destino económico de la estructura puede usarse para inferir cuál es el material constructivo (e.g. bodega, escuela, mercado).

- **Sistema resistente a las cargas laterales:** también llamado LLRS (por sus siglas en inglés) es el sistema que resiste la acción de las fuerzas sísmicas. Los más comunes son los muros de cortante y los marcos o pórticos. Las variables más importantes para determinar el LLRS son el material de las paredes exteriores, el tipo de armazón de la estructura y la altura de la edificación.
- **Número de pisos:** es el número de pisos de la edificación y se relaciona directamente con la variable de altura o rango de pisos que se encuentra en la base de datos.
- **Ductilidad esperada de la edificación:** hace referencia a la capacidad de la estructura a soportar cargas laterales sin perder su integridad o poner en riesgo la vida de los ocupantes, los componentes y los contenidos. A mayor ductilidad, mejor el desempeño de la estructura durante un sismo. Por lo general una estructura se clasifica con baja, mediana o alta ductilidad. Como este atributo no se encuentra en ninguna base de datos, por lo general se utilizan variables como el año de la edificación o el estrato socioeconómico de la edificación, el cual se asocia con el código sísmico o la formalidad de la construcción.
- **Tipo de cubierta:** hace referencia a la estructura de la cubierta o techo de la edificación, la cual se clasifica como liviana o pesada. Esta información es relevante ante la amenaza sísmica y volcánica. Se relaciona directamente con la variable de techo o cubierta disponible en la base de datos.

Adicional a los atributos estructurales, también utilizamos las variables categóricas para determinar los atributos de ocupación y valor económico del costo de reemplazo de las estructuras.

- **Ocupación:** la ocupación en el modelo de exposición se refiere al uso de la estructura. Se deriva directamente de las variables de uso o destino económico de la misma. En TREQ hemos clasificado todos los posibles usos en los siguientes atributos de ocupación: residencial, comercial, industrial, institucional, educativo y médico o de salud.
- **Valor del costo de reemplazo:** es el valor económico de la estructura y sus componentes estructurales y no estructurales. Excluye el valor de la propiedad. Se utiliza para estimar las pérdidas en las que puede sufrir el propietario o gobierno en el caso del colapso total de la estructura. El costo de reemplazo puede ser mayor al costo actual de la edificación, si la edificación debe construirse de nuevo tomando en cuenta nuevas previsiones de calidad constructiva y sismo-resistente. El valor de reemplazo de la estructura se estima usando variables como el estrato social, los acabados constructivos, el estado de la edificación y el destino económico de la misma.

Los valores de las variables categóricas se asocian a valores de los atributos. Por ejemplo, si la variable de 'uso' de la estructura es 'escuela' en la base de datos, la misma se clasifica con un atributo de ocupación 'EDU' (educativa) en el modelo de exposición. Si la variable de 'material de pared' es 'adobe' en la base de datos, la misma se clasifica con un atributo de material 'ADO' (material constructivo de adobe) en el modelo de exposición. Este proceso se repite hasta que todas las variables categóricas

han sido transformadas en atributos estructurales, de ocupación y de costo de reemplazo. La combinación de todos los atributos identificados constituye la clase constructiva final de la estructura.

Para realizar una correcta asociación entre las variables categóricas en las bases de datos y los atributos en el modelo de exposición, es necesario conocer de antemano las principales tipologías estructurales de la ciudad. Por ejemplo, si la variable de 'material de pared' es 'concreto reforzado', la estructura puede ser de pórticos de concreto colado en sitio, o muros de concreto colados en sitio, muros de concreto prefabricado, entre otros. Para una adecuada clasificación de fragilidad y vulnerabilidad sísmica, es necesario entender cuál de estos atributos es predominante en la ciudad y realizar así una clasificación estructural más cercana a la realidad constructiva de la misma. La identificación de las principales tipologías de la ciudad ha sido detalladamente documentada en el entregable "D2.3.1 - Descripción de las clases de edificación identificadas en las ciudades TREQ". Aquí se proporciona un resumen principal de los hallazgos del proceso de modelado de exposición proveer contexto.

En el caso de Cali, cuatro expertos brindaron esquemas de clasificación de la ciudad. Estos ofrecieron una forma directa de pasar de las variables de la base de datos a las clases de construcción por lote de la ciudad en función de su juicio experto. Una vez clasificados todos los edificios, el resultado es una base de datos georreferenciada que presenta los activos expuestos, con su respectiva ubicación, clase de vulnerabilidad, tipo de ocupación, número de ocupantes y costo de reposición. La identificación de las principales tipologías de la ciudad ha sido detalladamente documentada en el entregable "D2.3.1 - Descripción de las clases de edificación identificadas en las ciudades TREQ". Aquí se proporciona un resumen principal de los hallazgos del proceso de modelado de exposición proveer contexto.

3.4 Tipologías o clases constructivas predominantes

La mampostería tiene el papel predominante en la construcción de Cali. Por ejemplo, de las 4.937 edificaciones relevadas en estudios previos (eg, OSSO, 2017), cerca del 65% corresponden a variantes de mampostería de bloques de concreto reforzado (denominación MR en la taxonomía de Brzev et al. 2013) o confinado (MCF). Casi el 25% corresponde a sistemas informales de alta vulnerabilidad como semiconfinados (CR/LFINF), no reforzados (MUR) o de adobe (MUR+ADO). El hormigón armado (CR) registra alrededor del 6% de la muestra, muy utilizado en edificios de apartamentos, aunque también se registraron casos de casas prefabricadas independientes. La madera (W) y otros materiales (MATO) rara vez se utilizan dentro del área urbana.



Figura 20. Distribución de las 580 mil viviendas en la ciudad de Cali por tipo, material de construcción predominante y material de pisos predominante. Fuente: Censo de Población y Vivienda de 2018 (DANE, 2018).

La mampostería es el material constructivo predominante en la vivienda unifamiliar y por ende juega un papel fundamental en la exposición de la ciudad. Se encuentra en configuraciones que abarcan diferentes tipos de calidades y alturas. El sistema-sismoresistente son muros con bloques de mampostería de concreto o arcilla, debidamente confinados por elementos de concreto reforzado, con una distribución en planta regular. Esta configuración está permitida por la normativa sismoresistente colombiana (NSR-10) hasta una altura de dos pisos. En estas condiciones tiene un desempeño adecuado ante cargas sísmicas. Sin embargo, OSSO (2017) señala que son pocas las instancias en las que la normativa se cumple a cabalidad. En este tipo de configuración también se presenta la construcción incremental modular que puede agregar hasta 2 pisos adicionales generando irregularidad en planta (ver Figura 21). En dichas condiciones no se espera un comportamiento dúctil de este sistema constructivo. Tanto Acevedo (2015) como OSSO (2017) identificaron una cantidad significativa de viviendas unifamiliares e independientes son de mampostería de bloques de concreto y arcilla, confinada por elementos de concreto, que no cumplen con la normativa sismo-resistente. La mampostería resulta parcialmente confinada debido a que carece de una viga corona, tiene aberturas no permitidas o se construye en paños de más de 4 m de largo. El sistema-sismoresistente en este caso son muros de mampostería, que en algunos casos carece completamente de elementos confinantes de concreto o refuerzo de acero. Por la construcción incremental modular puede llegar a tener hasta 5 pisos de altura e irregularidades severas en altura. Se consideran tipologías estructurales altamente vulnerables y de baja ductilidad esperada.



Figura 21. Casas de mampostería confinada cumpliendo e incumpliendo la normativa NSR-10 en los barrios San Fernando y El Caney, respectivamente. Tomadas de: Google Maps (2020).

También hay una cantidad significativa de construcciones en sistemas de concreto reforzado (ver Figura 22). En este caso las cargas laterales pueden ser soportadas por pórticos resistentes a momentos, muros de cortante y sistemas duales (NSR-10). Tanto Acevedo (2015) como OSSO (2017) identificaron los tres sistemas presentes la ciudad de Cali. El concreto reforzado se usa para construcciones de gran tamaño, de uso comercial y residencial. Los pórticos resistentes a momento son colados en sitio. Hay una variante del sistema de pórticos no permitida por la normativa sismoresistente que no tiene viga de amarre, y las cargas se transmiten a las columnas por losa plana y viguetas. De estas configuraciones no se espera un comportamiento dúctil. Cuando los pórticos son debidamente construidos con todos sus elementos se espera un mejor desempeño ante cargas laterales. Los sistemas de muros y duales se emplean en edificaciones de gran altura debido a que controlan satisfactoriamente la deriva de la estructura. Debido a la formalidad en el diseño y la construcción de estas edificaciones se califican en tipologías de ductilidad alta. También hay sistemas constructivos modernos en acero utilizados predominantemente para uso comercial y industrial en Cali. De acuerdo con OSSO (2017), en la ciudad el acero se usa en dos sistemas sismo-resistentes: pórticos resistentes a momentos y pórticos arriostrados diagonalmente para aumentar la rigidez lateral. La primera se emplea en edificaciones de baja altura como naves industriales. La segunda en edificios de varios pisos. Dada la edad y la formalidad de estas construcciones se estima que el detallado de las conexiones y la soldadura cumple con la normativa sismo-resistente. Las tipologías constructivas en acero se clasifican con una ductilidad moderada y alta.



Figura 22. Edificios de muros colados en sitio y prefabricados de concreto reforzado en el Barrio Buenos Aires y Torres Comfandi. Tomados de Google Maps (2020) y OSSO (2017).

De acuerdo con el Departamento Administrativo de Planeación Metropolitana (DAPM) alrededor del 7% de la población de la ciudad vive en tugurios (Cali en Cifras, 2015). A estos se les denomina como asentamientos humanos de desarrollo incompleto y actualmente cubren alrededor de un 6% de la ciudad. Torres-Tovar (2009) ubica los asentamientos más vulnerables de la zona urbana cerca de las laderas de la Cordillera Occidental y a lo largo de la ribera del río Cauca, donde están expuestos a deslizamientos e inundaciones respectivamente. Como agravante, los sistemas constructivos usados informalmente han evolucionado de materiales livianos como la madera, en configuraciones de 1 piso, a ser predominantemente materiales pesados de más de dos pisos. Esto hace a la vivienda en dichas zonas vulnerable a las agitaciones del terreno. Por ejemplo, en un estudio de daños en Barrio Jordán, Santander (2013) determinó que un 76% de las viviendas informales tienen una vulnerabilidad sísmica alta. Entre los materiales livianos está la madera, la fibra natural, el material de desecho, las láminas de zinc o fibrocemento y el concreto prefabricado. Estas son casas independientes cuyo sistema sismoresistente son placas horizontales tipo muro, de concreto prefabricado, acero o madera, en conexión machihembrada y columnetas cuadradas. Estas construcciones no exceden dos pisos de altura y no soportan cubiertas pesadas. No está claro si tienen un comportamiento adecuado bajo cargas sísmicas. OSSO (2017) acusa la falta de vigas de amarre en estas estructuras. Si los muros son excesivamente largos sin ningún tipo de soporte lateral probablemente sean excesivamente flexibles fuera del plano. Debido a esto se clasifican en tipologías constructivas de baja ductilidad esperada. Entre los materiales pesados el material predominante es la mampostería de arcilla no reforzada. Estas viviendas pueden tener cubierta liviana de zinc o pesadas, en teja. Las mismas son vulnerables debido a la falta de refuerzo en los muros y el número de pisos. Predominantemente tiene 2 o 3 pisos lo que las hace vulnerables ante agitaciones fuertes del terreno. Se clasifican como edificaciones de baja ductilidad y con una vulnerabilidad física alta.

En el proyecto TREQ, tres expertos locales contribuyeron proporcionando esquemas de mapeo para la clasificación de todas las estructuras encontradas en las bases de datos de la ciudad. Estos esquemas de mapeo clasifican las edificaciones encontradas en las bases de datos en las diferentes tipologías constructivas descritas anteriormente. Según su clasificación, la distribución del conjunto de la población está de acuerdo con las encuestas proporcionadas en los estudios de exposición y riesgo de investigaciones anteriores (Etapa 1 y Etapa 2). Surgen diferencias con respecto a cómo los expertos

clasifican las estructuras según su vulnerabilidad esperada. En general, sugieren que un poco más de estructuras deberían tener algún nivel de disposiciones sísmicas (porciones más grandes de edificios con códigos de taxonomía DUM y DUH) en comparación con lo que sugieren los estudios in situ (DNO o DUL).

3.5 Modelo de exposición de la ciudad

CALI: Como resultado de la clasificación se obtiene el modelo de exposición de la ciudad. Cada estructura en el modelo de exposición tiene los atributos estructurales, de ocupación y de valor de reemplazo completamente definidos. Esta información puede presentarse de diversas formas. En este reporte se presenta la distribución de la población y el valor económico de forma agregada por comunas y barrios. También proveemos estadísticas referentes al tamaño y costo promedio de las edificaciones de la ciudad, la cuál puede ser de grán ayuda en investigaciones futuras. Por último, hacemos una presentación de la exposición por zonificación sísmica, la cuál ayuda a dimensionar lo que se encuentra en riesgo en las diferentes clasificaciones del suelo de la ciudad.

El modelo de exposición de Cali tiene más de 348,000 estructuras y 2 millones de ocupantes. Estos fueron clasificados en 373 tipologías o clases constructivas. Los expertos locales clasificaron las estructuras en 6,000 clases de construcción diferentes. Este modelo también incluye activos educativos, sanitarios e institucionales de los sectores público y privado. El valor económico de reemplazo total de la ciudad se ha estimado en más de 55 mil millones de dólares, o 220 billones de pesos colombianos (COP\$). Contiene edificaciones residenciales, comerciales, industriales, los centros educativos, los centros de atención médica y de salud e institucionales. Se incluyen los sectores público y privado. El modelo contiene las zonas administrativas dentro del perímetro urbano, incluyendo las 335 unidades barriales y las 22 comunas. La distribución demográfica del modelo por región administrativa indica que las comunas con el mayor número de ocupantes son la 17, 14, 6 y 13. La distribución económica indica que son las comunas 19, 2, 17 y 3 las que concentran la mayor cantidad del valor económico expuesto de la ciudad. El siguiente mapa muestra la distribución espacial de los edificios y el valor expuesto en cada barrio de la ciudad.

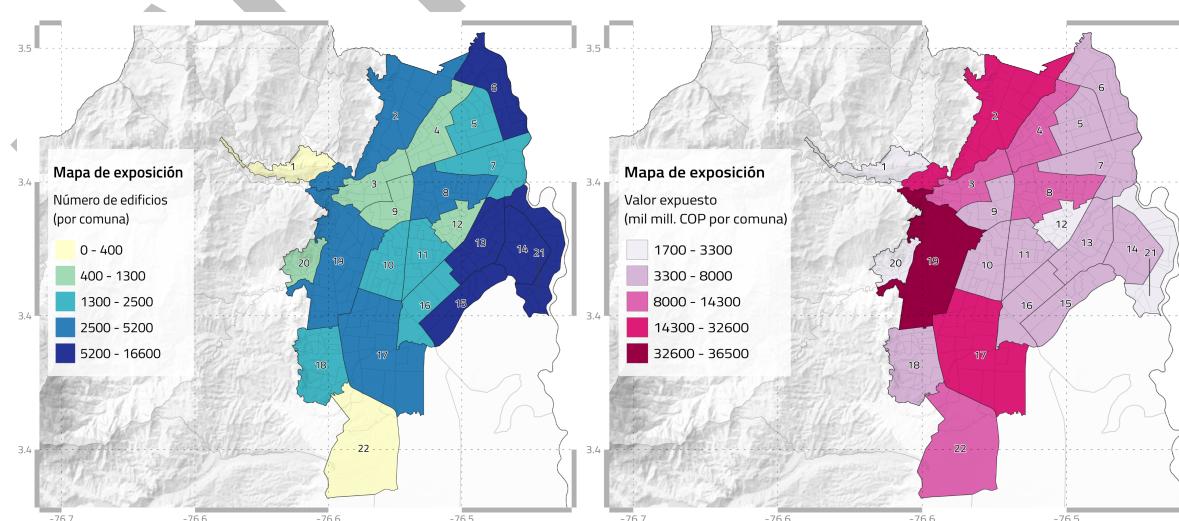


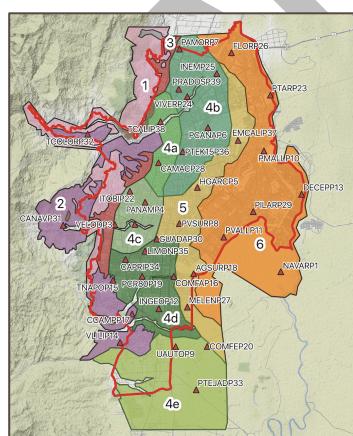
Figura 23. Distribución del número de edificaciones y el valor económico de la ciudad a nivel de comuna.

Se concluyó que en Cali los costos de construcción en activos residenciales dependen más del nivel de ingreso económico de los ocupantes que del material o tecnología de construcción. Por lo tanto, los costos promedio de reposición por metro cuadrado varían de 178 USD/m² a 694 USD/m² a través de 6 categorías diferentes de niveles socioeconómicos. Los estratos socioeconómicos medios (3, 4 y 5) concentran la mayor cantidad del valor económico de la ciudad. En la siguiente tabla se presenta el valor expuesto de la ciudad, el valor promedio de las edificaciones y su tamaño promedio estimado por estrato socioeconómico. Los valores se presentan en pesos colombianos usando una tasa de cambio de 3,800 COP/USD.

Tabla 2. Estadísticas principales de tamaño y costo de reemplazo de las edificaciones en la ciudad, por estrato socioeconómico.

Estrato	Valor expuesto (mil mill. COP)	Valor promedio (mill. COP)	Área promedio (m ²)
1	\$ 11,583	\$ 169	129
2	\$ 35,823	\$ 314	167
3	\$ 59,244	\$ 546	231
4	\$ 41,677	\$ 1,516	424
5	\$ 49,076	\$ 2,278	590
6	\$ 24,748	\$ 3,039	751
Total ciudad	\$ 222,151	\$ 637	239

La distribución de la población y el valor de reemplazo por zona sísmica (Ingeominas y Dagma , 2005) en la ciudad se presenta en la siguiente figura. Cali tiene con una concentración de habitantes significativa en las zonas 4b, 5 y 6. Estas concentran más de 245 mil edificaciones, 87 mil millones de pesos colombianos y casi un millón y medio de habitantes (el 70% de la exposición de la ciudad considerada en este estudio). La altura de las edificaciones de la ciudad en combinación con la calidad de suelo tiene una influencia significativa en el sísmico para una ciudad. A ciertas alturas constructivas la aceleración que experimentan las edificaciones debido a un sismo puede atenuarse o ampliarse debido al contenido frecuencial de la onda sísmica, la cual está condicionada a la calidad del suelo.



Zona sísmica	Edificaciones	Ocupantes	Valor expuesto
1	13,032	4%	\$ 8,000 4%
2	22,893	7%	\$ 19,603 9%
3	10,527	3%	\$ 13,748 6%
5	55,373	16%	\$ 22,209 10%
6	146,152	42%	\$ 32,637 15%
4a	16,469	5%	\$ 19,186 9%
4b	44,387	13%	\$ 33,129 15%
4c	15,035	4%	\$ 23,836 11%
4d	16,002	5%	\$ 31,518 14%
4e	2,635	1%	\$ 6,277 3%
noaf	6,205	2%	\$ 12,007 5%
Total ciudad	348,710	100%	\$ 222,151 100%

Figura 24: Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica de acuerdo con Ingeominas y Dagma (2005).

4. MODELOS DE VULNERABILIDAD

La evaluación de daños, pérdidas económicas y muertes requiere un conjunto de modelos de fragilidad y vulnerabilidad para las clases de edificios identificadas al modelar la exposición. Una función de fragilidad representa la probabilidad de superar un nivel de daño condicionado a la intensidad de la sacudida del suelo. Estos modelos se utilizan para hacer estimaciones de daños y mapas que indican la distribución espacial del daño de las edificaciones dada la ocurrencia de un evento sísmico. Por otro lado, una función de vulnerabilidad define una distribución probabilística de la tasa de pérdida (por ejemplo, la tasa de pérdida promedio y el coeficiente de variación correspondiente) condicionada a la intensidad del movimiento sísmico. La vulnerabilidad se puede utilizar para estimar pérdidas, como estadísticas y mapas de pérdidas económicas o de muertes humanas.

El uso de modelos de fragilidad y vulnerabilidad que capturan las prácticas de diseño y construcción específicas de la ciudad aún no es posible dado el número limitado de modelos disponibles. Ecuador y Colombia cuentan con estudios previos para diferentes clases de estructuras de mampostería y hormigón (e.g. García y Degrande , 2017; Acevedo et al., 2017) que podrían utilizarse para estimar el riesgo en Cali. Sin embargo, estos se enfocan en la fragilidad estructural y la vulnerabilidad y no pueden usarse para estimar las pérdidas humanas. Además, los modelos en la literatura no cubren las clases de ocupación no residencial, como edificaciones industriales. Por lo tanto, hemos utilizado la base de datos de vulnerabilidad global GEM (Martins y Silva, 2020). Los detalles de la base de datos de vulnerabilidad y los esfuerzos adicionales para desarrollar modelos locales en las ciudades se presentan en las siguientes secciones.

4.1 Base de datos de vulnerabilidad global GEM

La base de datos de vulnerabilidad global GEM es un conjunto de funciones derivadas con metodología uniforme para una amplia gama de clases de edificios. Proporciona curvas de fragilidad que permiten la estimación de daños físicos en edificios, así como un conjunto de modelos de consecuencias para la estimación de índices de pérdidas humanas y estructurales. Además, están disponibles para varios tipos de medidas de intensidad (IMT) que van desde PGA hasta aceleraciones espectrales (Sa) en períodos de vibración de 0,3 segundos, 0,6 segundos y 1 segundo. Proporcionamos como ejemplo la Figura 25, que presenta dos modelos de fragilidad. En el panel superior, para mampostería reforzada (MR) y pórticos de concreto reforzado llenos de mampostería (CR/LFINF), para estructuras de dos plantas (HEX:2), que se han asignado a las edificaciones de la ciudad que pertenecen a estas tipologías constructivas. Las funciones de fragilidad se convirtieron en funciones de vulnerabilidad utilizando el modelo de daño a pérdida propuesto por Yepes-Estrada y Silva (2017) para pérdidas económicas por daño directo. La parte inferior de la misma figura proporciona los modelos de vulnerabilidad resultantes para las mismas dos clases. En estos modelos, los índices de pérdida siguen una distribución beta, lo que permite la propagación de la incertidumbre del componente de vulnerabilidad a la evaluación del riesgo. Para la derivación de las funciones de vulnerabilidad en términos de pérdida de vidas, primero se estimó la probabilidad de colapso dado un daño completo (a partir de la evidencia de sismos pasados, así como las recomendaciones de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos - FEMA, 2007. Para estimar las fatalidades se adoptaron las proporciones propuestas

por Spence (2007). El lector puede encontrar todos los modelos de fragilidad y vulnerabilidad utilizados para TREQ en el entregable “D.2.3.3 Base de datos de funciones de fragilidad y vulnerabilidad”.

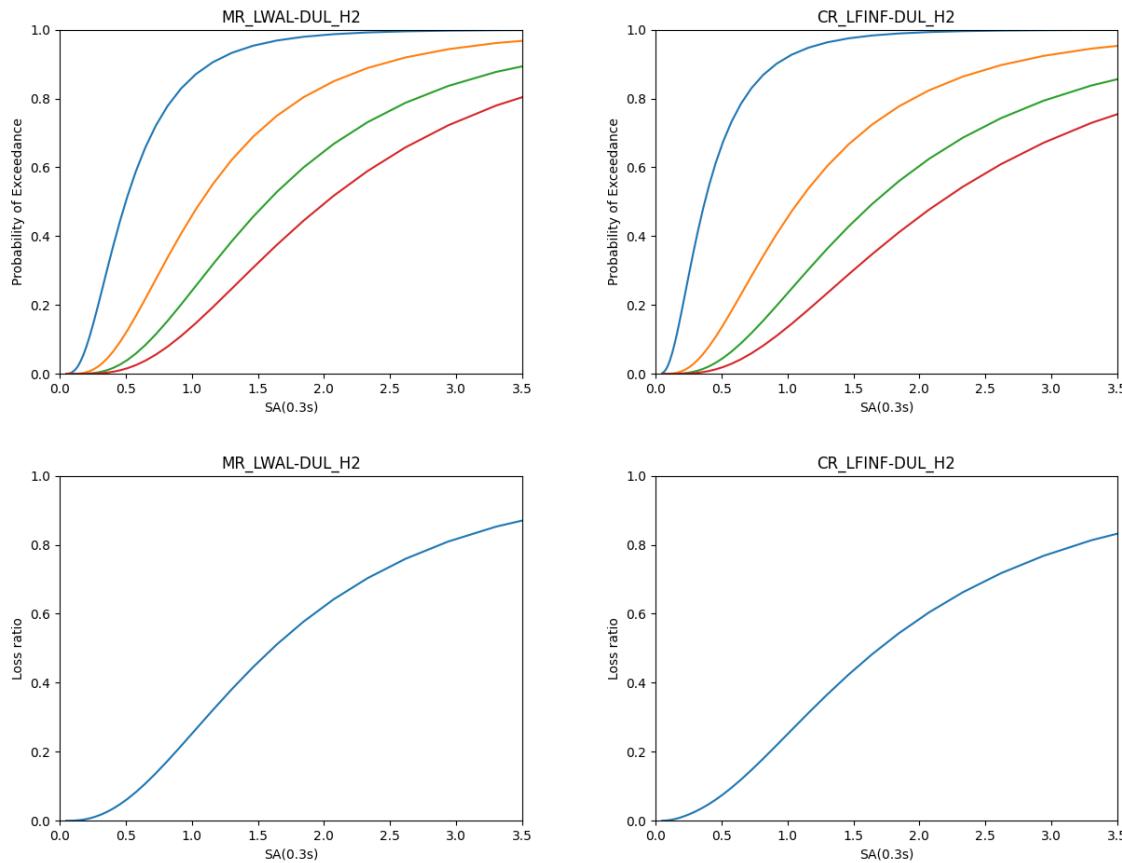


Figura 25. (Arriba) Modelos de fragilidad utilizados para la estimación de daños en edificios para mampostería reforzada (MR) y pórticos de hormigón armado (CR) de baja ductilidad esperada (DUL) y altura de dos pisos (HEX:2). (Abajo) Modelos de vulnerabilidad estructural utilizados para la estimación de pérdidas económicas para las mismas clases de edificios.

Los modelos de fragilidad se desarrollaron teniendo en cuenta la variabilidad entre registros sísmicos, la incertidumbre en el criterio de daño y la variabilidad entre edificios utilizando una metodología analítica para la definición de la capacidad estructural de cada tipología constructiva. En este proceso, se define una curva de capacidad basada en las propiedades estructurales y dinámicas de cada clase de edificio (deriva de fluencia y última, período elástico y de fluencia del primer modo de vibración, factor de participación del primer modo de vibración y mecanismos de falla comunes). Estas curvas de capacidad se utilizaron para desarrollar un oscilador de un solo grado de libertad (SDOF) para cada clase de edificio, y cada oscilador SDOF se sometió a un análisis no lineal utilizando 300 registros de movimiento del suelo. Para propagar la variabilidad entre registros de movimiento sísmico en los modelos de vulnerabilidad, se utilizó un gran conjunto de registros. La respuesta estructural de los osciladores (usamos el desplazamiento máximo como parámetro de demanda o EDP), se trazó contra el nivel de intensidad de cada registro para establecer una relación entre la demanda y la respuesta, siguiendo el enfoque de análisis de Jalayer et al. (2015), luego se calculó la probabilidad de exceder un conjunto de estados de daño (lleva, moderado, extenso y completo) asumiendo un criterio de daño basado en los puntos de fluencia y desplazamiento último, como se describe en Villar-Vega et al.

(2017). El rango de intensidad y la probabilidad de exceder los estados de daño se usaron para ajustar una distribución log-normal acumulativa para obtener la curva de fragilidad (Baker, 2015).

Dentro del grupo de curvas de fragilidad y vulnerabilidad de GEM se encuentran las clases de construcción predominantes de mampostería reforzada, mampostería semi-confinada, mampostería sin refuerzo y de concreto reforzado identificadas en el modelo de exposición para la ciudad. Por ejemplo, estructuras de pórticos de concreto reforzado con paredes de mampostería (CR+CIP/LFINF) y mampostería (MR) de baja ductilidad (CDL) que van desde de dos a cuatro pisos (HEX:2 a HEX:4), requieren modelos de fragilidad derivados para períodos de aceleración espectral cortos (periodos de vibración entre 0.1 y 0.3 segundos). Estos mismos se encuentran dentro de las curvas disponibles en la base de datos de GEM.

Para Cali se utilizaron más de 200 modelos de fragilidad y vulnerabilidad sísmica. Con estos modelos es posible hacer estimaciones de daño estructural en las edificaciones, y la afectación de sus ocupantes, incluyendo desplazados, heridos y fatalidades, para cualquier evento sísmico cuya intensidad es conocida (eventos con registros de intensidad) o cuya intensidad es simulada (usando los modelos de movimiento del terreno del modelo de amenaza de la ciudad).

5. RIESGO SÍSMICO

Con todos los componentes descritos anteriormente es posible hacer una estimación del riesgo sísmico para la ciudad. Es decir, una estimación del daño y las pérdidas económicas y humanas debido al impacto de uno o más eventos sísmicos con potencial destructivo. El modelo de amenaza sísmica de la ciudad caracteriza las fuentes de sismicidad y la frecuencia y magnitud con la que pueden generar sismos destructivos en la región (Sección **Error! Reference source not found.**). Los modelos de movimiento del terreno en combinación con las funciones de amplificación para la ciudad (Sección **Error! Reference source not found.** y Sección 2.2) hacen posible realizar estimaciones de la intensidad con la que podemos sentir dichos eventos en la superficie. El modelo de exposición contiene una descripción completa de las edificaciones expuestas al fenómeno sísmico, incluyendo su ubicación, ocupantes, zona sísmica, clasificación estructural y valor de reemplazo (Sección 3.5). Como cada edificación tiene una clasificación estructural, se le ha asignado un modelo de fragilidad y vulnerabilidad sísmica, con los cuales se puede estimar el nivel de daño y pérdida para cualquier nivel de intensidad sísmica (Sección 4.1). En esta sección, presentamos los dos tipos de métodos que usamos para evaluar riesgo sísmico en la ciudad: el determinista y el probabilista. Con el método determinista, estimamos el riesgo en la ciudad usando un grupo selecto de escenarios sísmicos, cuya ubicación, magnitud, tipo de ruptura y profundidad son previamente definidas. El riesgo estimado para los escenarios provee métricas del impacto total en la ciudad en términos de estructuras colapsadas, desplazados, heridos y fatalidades. Por consiguiente, tiene la intención de apoyar acciones de preparación ante desastres probables. Con el método probabilístico, estimamos el riesgo en la ciudad usando un catálogo representativo de la sismicidad futura de la ciudad, el cual contiene cientos de miles de escenarios. Al analizar el riesgo anualizado durante todo el periodo de sismicidad, el riesgo resultante es independiente de un solo evento. Por lo tanto, puede usarse para apoyar la gestión del riesgo y políticas de mitigación a largo plazo. Para ambos métodos, presentamos la metodología de forma detallada y los resultados obtenidos en esta sección. Los resultados se presentan en forma de perfiles informativos con la información clave para comprender los factores que influyen en el riesgo sísmico a escala urbana. Estos perfiles se encuentran disponibles al final de esta sección.

5.1 Riesgo determinista: escenarios de riesgo para la ciudad

Los escenarios sísmicos generan un entendimiento común de las consecuencias que un terremoto puede causar en una región. Al calcular el riesgo por escenarios se pueden visualizar las áreas más afectadas dentro de la ciudad, el número y la distribución espacial de los edificios colapsados y dañados, las víctimas y las pérdidas económicas ante un evento sísmico. De esta forma, los escenarios permiten identificar debilidades y fortalezas en el sistema de gestión, evaluar las medidas necesarias para reducir el riesgo y mejorar la preparación y recuperación ante eventos futuros.

Las consecuencias de eventos sísmicos pueden cambiar significativamente según las características de ruptura del terremoto, como la magnitud, la profundidad hipocentral y su distancia en referencia a la población expuesta. Como parte de TREQ, realizamos una selección de rupturas sísmicas considerando dos enfoques:

- i) Identificación de eventos históricos relevantes cuya magnitud, tipo de falla y geometría de ruptura son conocidos y de gran peligro para la ciudad.
- ii) Identificando la combinación de distancia, magnitud y fuentes sismogénicas que más contribuyen a la amenaza sísmica en la ciudad, también conocido como proceso de desagregación sísmica.

La selección de escenarios se hizo en conjunto entre GEM, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la Secretaría de Gestión del Riesgo de Emergencias y Desastres de la Alcaldía de Cali. La selección incluye escenarios históricos de interés para la Secretaría y escenarios posibles identificados a través del proceso de desagregación que son relevantes para la preparación ante desastres probables. Este documento proporciona un resumen de la metodología y los eventos seleccionados para la ciudad. El entregable "D2.4.1 Base de rupturas seleccionadas para el análisis de escenarios" incluye el detalle de cada escenario sísmico y los parámetros de ruptura de cada evento sísmico. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) proporcionó adicionalmente la información detallada sobre la intensidad sísmica de los eventos históricos así como para las simulaciones de los eventos hipotéticos.

Lista de escenarios sísmicos

Cali tiene una larga historia de terremotos destructivos. Varios eventos en el pasado han causado daños significativos en la ciudad. El trabajo de selección de escenarios se enfocó en emplear escenarios históricos con información disponible sobre su intensidad, y al mismo tiempo obtener mediante el proceso de desagregación eventos con potencial destructivo. Como resultado, para la Cali modelamos 8 escenarios históricos para los cuales el USGS tiene simulaciones de la intensidad. Por año, estos eventos son el terremoto de 1906, 1925, 1957, 1991, 1994, 1995, 1999 y 2004. Modelamos también cinco escenarios identificados por el USGS mediante el proceso de desagregación de la amenaza. Los resultados de este proceso sugieren que las fuentes de sismicidad cortical superficial cerca de la ciudad, en las fallas de Dagua Calima, Saliente de Buga y la Cucuana Dextral pueden producir eventos superficiales de magnitudes Mw 6.5, con potencial destructivo para la ciudad. La amenaza también tiene un aporte considerable de eventos de gran magnitud ocurriendo en la zona de subducción en el Océano Pacífico. Por consiguiente, modelamos 4 eventos de Mw 6.5 a 8 km de profundidad, ocurriendo en las cercanías de la ciudad. Uno con origen en Dagua Calima, uno en Cucuana Dextral, y dos en diferentes puntos de la falla de Saliente de Buga. También modelamos un evento de Mw 8.8 a 10km de profundidad, en la zona de subducción. Cada uno tiene características altamente adversas para la ciudad, pero plausibles. La siguiente tabla enumera los escenarios y las características principales de las rupturas modeladas.

Tabla 3. Lista de rupturas sísmicas y sus características utilizadas para estimar el riesgo determinista en Cali. Toda la información referente a la ruptura puede encontrarse en el reporte anexo "D2.4.1 Base de rupturas seleccionadas para el análisis de escenarios".

Evento	Descripción	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)
1	Evento Mw 8.8 en el pacífico - Plaza de Nazca	8.8	22
2	Evento de Mw 6.5 al este - Saliente de Buga	6.5	10
3	Evento de Mw 6.5 al noreste de la ciudad - Saliente de Buga	6.5	10
4	Evento de Mw 6.5 - Cucuana dextral	6.5	10
5	Evento de Mw 6.5 - Dagua Calima	6.5	10
6	Terremoto de 1957	6.1	52
7	Terremoto de 1925	6.3	15
8	Terremoto de 1906	8.8	20
9	Terremoto de 1991	7.2	21
10	Terremoto de 1994	6.8	12
11	Terremoto de 1995	6.4	73
12	Terremoto de 1999	6.1	52
13	Terremoto de 2004	7.2	15

Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos

Las rupturas sísmicas fueron modeladas usando la calculadora de escenarios del software de OpenQuake desarrollado por la Fundación GEM (Silva et al., 2014). Específicamente, para los escenarios seleccionados usamos estimaciones de cómo se puede sentir la agitación sísmica en la superficie con la herramienta de Shakemap desarrollada por el USGS (Wald et al., 1999, Silva and Horspool, 2019). En este proceso, al tener las características de cada ruptura, se genera una serie de puntos en la superficie, donde se encuentran los edificios expuestos de la ciudad. Para cada uno de estos sitios se estima la intensidad de agitación máxima del evento usando los modelos de movimiento del terreno presentes en el modelo de amenaza, como si el evento ocurriera en el lecho rocoso. Posteriormente, la intensidad de cada punto se amplifica utilizando las funciones de amplificación de la ciudad, de acuerdo con la zona sísmica, tomando en cuenta así la calidad del suelo local. Como es bien sabido que el cálculo de la intensidad tiene una incertidumbre asociada (es decir, la misma ruptura puede sentirse de diversas formas en la superficie, llamada variabilidad entre eventos), repetimos este proceso 2,000 veces para tomar en cuenta dicha incertidumbre de forma explícita en el análisis de riesgo. Para el caso de los escenarios históricos, si existen registros de cómo se sintió el evento en la superficie, en cada simulación, cerca de estos puntos la incertidumbre se reduce para representar la intensidad registrada. Para cada simulación resultante del evento, hacemos una estimación del impacto en la ciudad. Por consiguiente, obtenemos 2,000 posibles consecuencias para la ciudad, las cuales analizamos para entender cuáles son las más probables (las estimaciones cerca del promedio de todas las simulaciones), las más favorables (las estimaciones cerca del mínimo impacto obtenido) y las más adversas (las estimaciones cerca del máximo impacto obtenido). En este reporte utilizamos histogramas para presentar todos los resultados de un escenario en una sola figura para cada métrica de riesgo obtenida.

En cada escenario, estimamos el estado de daño final de los edificios para cada una de las simulaciones. Utilizando el daño y los modelos de consecuencias, también calculamos diferentes métricas de riesgo con la intención de dimensionar el impacto total en la ciudad y proveer información útil en diferentes

aspectos de la respuesta ante un desastre. A continuación describimos las suposiciones más importantes en la estimación del impacto en la ciudad:

1. **Evento nocturno:** al modelar la ruptura, asumimos que el evento ocurre en horario nocturno. En este horario, consideramos que el 95% de los ocupantes están dentro de las edificaciones. Esto resulta en el número más elevado de *heridos de gravedad* y *fatalidades* para el evento. En caso de que el evento ocurriera en horario diurno, estas dos métricas serían significativamente más bajas.
2. **Consecuencias directas:** el análisis que realizamos solo captura las consecuencias directas producidas por la agitación del terreno. Las consecuencias debido a fenómenos secundarios que pueden ocurrir durante un evento sísmico, como el deslizamiento de taludes o licuefacción de los suelos, no están incluidas en este análisis. Las pérdidas económicas indirectas, como las pérdidas económicas a causa de la clausura de comercios, manufacturas, servicios educativos y de salud tampoco están incluidas.
3. **Colapsos:** es el número de estructuras que colapsan como consecuencia de la agitación del terreno simulada de acuerdo con los modelos de fragilidad. En los resultados presentamos también el índice de colapsos. A nivel de ciudad, el índice representa el porcentaje de todos los edificios expuestos en la ciudad que colapsaron debido al evento. A nivel de comuna, el índice representa el porcentaje de edificios expuestos en la comuna que colapsaron debido al evento.
4. **Desplazados:** es el número de ocupantes cuya residencia resultó en estado de daño extenso o completo debido a la agitación del terreno. En ambos estados de daño, se asume que la residencia no es habitable temporal o permanentemente. Por consiguiente, por decisión propia o bajo indicaciones de un ingeniero los ocupantes requieren de un refugio temporal durante la respuesta ante la emergencia.
5. **Heridos de gravedad:** es el número de ocupantes heridos debido al desprendimiento de componentes estructurales y no estructurales que resultan del daño en las edificaciones. Incluye solo las personas que requieren de atención médica urgente debido a heridas de gravedad que ponen en peligro la vida humana.
6. **Fatalidades:** es el número de ocupantes que perdieron la vida debido al desprendimiento de los componentes estructurales y no estructurales que resultan del daño en las edificaciones.
7. **Pérdidas económicas:** es el costo de reparar los elementos estructurales y no estructurales para todos los niveles de daño directo causado por el evento. Las pérdidas consideran que las estructuras deben repararse o reconstruirse siguiendo los lineamientos vigentes de sismo resistencia. Por ejemplo, si una estructura de mampostería sin refuerzo colapsa, el costo de reemplazarla considera que debe ser de mampostería reforzada.

Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias

Los resultados para cada escenario se presentan en una serie de perfiles de riesgo de preparación y respuesta ante emergencias. Estos perfiles han sido trabajados en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria. El perfil de preparación y respuesta tiene cuatro elementos principales:

Panel superior: proporciona a la izquierda la información general sobre el evento sísmico (como nombre, ubicación y magnitud), y a la derecha un resumen sobre el total de habitantes expuestos, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico expuesto de la ciudad.



Figura 26. Ejemplo del panel superior del perfil, con las características principales de la ruptura del evento sísmico, el número de estructuras, los ocupantes y el valor económico expuesto de la ciudad.

Mapa de colapsos: un mapa que muestra el índice de colapsos en las comunas, donde los colores más rojos indican las comunas más vulnerables. Esta vulnerabilidad considera la fragilidad física de las estructuras, las características del suelo y las características de la ruptura modelada.

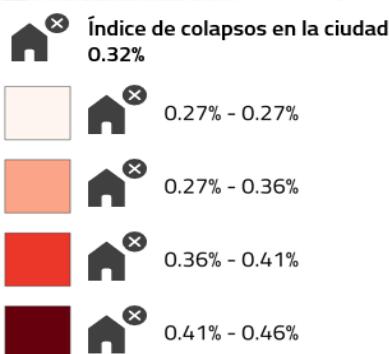
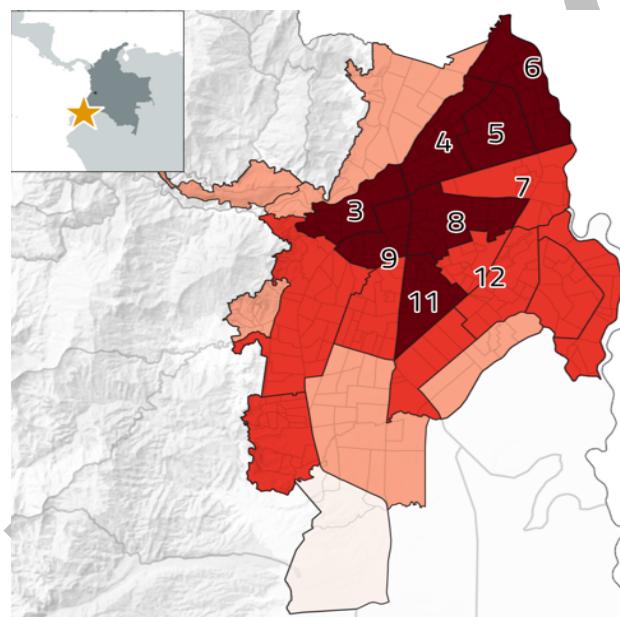


Figura 27. Ejemplo del mapa con la distribución del daño debido al evento, resaltando las comunidades más vulnerables, considerando la fragilidad física de sus estructuras, las características del suelo local y las características de la ruptura modelada.

Tabla de comunidades en alto riesgo: Presenta una tabla con las comunas más impactadas por el evento, de acuerdo con el índice de daño promedio obtenido de todas las simulaciones del evento. Esta tabla destaca las otras métricas de riesgo obtenidas: el promedio de fatalidades, el promedio de heridos de gravedad, el promedio de desplazados y el promedio de pérdidas económicas.

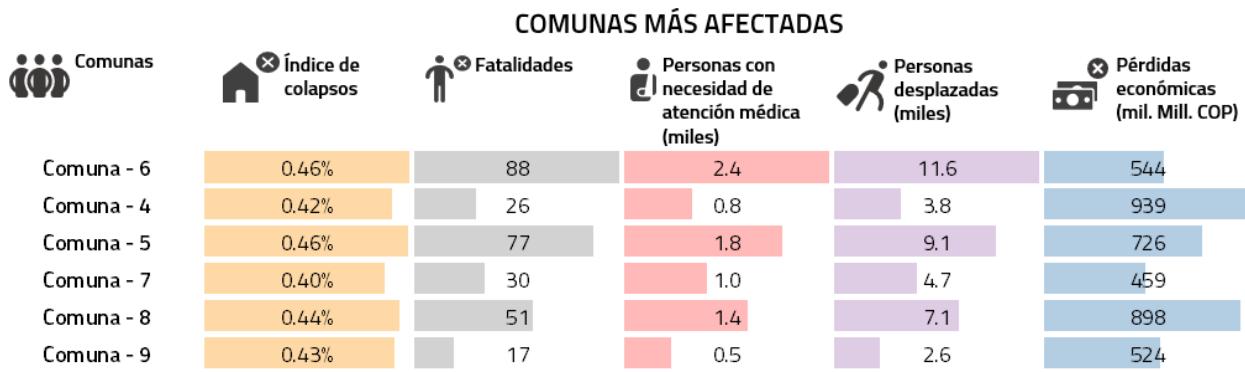


Figura 28. Ejemplo de la tabla de comunidades en alto riesgo ante el evento sísmico, mostrando el promedio del resto de métricas de riesgo obtenidos para cada una.

Panel inferior: Proporciona información sobre el impacto total del evento sísmico en la ciudad. El impacto total no debe interpretarse como un resultado único (absoluto), sino como un valor esperado de un rango de posibilidades. Todas las posibilidades están representadas por histogramas. Debido a que realizamos miles de simulaciones, obtenemos miles de resultados de impacto. Los “más favorables” (en los cuales la agitación del terreno es mucho menor de lo esperado para un evento de la magnitud modelada), quedan en el lado izquierdo del histograma. Las “más adversas” (en los cuales la agitación es mucho más severa de lo esperado para dicha magnitud), quedan del lado derecho del histograma. El promedio del histograma presenta los resultados más probables.

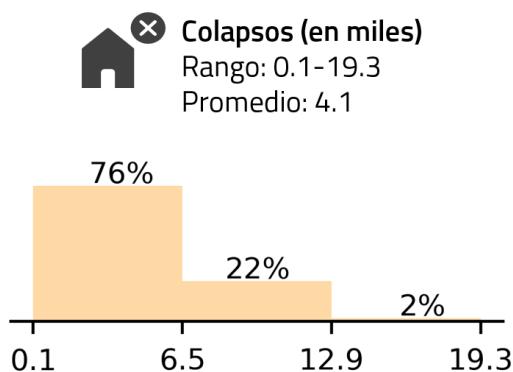


Figura 29. Ejemplo de un histograma de colapsos en la ciudad debido al evento, mostrando el rango de resultados obtenidos para todas las simulaciones. En este ejemplo, el 76% de las simulaciones resultaron en menos de 6,500 colapsos. Menos del 2% resulta en más de 12,900 colapsos. El promedio indica 4,100 colapsos como el resultado más probable.

Limitaciones de los perfiles de riesgo

Los perfiles tienen la intención de dimensionar el impacto de un evento sísmico en la ciudad e informar políticas de preparación, mitigación y respuesta de desastres. Estos presentan el riesgo en la ciudad basándose en una caracterización de las estructuras existentes y sus condiciones físicas actuales. Los resultados obtenidos no deben interpretarse como normativa de construcción, planificación urbana o de uso del suelo. No reemplazan la zonificación sísmica o las especificaciones del código sísmico nacional, ni el plan de ordenamiento territorial vigente de la ciudad.

CALI - COLOMBIA

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.5 – 10KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: DAGUA CALIMA



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



Edificios
Industriales
5.3 mil

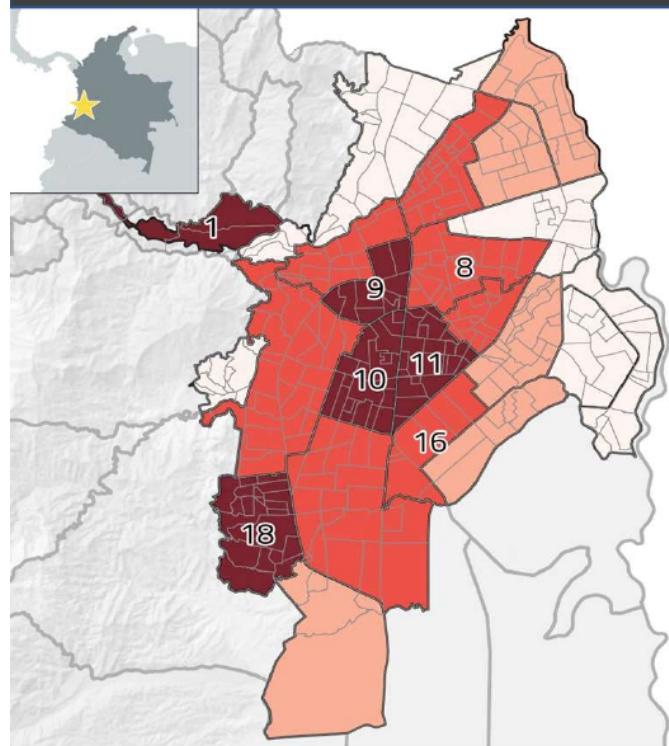


Edificios
Institucionales
8 mil



Capital
expuesto
\$220 (bill. COP)

POPULACIÓN Y EDIFICIOS EXPUESTOS



Índice de colapsos en la ciudad
0.52%

0.39% - 0.44%

0.44% - 0.51%

0.51% - 0.57%

0.57% - 0.74%

Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad (miles)

Desplazados (miles)

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

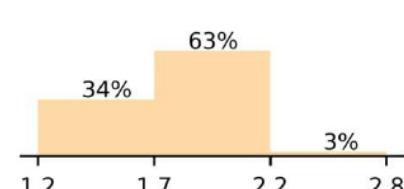
Comuna - 1	0.74%	40	1.3	6.0	270
Comuna - 10	0.65%	82	2.3	11.1	1070
Comuna - 9	0.64%	26	0.8	3.8	714
Comuna - 11	0.63%	72	2.1	10.2	681
Comuna - 18	0.61%	71	2.2	10.5	771
Comuna - 16	0.57%	64	1.9	9.3	561
Comuna - 8	0.57%	64	1.8	9.1	1135
Comuna - 17	0.56%	115	3.0	15.1	3641
Comuna - 4	0.55%	34	1.0	4.9	1173
Comuna - 19	0.55%	67	1.7	8.5	3615
Comuna - 12	0.54%	41	1.2	6.1	373
Comuna - 3	0.53%	18	0.5	2.7	1336
Comuna - 5	0.51%	79	1.9	9.8	811
Comuna - 6	0.50%	93	2.5	12.8	605
Comuna - 15	0.49%	62	2.1	10.6	489

COMUNAS EN MAYOR RIESGO

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

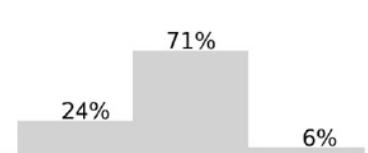
Colapsos (en miles)

Rango: 1.2 - 2.8
Promedio: 1.8



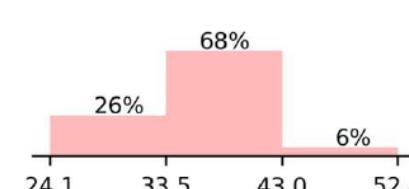
Fatalidades (en miles)

Rango: 0.8 - 1.8
Promedio: 1.2



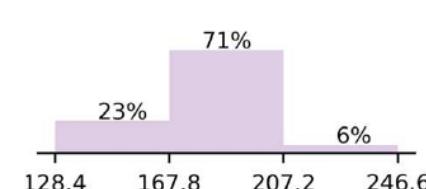
Heridos de gravedad (en miles)

Rango: 24.1 - 52.4
Promedio: 36.3



Desplazados (en miles)

Rango: 128.4 - 246.6
Promedio: 181.0



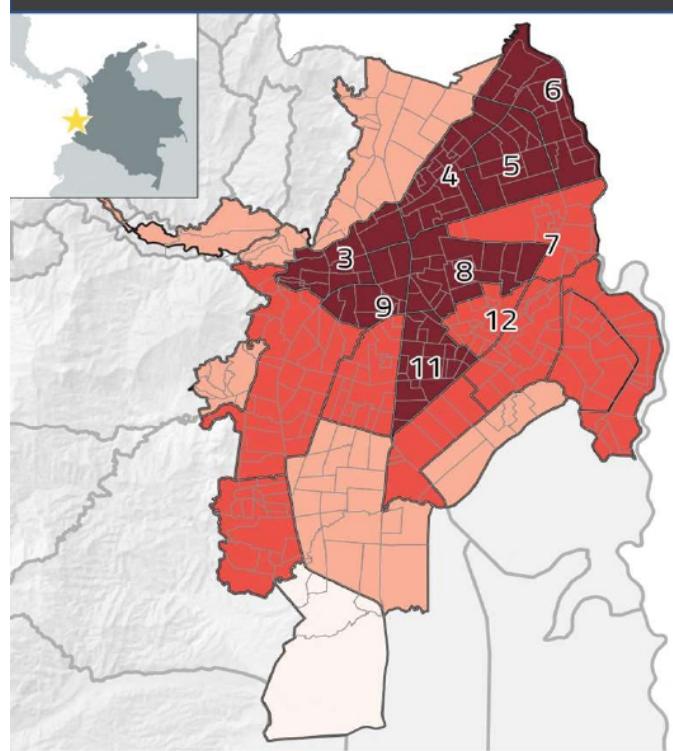
El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.



Población
2.3 millonesEdificios
Residenciales
312 milEdificios
Comerciales
22 milEdificios
Industriales
5.3 milEdificios
Institucionales
8 milCapital
expuesto
\$220 (bill. COP)

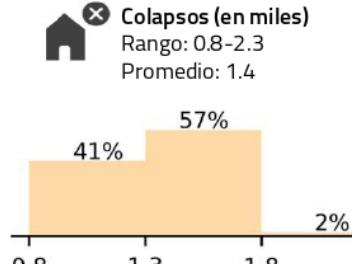
Índice de colapsos en la ciudad
0.39%

0.27% - 0.27%

0.27% - 0.36%

0.36% - 0.41%

0.41% - 0.46%



Comunas

Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad (miles)	Desplazados (miles)	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 6	0.46%	88	2.4	11.6	544
Comuna - 5	0.46%	77	1.8	9.1	726
Comuna - 3	0.44%	17	0.5	2.4	1295
Comuna - 8	0.44%	51	1.4	7.1	898
Comuna - 11	0.43%	50	1.5	7.2	492
Comuna - 9	0.43%	17	0.5	2.6	524
Comuna - 4	0.42%	26	0.8	3.8	939
Comuna - 12	0.41%	31	0.9	4.6	287
Comuna - 7	0.40%	30	1.0	4.7	459
Comuna - 10	0.39%	51	1.4	7.0	711
Comuna - 16	0.39%	45	1.3	6.4	404
Comuna - 13	0.39%	59	1.9	9.3	530
Comuna - 19	0.38%	53	1.3	6.8	3141
Comuna - 14	0.38%	57	2.0	9.8	376
Comuna - 21	0.38%	51	1.7	8.2	239

COMUNAS EN MAYOR RIESGO

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad (miles)

Desplazados (miles)

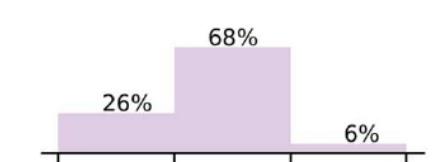
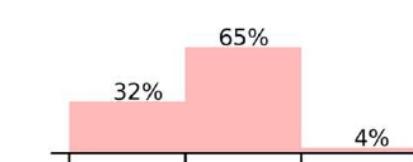
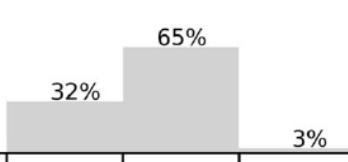
Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

Fatalidades (en miles)
Rango: 0.6 - 1.5
Promedio: 1.0

Heridos de gravedad (en miles)
Rango: 16.4 - 44.8
Promedio: 27.9

Desplazados (en miles)
Rango: 91.1 - 200.9
Promedio: 138.8

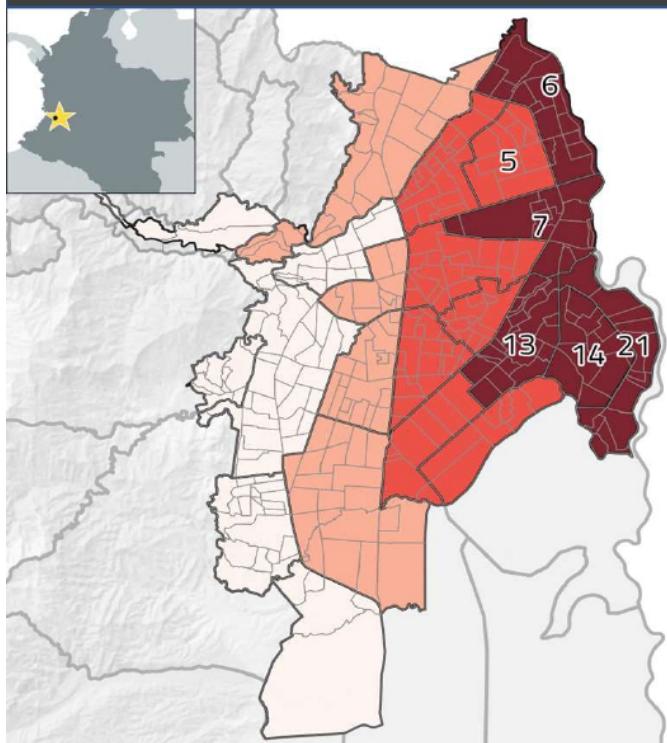


El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.

Población
2.3 millonesEdificios
Residenciales
312 milEdificios
Comerciales
22 milEdificios
Industriales
5.3 milEdificios
Institucionales
8 milCapital
expuesto
\$220 (bill. COP)

Índice de colapsos en la ciudad
0.21%

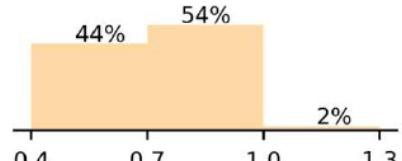
0.03% - 0.09%

0.09% - 0.18%

0.18% - 0.26%

0.26% - 0.33%

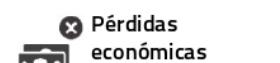
Colapsos (en miles)
Rango: 0.4 – 1.3
Promedio: 0.7



Comunas

Índice de
colapsos

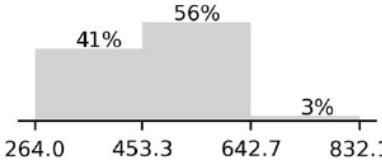
Fatalidades

Heridos de
gravedad
(miles)Desplazados
(miles)Pérdidas
económicas
(miles de mill. COP)

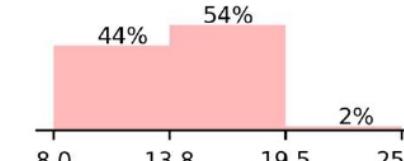
Comuna - 21	0.33%	45	1.5	7.7	232
Comuna - 14	0.32%	47	1.7	8.7	349
Comuna - 6	0.31%	56	1.5	8.3	428
Comuna - 7	0.29%	21	0.7	3.6	367
Comuna - 13	0.27%	41	1.3	7.1	432
Comuna - 5	0.26%	39	0.9	5.3	485
Comuna - 15	0.24%	29	1.0	5.4	285
Comuna - 11	0.24%	27	0.8	4.3	334
Comuna - 12	0.23%	17	0.5	2.9	205
Comuna - 8	0.23%	26	0.7	4.1	590
Comuna - 16	0.22%	25	0.7	4.0	279
Comuna - 4	0.21%	13	0.4	2.1	595
Comuna - 10	0.18%	22	0.6	3.4	416
Comuna - 9	0.16%	6	0.2	1.1	262
Comuna - 17	0.13%	25	0.7	3.9	1158

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

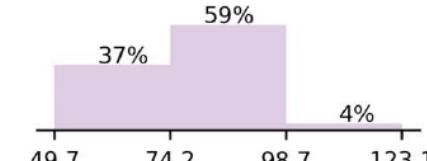
Fatalidades
Rango: 264.0 – 832.1
Promedio: 474.7



Heridos de gravedad (en miles)
Rango: 8.0 – 25.3
Promedio: 14.3



Desplazados (en miles)
Rango: 49.7 – 123.1
Promedio: 78.2



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.

CALI - COLOMBIA

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.5 – 10KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: CUCUANA DEXTRAL



POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



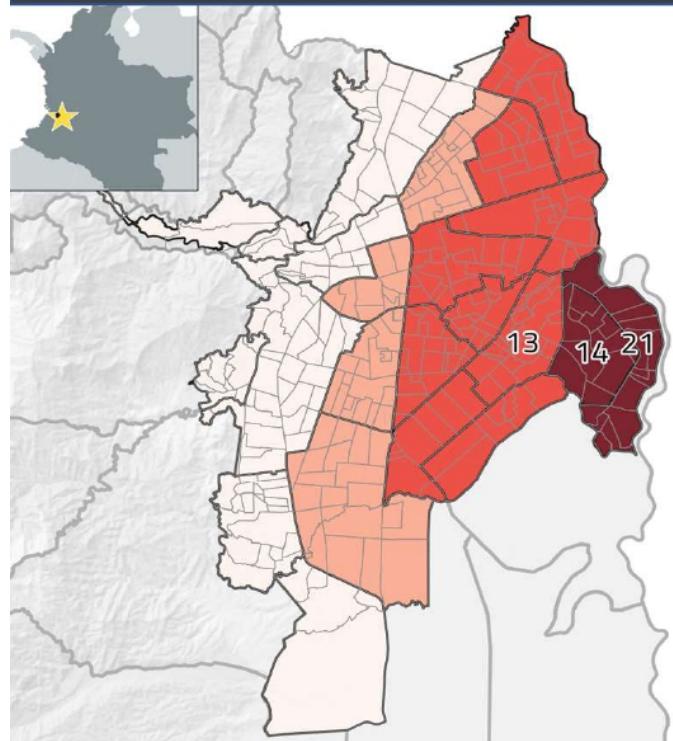
Edificios
Industriales
5.3 mil



Edificios
Institucionales
8 mil



Capital
expuesto
\$220 (bill. COP)



Índice de colapsos en la ciudad
0.18%

0.03% - 0.1%

0.1% - 0.16%

0.16% - 0.24%

0.24% - 0.29%

Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad (miles)

Desplazados (miles)

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

Comuna - 21	0.29%	38	1.3	6.7	207
Comuna - 14	0.27%	40	1.4	7.6	312
Comuna - 13	0.24%	35	1.1	6.2	389
Comuna - 15	0.23%	28	1.0	5.2	276
Comuna - 7	0.22%	16	0.5	2.8	297
Comuna - 16	0.21%	24	0.7	3.9	272
Comuna - 11	0.21%	24	0.7	3.9	307
Comuna - 6	0.21%	37	1.0	5.7	322
Comuna - 12	0.20%	15	0.4	2.5	182
Comuna - 5	0.18%	27	0.7	3.8	379
Comuna - 8	0.18%	21	0.6	3.3	498
Comuna - 10	0.16%	20	0.6	3.2	392
Comuna - 4	0.15%	9	0.3	1.6	470
Comuna - 17	0.14%	27	0.7	4.2	1231
Comuna - 9	0.13%	5	0.2	1.0	229

COMUNAS EN MAYOR RIESGO

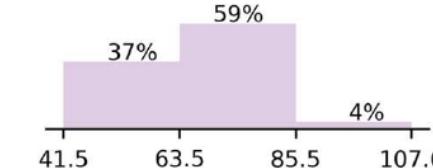
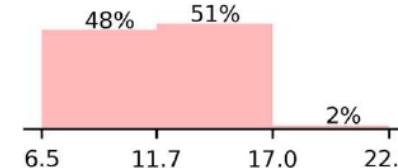
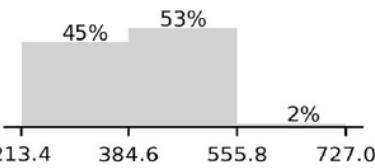
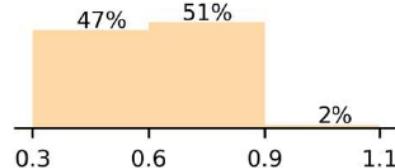
IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

Fatalidades
Rango: 213.4 – 727.0
Promedio: 396.3

Heridos de gravedad (en miles)
Rango: 6.5 – 22.2
Promedio: 12.0

Desplazados (en miles)
Rango: 41.5 – 107.6
Promedio: 67.0

Colapsos (en miles)
Rango: 0.3 – 1.1
Promedio: 0.6



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk



CALI - COLOMBIA

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.5 – 10KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: SALIENTE BUGA NORESTE



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



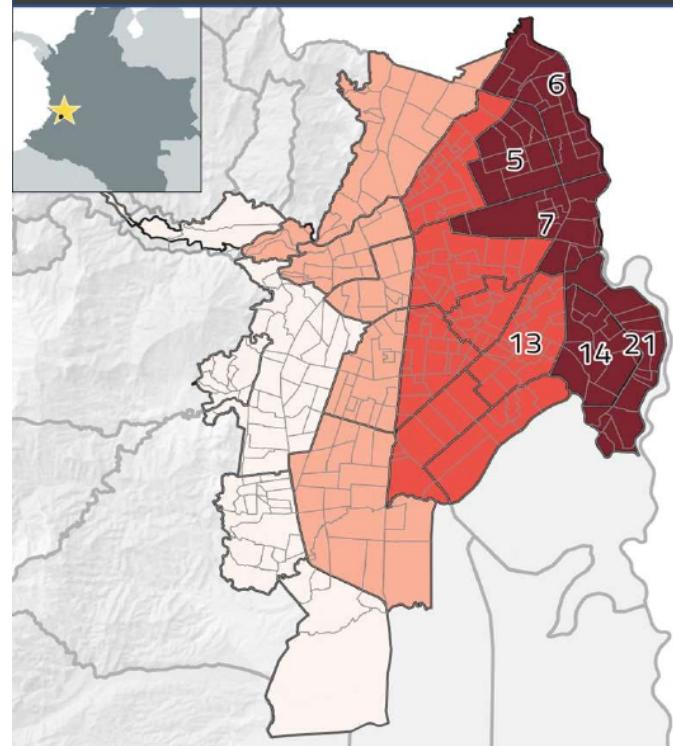
Edificios
Industriales
5.3 mil



Edificios
Institucionales
8 mil



Capital
expuesto
\$220 (bill. COP)



Índice de colapsos en la ciudad
0.14%



0.02% - 0.04%



0.04% - 0.11%

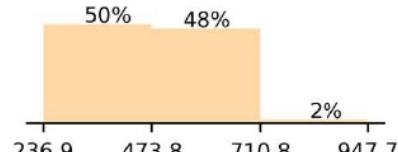


0.11% - 0.18%



0.18% - 0.25%

Colapsos
Rango: 236.9 - 947.7
Promedio: 479.4



Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad (miles)

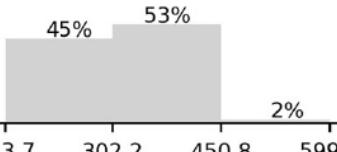
Desplazados (miles)

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

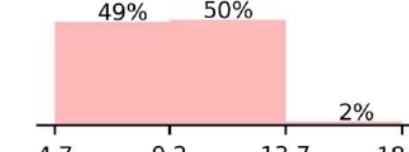
Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad (miles)	Desplazados (miles)	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 6	0.25%	44	1.2	6.7	361
Comuna - 21	0.21%	28	0.9	5.1	167
Comuna - 14	0.20%	30	1.1	5.8	252
Comuna - 7	0.20%	15	0.5	2.6	283
Comuna - 5	0.19%	29	0.7	4.0	389
Comuna - 13	0.18%	27	0.9	4.8	318
Comuna - 4	0.16%	10	0.3	1.6	478
Comuna - 8	0.15%	17	0.5	2.9	447
Comuna - 12	0.15%	11	0.3	2.0	151
Comuna - 11	0.15%	17	0.5	2.9	243
Comuna - 15	0.14%	17	0.6	3.5	198
Comuna - 16	0.14%	15	0.4	2.6	195
Comuna - 10	0.11%	13	0.4	2.3	303
Comuna - 9	0.11%	4	0.1	0.8	196
Comuna - 2	0.09%	11	0.3	1.8	583

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

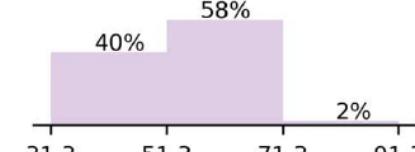
Fatalidades
Rango: 153.7 – 599.3
Promedio: 313.3



Heridos de gravedad (en miles)
Rango: 4.7 – 18.2
Promedio: 9.4



Desplazados (en miles)
Rango: 31.3 – 91.3
Promedio: 53.7

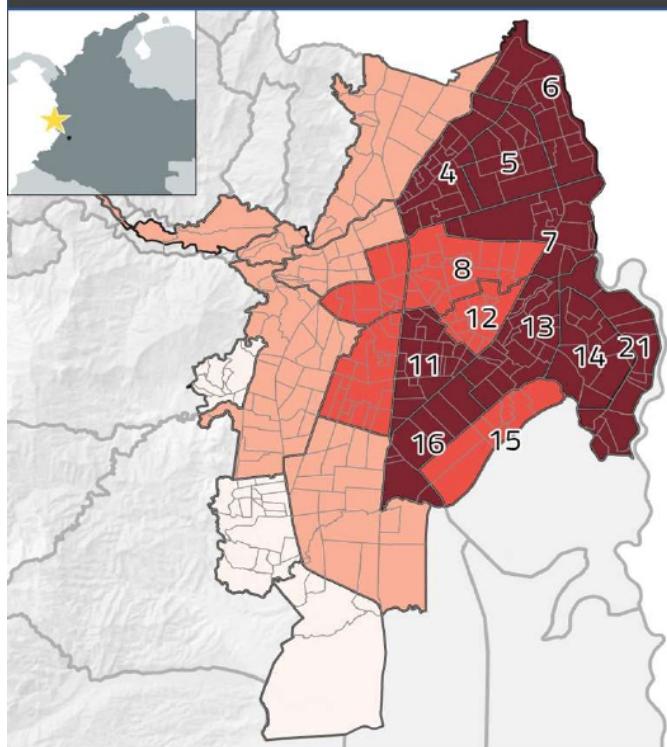


El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.

Población
2.3 millonesEdificios
Residenciales
312 milEdificios
Comerciales
22 milEdificios
Industriales
5.3 milEdificios
Institucionales
8 milCapital
expuesto
\$220 (bill. COP)

Índice de colapsos en la ciudad
0.023%



0.005% - 0.009%



0.009% - 0.015%

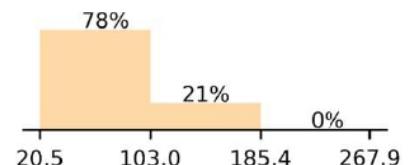


0.015% - 0.026%



0.026% - 0.035%

Colapsos
Rango: 20.5 – 267.9
Promedio: 80.8



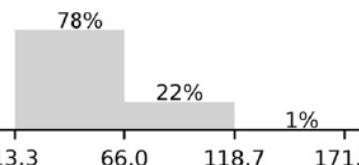
Comunas

Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad (cientos)	Desplazados (cientos)	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 6	0.035%	6	1.7	11.0	84
Comuna - 4	0.030%	2	0.5	3.5	139
Comuna - 5	0.030%	4	1.1	7.3	103
Comuna - 13	0.029%	4	1.4	9.1	85
Comuna - 14	0.029%	4	1.5	9.6	59
Comuna - 11	0.028%	3	1.0	6.2	71
Comuna - 21	0.028%	4	1.2	7.9	37
Comuna - 7	0.027%	2	0.6	4.1	66
Comuna - 16	0.027%	3	0.9	5.8	59
Comuna - 8	0.026%	3	0.9	5.6	125
Comuna - 12	0.025%	2	0.6	3.8	41
Comuna - 15	0.025%	3	1.1	7.0	55
Comuna - 10	0.024%	3	0.8	5.4	97
Comuna - 9	0.021%	1	0.3	1.8	59
Comuna - 17	0.015%	3	0.7	5.5	269

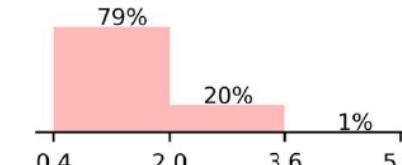
COMUNAS EN MAYOR RIESGO

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

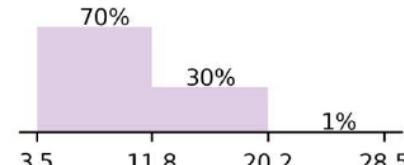
Fatalidades
Rango: 13.3 – 171.5
Promedio: 53.4



Heridos de gravedad (en miles)
Rango: 0.4 – 5.2
Promedio: 1.6



Desplazados (en miles)
Rango: 3.5 – 28.5
Promedio: 10.5



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.

CALI - COLOMBIA

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.8 – 12KM PROFUNDIDAD
TERREMOTO DE 1994



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



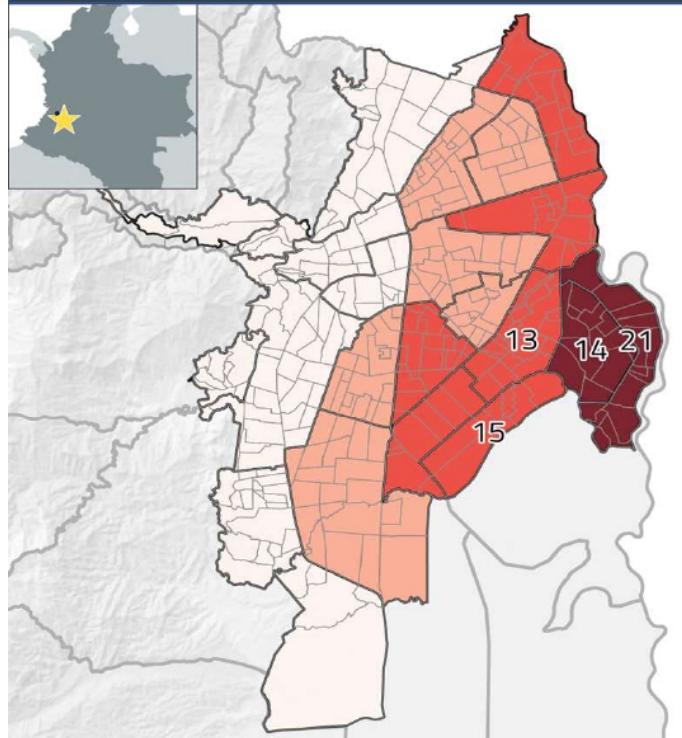
Edificios
Industriales
5.3 mil



Edificios
Institucionales
8 mil



Capital
expuesto
\$220 (bill. COP)



Índice de colapsos en la ciudad
0.031%

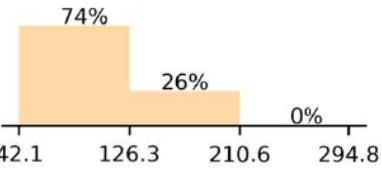
0.002% - 0.013%

0.013% - 0.031%

0.031% - 0.048%

0.048% - 0.067%

Colapsos
Rango: 42.1 – 294.8
Promedio: 108.3



Índice de colapsos

Comunas

Comuna - 21
Comuna - 14
Comuna - 13
Comuna - 15
Comuna - 16
Comuna - 7
Comuna - 6
Comuna - 11
Comuna - 12
Comuna - 5
Comuna - 8
Comuna - 4
Comuna - 17
Comuna - 10
Comuna - 22

Fatalidades

9
9
8
6
5
3
7
4
2
5
3
2
5
3
0

Heridos de gravedad (cientos)

3.0
3.2
2.5
2.1
1.4
0.9
1.9
1.2
0.7
1.1
0.8
0.5
1.4
0.7
0.1

Desplazados (cientos)

18.6
19.8
16.0
13.4
9.2
6.0
12.8
8.1
5.0
8.3
6.0
3.2
10.2
5.5
0.8

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

78
115
149
102
97
98
108
99
58
127
147
166
462
115
132

COMUNAS EN MAYOR RIESGO

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

Fatalidades

Rango: 30.4 – 188.2
Promedio: 73.9

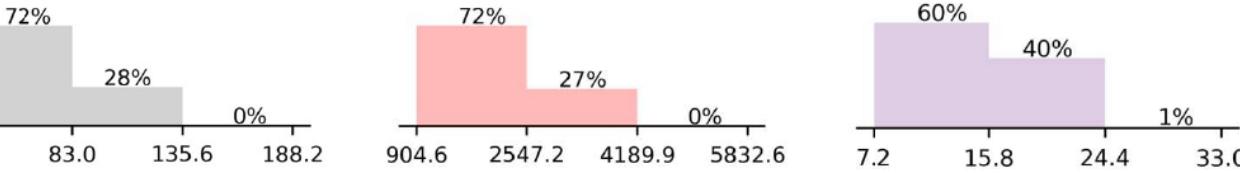
Heridos de gravedad

Rango: 904.6 – 5832.6
Promedio: 2256.5

Desplazados (en miles)

Rango: 7.2 – 33.0
Promedio: 15.3

60%
40%
1%



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

CALI - COLOMBIA

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.4 – 73KM PROFUNDIDAD
TERREMOTO DE 1995



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



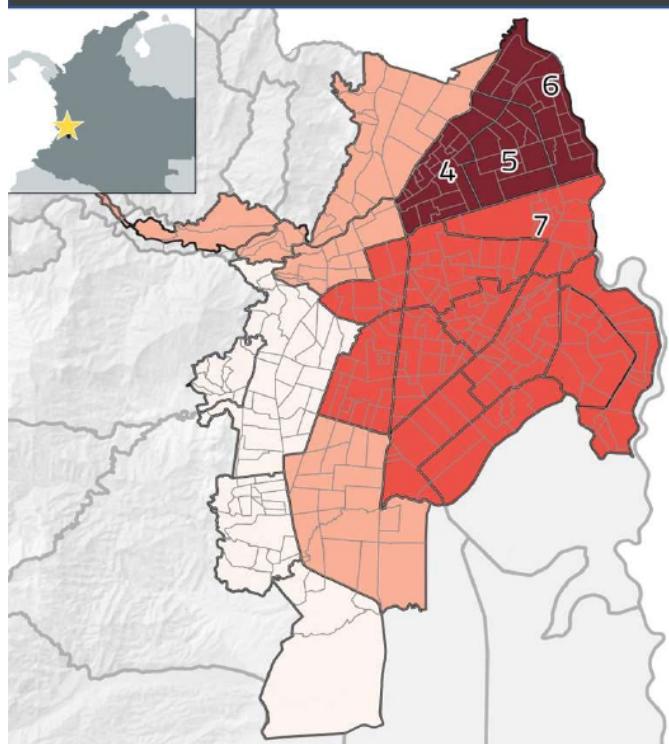
Edificios
Industriales
5.3 mil



Edificios
Institucionales
8 mil



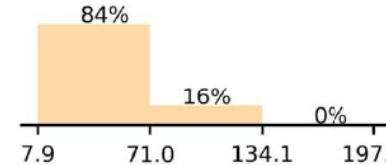
Capital
expuesto
\$220 (bill. COP)



Índice de colapsos en la ciudad
0.014%



Colapsos
Rango: 7.9 – 197.2
Promedio: 48.8



Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad (cientos)

Desplazados (cientos)

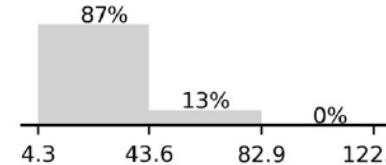
Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad (cientos)	Desplazados (cientos)	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 6	0.024%	4	1.1	6.9	55
Comuna - 5	0.020%	2	0.5	3.6	59
Comuna - 4	0.020%	1	0.3	2.2	84
Comuna - 7	0.018%	1	0.4	2.7	43
Comuna - 11	0.017%	2	0.5	3.6	44
Comuna - 8	0.017%	2	0.5	3.4	80
Comuna - 14	0.017%	2	0.9	5.5	35
Comuna - 13	0.016%	2	0.8	5.0	46
Comuna - 12	0.016%	1	0.4	2.3	26
Comuna - 21	0.016%	2	0.7	4.4	22
Comuna - 16	0.015%	2	0.5	3.0	33
Comuna - 9	0.014%	1	0.2	1.1	39
Comuna - 10	0.014%	1	0.4	2.8	56
Comuna - 15	0.013%	2	0.6	3.6	31
Comuna - 2	0.011%	1	0.3	2.0	101

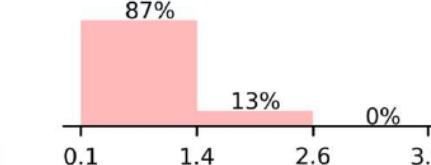
COMUNAS EN MAYOR RIESGO

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

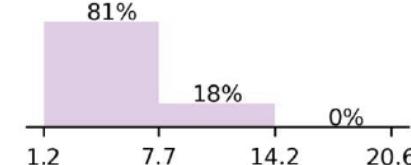
Fatalidades
Rango: 4.3 – 122.2
Promedio: 28.3



Heridos de gravedad (en miles)
Rango: 0.1 – 3.8
Promedio: 0.9



Desplazados (en miles)
Rango: 1.2 – 20.6
Promedio: 5.8



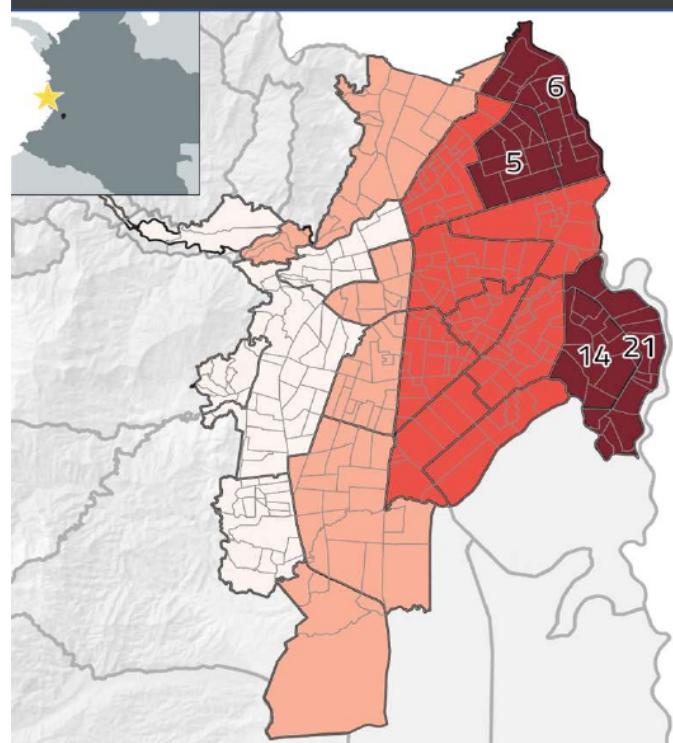
El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.



Población
2.3 millonesEdificios
Residenciales
312 milEdificios
Comerciales
22 milEdificios
Industriales
5.3 milEdificios
Institucionales
8 milCapital
expuesto
\$220 (bill. COP)

Índice de colapsos en la ciudad
0.007%

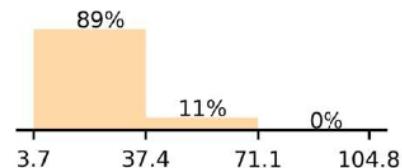
0.001% - 0.002%

0.002% - 0.005%

0.005% - 0.009%

0.009% - 0.011%

Colapsos
Rango: 3.7 – 104.8
Promedio: 22.9



Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad

Desplazados

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

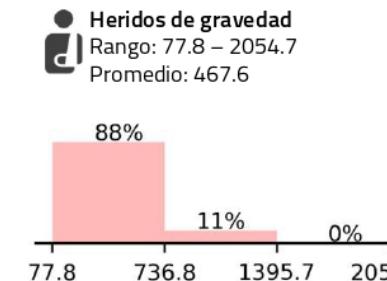
Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 6	0.011%	2	57	404	39
Comuna - 21	0.010%	1	44	303	18
Comuna - 14	0.010%	1	52	350	27
Comuna - 5	0.009%	1	33	255	47
Comuna - 7	0.009%	1	21	145	30
Comuna - 13	0.009%	1	43	303	38
Comuna - 4	0.008%	1	16	113	61
Comuna - 16	0.007%	1	25	181	25
Comuna - 15	0.007%	1	32	228	24
Comuna - 11	0.007%	1	25	181	28
Comuna - 12	0.007%	1	16	118	17
Comuna - 8	0.007%	1	23	169	51
Comuna - 10	0.005%	1	18	141	37
Comuna - 9	0.004%	0	6	42	21
Comuna - 17	0.004%	1	21	178	124

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

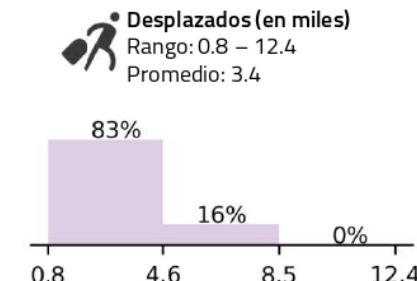
Fatalidades
Rango: 2.5 – 66.3
Promedio: 15.5



Heridos de gravedad
Rango: 77.8 – 2054.7
Promedio: 467.6



Desplazados (en miles)
Rango: 0.8 – 12.4
Promedio: 3.4



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

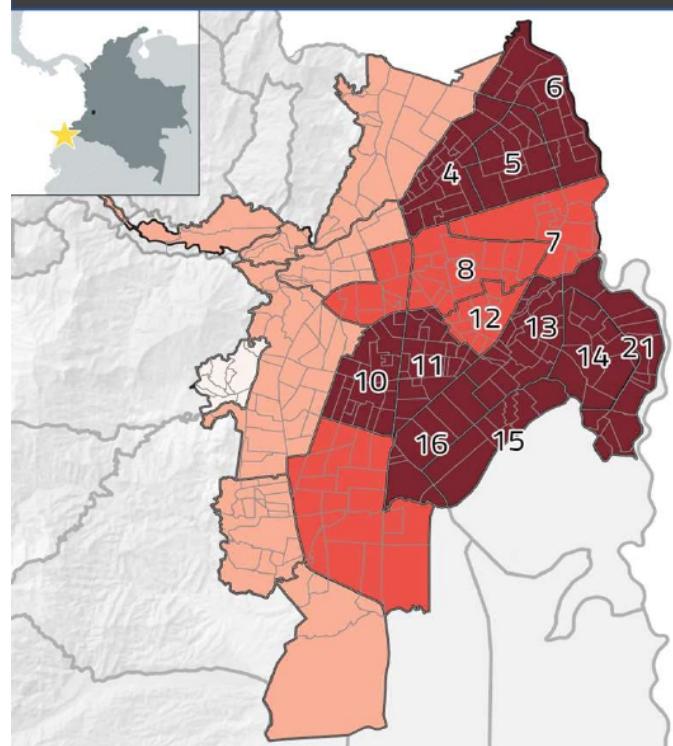
Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

Población
2.3 millonesEdificios
Residenciales
312 milEdificios
Comerciales
22 milEdificios
Industriales
5.3 milEdificios
Institucionales
8 milCapital
expuesto
\$220 (bill. COP)

Índice de colapsos en la ciudad
0.004%

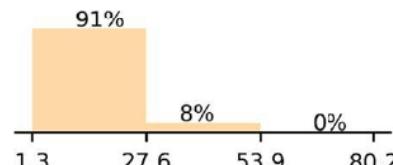
0.001% - 0.001%

0.001% - 0.003%

0.003% - 0.004%

0.004% - 0.005%

Colapsos
Rango: 1.3 - 80.2
Promedio: 14.3



Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad

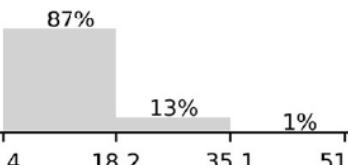
Desplazados

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

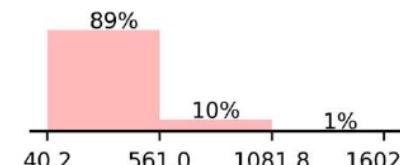
Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 14	0.005%	1	30	202	16
Comuna - 16	0.005%	1	19	136	18
Comuna - 11	0.005%	1	19	134	19
Comuna - 13	0.005%	1	28	193	25
Comuna - 21	0.005%	1	24	166	10
Comuna - 6	0.005%	1	29	206	20
Comuna - 15	0.005%	1	22	152	15
Comuna - 10	0.005%	1	19	140	30
Comuna - 4	0.005%	0	10	68	39
Comuna - 5	0.005%	1	23	173	29
Comuna - 7	0.004%	0	11	77	16
Comuna - 12	0.004%	0	11	75	10
Comuna - 8	0.004%	1	15	112	32
Comuna - 17	0.004%	1	31	236	128
Comuna - 9	0.004%	0	5	35	16

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

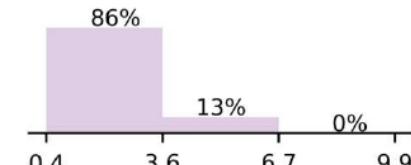
Fatalidades
Rango: 1.4 - 51.9
Promedio: 11.6



Heridos de gravedad
Rango: 40.2 - 1602.7
Promedio: 333.5



Desplazados (en miles)
Rango: 0.4 - 9.9
Promedio: 2.4



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE

GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

CALI - COLOMBIA

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.3 – 20KM PROFUNDIDAD
TERREMOTO DE 1925



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



Edificios
Industriales
5.3 mil

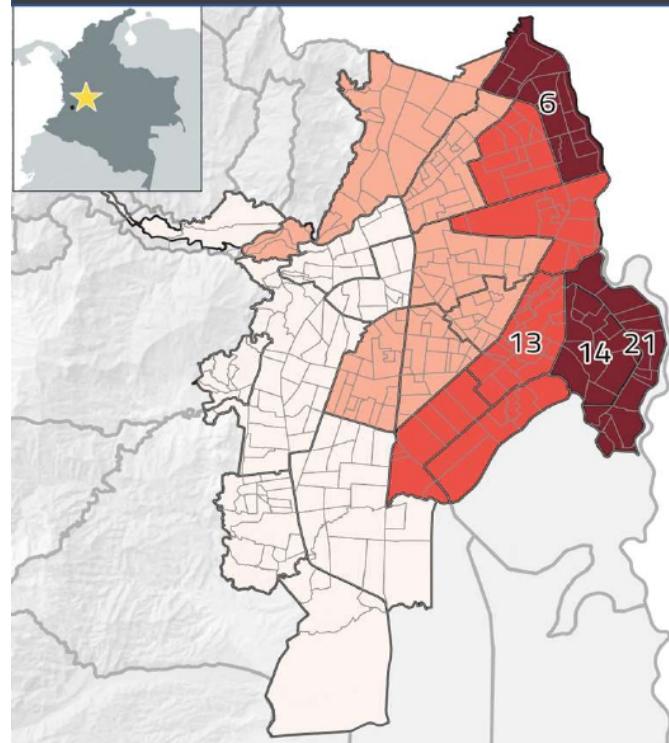


Edificios
Institucionales
8 mil



Capital
expuesto
\$220 (bill. COP)

Población y Edificios expuestos



Comunas

Índice de colapsos

Fatalidades

Heridos de gravedad

Desplazados

Pérdidas económicas (miles de mill. COP)

Comuna	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (miles de mill. COP)
Comuna - 21	0.00012%	0	1	6	1.4
Comuna - 6	0.00010%	0	1	6	2.6
Comuna - 14	0.00010%	0	1	6	1.9
Comuna - 13	0.00008%	0	0	5	2.6
Comuna - 7	0.00007%	0	0	2	1.8
Comuna - 15	0.00006%	0	0	3	1.5
Comuna - 5	0.00005%	0	0	2	2.5
Comuna - 16	0.00005%	0	0	2	1.4
Comuna - 11	0.00004%	0	0	2	1.5
Comuna - 12	0.00004%	0	0	1	0.9
Comuna - 4	0.00004%	0	0	1	2.9
Comuna - 8	0.00003%	0	0	1	2.5
Comuna - 10	0.00003%	0	0	1	2.1
Comuna - 2	0.00002%	0	0	1	2.7
Comuna - 9	0.00002%	0	0	0	1.0

Índice de colapsos en la ciudad
0.00005%

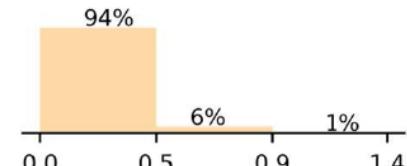
0% - 0.00002%

0.00002% - 0.00004%

0.00004% - 0.00008%

0.00008% - 0.00012%

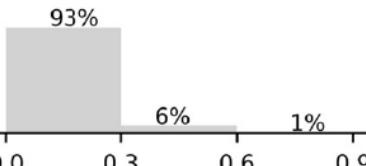
Colapsos
Rango: 0.0 – 1.4
Promedio: 0.2



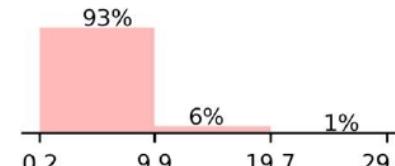
COMUNAS EN MAYOR RIESGO

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD

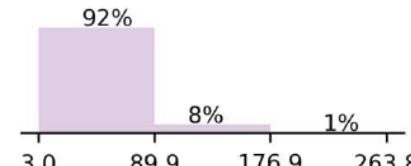
Fatalidades
Rango: 0.0 – 0.9
Promedio: 0.1



Heridos de gravedad
Rango: 0.2 – 29.4
Promedio: 3.9



Desplazados
Rango: 3.0 – 263.8
Promedio: 41.9



El índice de colapsos es el porcentaje de estructuras expuestas por comuna que colapsan debido a la sacudida del terreno y es un indicador de vulnerabilidad física.

El número de fatalidades fue estimado usando la población de la ciudad al 2021, y asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 100% de la población ubicada en las residencias.

Los histogramas muestran los resultados obtenidos de 2000 simulaciones del evento sísmico. El rango muestra el riesgo mínimo y máximo obtenido en todas las simulaciones.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento 'Atlas de riesgo para la ciudad de Cali'.

5.2 Evaluación probabilista: eventos estocásticos para la ciudad

Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos

La evaluación de riesgo sísmico probabilístico para Cali se realizó utilizando la calculadora de riesgo de eventos estocásticos del software de OpenQuake (Silva et al. 2014). El software utiliza el modelo de fuentes sísmicas para la ciudad (Sección **Error! Reference source not found.**) para generar varias realizaciones posibles de sismicidad condicionadas a un tiempo de investigación. A estas realizaciones o conjunto eventos se les conoce como conjunto de eventos estocásticos (SES, por sus siglas en inglés). Los eventos se generan utilizando las mismas relaciones magnitud-frecuencia establecidas para cada fuente de sismicidad mediante un proceso de muestreo de Monte Carlo. Cada ruptura generada está totalmente definida por una magnitud, profundidad sismogénica superior e inferior, epicentro y ángulos de buzamiento, inclinación y rumbo. Para Cali se generaron 100,000 SES con una duración de 1 año por rama en el árbol lógico del modelo de amenaza. Esto resulta en una simulación de 100,000 años de sismicidad en cada rama, donde cada año puede contener diversos eventos sísmicos. Como cada evento está definido por una ruptura, hacemos simulaciones de cómo se puede sentir el evento en la superficie, en forma de intensidades de agitación, usando los modelos de movimiento del terreno establecidos en el modelo de riesgo de la ciudad (Sección **Error! Reference source not found.**). Las intensidades se estimaron en el lecho rocoso, y se amplificaron usando las funciones de amplificación desarrolladas para la ciudad (Sección 2.3).

Como resultado de la generación de eventos estocásticos, tenemos una simulación de sismicidad que contiene cientos de miles de eventos sísmicos. Con la intensidad de cada uno, estimamos el impacto total que tienen en la ciudad y en cada uno de los elementos expuestos. Al calcular el impacto asumimos que los eventos han ocurrido independientemente el uno del otro (es decir, no se considera acumulación de daño en las estructuras ni enjambres sísmicos). Los resultados totales para la ciudad los registramos en una *tabla de daños y pérdidas totales*, mientras que los resultados por elemento expuesto los registramos en una *tabla de daños y pérdidas por activo*. Estas tablas contienen todo el daño y pérdidas posibles que pueden ocurrir dentro del periodo de sismicidad simulado. Por ende, las utilizamos para entender el riesgo de tres maneras fundamentales:

1. **El riesgo por periodo de retorno:** la *tabla de daños y pérdidas totales* tiene el impacto que causa cada uno de los eventos sísmicos en la ciudad. Basándonos en el número de veces con que se exceden ciertos niveles de daño y pérdida en la tabla, podemos estimar qué tan frecuentes son dentro del periodo de investigación. En este reporte presentamos esa frecuencia como un periodo de retorno (cada cuántos años se observan los niveles pérdida en el tiempo de investigación de la sismicidad).
2. **El riesgo anualizado:** es el riesgo que obtenemos al tomar todo el daño y pérdidas registradas durante el periodo de sismicidad y lo dividimos entre la duración del periodo. Debido a que considera todos los eventos sísmicos, es una estimación del riesgo promedio en que se encuentra la ciudad cada año. Es por eso que el riesgo anualizado es útil para la asignación de recursos y la planificación de la gestión del riesgo a largo plazo.
3. **Comunidades en alto riesgo:** con la *tabla de daños y pérdidas por activos*, también se puede estudiar el riesgo anualizado por región administrativa. Es decir, sumando las pérdidas de

todos los elementos expuestos dentro de una región (e.g. provincia, distrito, barrio, cuadra). Así se identifican cuáles comunidades sufren más daños y pérdidas durante el periodo de sismicidad simulada. En este análisis se resaltan las comunidades más vulnerables debido a la frecuencia con que experimentan los sismos, las características físicas de sus edificaciones y calidad del suelo en que se encuentran.

Perfil de mitigación y gestión del riesgo

Los resultados probabilísticos del riesgo se presentan en este reporte en la forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo. El perfil ha sido elaborado en conjunto con el grupo técnico de la ciudad y profesionales en áreas de respuesta ante desastres y ayuda humanitaria. El perfil de mitigación tiene los siguientes componentes:

Panel superior: proporciona a la derecha un resumen sobre el total de habitantes expuestos, el número total de edificios (en diferentes clases de ocupación) y el valor económico expuesto total de la ciudad.

Mapa de colapsos: Es un mapa con las parroquias con el mayor índice de colapsos. Tiene la intención de resaltar las partes más vulnerables de la ciudad. Esta vulnerabilidad considera la frecuencia de los eventos sísmicos, las características físicas de las edificaciones y calidad del suelo en que se encuentran. Las comunidades que se resaltan en el mapa serían las más beneficiadas por una mejor fiscalización constructiva, campañas de concientización del riesgo sísmico, y estrategias de mitigación a largo plazo.

Tabla de comunidades en alto riesgo: Esta tabla muestra métricas de riesgo adicionales para las parroquias resaltadas en el mapa de colapsos. Las métricas adicionales incluyen el número de personas y valor económico expuesto en las parroquias, las fatalidades anuales promedio, y las pérdidas económicas anuales promedio.

Gráfico de riesgo anualizado: El riesgo anualizado por estrato social se muestra en forma de una gráfica de barras. Los estratos que contribuyen más al riesgo sísmico se resaltan en el gráfico, mostrando la contribución de cada una a la mortalidad, los daños y las pérdidas económicas anualizadas de la ciudad. De esta forma, dependiendo del riesgo que se desea mitigar a largo plazo, se puede visualizar en cuales estratos los esfuerzos serían más efectivos.

Gráfico de riesgo por periodo de retorno: El riesgo por periodo de retorno se muestra también en forma de una gráfica de barras. Esta figura presenta la frecuencia con la cual se esperan eventos destructivos y su impacto en la ciudad para las métricas de riesgo principales: daños (en forma de colapsos), fatalidades y pérdidas económicas. La frecuencia se muestra en la forma de los siguientes períodos de retorno: 50 años, 100 años, 200 años, 500 años, y 1000 años. Esta información puede informar políticas de preparación, gestión y transferencia del riesgo para los eventos sísmicos, dependiendo de su frecuencia e impacto.



SANTIAGO DE CALI

PERFIL DE MITIGACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO



Población
2.3 millones



Edificios
Residenciales
312 mil



Edificios
Comerciales
22 mil



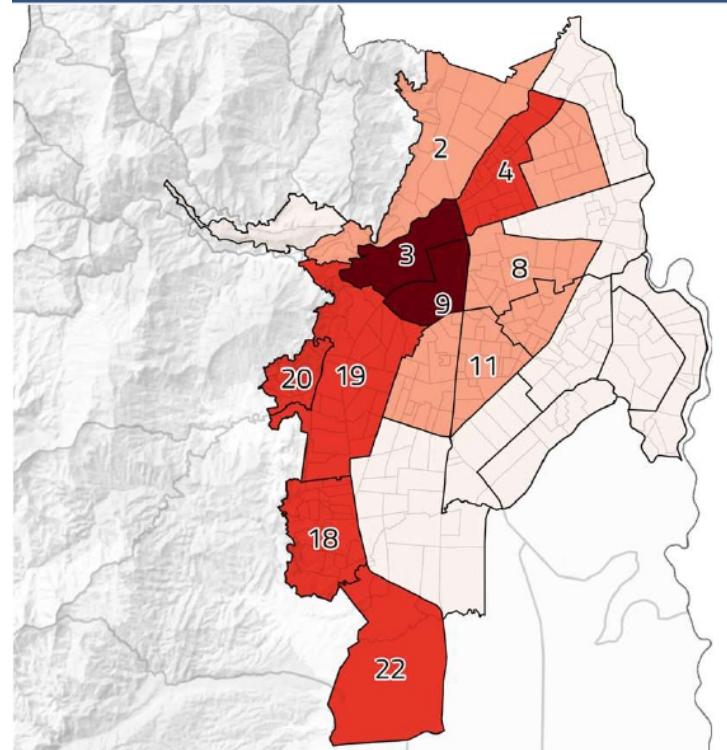
Edificios
Industriales
5.3 mil



Edificios
Institucionales
8 mil



Capital expuesto
\$220 (bill. COP)



Comuna - 3

Comuna - 9

Comuna - 18

Comuna - 4

Comuna - 19

Comuna - 22

Comuna - 20

Comuna - 2

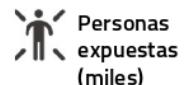
Comuna - 8

Comuna - 11

Comuna - 10

Comuna - 5

Comuna - 12



Personas
expuestas
(miles)

32

35

108

52

103

24

56

110

95

99

99

109

66

COMUNAS EN ALTO RIESGO



Capital
expuesto
(bill. COP)

14

6

7

11

37

13

2

33

10

6

8

7

3



Índice de
colapsos
anuales

0.011%

0.010%

0.007%

0.007%

0.006%

0.006%

0.006%

0.005%

0.005%

0.005%

0.004%



Fatalidades
anuales

0.32

0.35

0.58

0.37

0.60

0.13

0.27

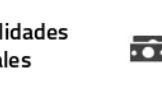
0.44

0.57

0.56

0.50

0.55



Pérdidas anuales
(miles mill. COP)

24

13

9

16

47

19

3

39

15

8

11

10

4

Mapa de índice de colapsos anuales por comuna



0.003% - 0.004%



0.004% - 0.006%



0.006% - 0.007%



0.007% - 0.011%



Fatalidades
anuales



Colapsos



Pérdidas anuales
\$168 (bill. COP)

Riesgo anualizado por estrato social



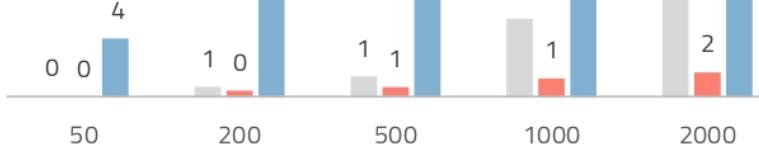
Estrato - 1 Estrato - 2 Estrato - 3 Estrato - 4 Estrato - 5 Estrato - 6

Pérdidas por periodo de retorno en años

Fatalidades (miles)

Colapsos (miles)

Económicas (trill. COP)



6. REFERENCIAS

- Acevedo A.B, Yepes-Estrada C, González D, Silva V, Mora M, Arcila M, And Posada G, "Seismic Risk Assessment for the Residential Buildings of the Major Three Cities in Colombia: Bogotá, Medellín, and Cali", *Earthquake Spectra*, Vol. 36, No. S1, 2020, pp. 298-320.
- AIS (2009), Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (2009). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS. Comité AIS-300, Bogotá, 227 pp.
- Allen, T.I., and Wald, D.J., 2007, Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (VS30) and amplification around the globe: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357, 69 p.
- Ameri, G., Hollender, F., Perron, V., & Martin, C. (2017). Site specific partially nonergodic PSHA for a hard-rock critical site in southern France: adjustment of ground motion prediction equations and sensitivity analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0118-6>.
- Arcila, M. & Muñoz-Martín, A. 2020. Integrated perspective of the present-day stress and strain regime in Colombia from analysis of earthquake focal mechanisms and geodetic data. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachón, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 549–569. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.17>.
- Arcila, M. García, J., Montejano, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F. (2020). Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model. <https://doi.org/10.32685/9789585279469>.
- Arcila, M., García-Mayordomo, J., y López, M.C (2017, septiembre) Modelo de zonas sismogénicas para la evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Ponencia presentada en el XVI Congreso Colombiano de Geología. Santa Marta, Colombia, 1540-1543
- Aristizábal C, Bard P-Y, Beauval C, Lorito S, Selva J et al (2016). Guidelines and case studies of site monitoring to reduce the uncertainties affecting site-specific earthquake hazard assessment. Deliverable D3.4—STREST—harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards. <http://www.strest-eu.org/opencms/opencms/results/>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Colombia.
- Bazzurro, P. and Cornell, C. A. (2004). Ground-Motion Amplification in Nonlinear Soil Sites with Uncertain Properties. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94:2110–2123, 2004.
- Bernal, G. (2014), Metodología para la modelación, cálculo y calibración de parámetros de la amenaza sísmica para la evaluación probabilista del riesgo. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Castro Villamarín, N. (2011). Evaluación de la respuesta sísmica no-lineal de un depósito de suelo pre-consolidado de la ciudad de Cali., Ph.D. Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 1568–1606.
- Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA (2019). Documento técnico para el Plan de Gestión Ambiental de Cali PGAC. Disponible en <https://www.cali.gov.co>.
- Departamento Administrativo Nacional De Estadística – DANE, 2018. Censo Nacional de Población y Vivienda. Colombia.
- Días N (1999). Colombia: el impacto de sus terremotos a lo largo de su historia. Revista FASECOLDA. Dirección de la Cámara Técnica de Incendio y Terremoto.

Frankel, A. (1995). Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. *Seismological Research Letters*, 66(4), 8-21.

Global Facility for Disaster Risk Reduction - GFDRR (2014). Open Data for Resilience Initiative: Field Guide. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank 1818 H Street NW, Washington DC 20433. Fuente www.gfdrr.org.

Heath, D., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., and Scmocyk, G. (2020). A Global Hybrid VS30 Map with a Topographic-Slope-Based Default and Regional Map Insets", *Earthquake Spectra*, vol. 36, 3: pp. 1570-1584.

INGEOMINAS-DAGMA. (2005). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Bogotá. Ministerio de Minas y Energía

Kamai, R. , Abrahamson, N. A. , and Silva, W. J. , 2014. Nonlinear horizontal site amplification for constraining the NGA-West2 GMPEs, *Earthquake Spectra* 30, 1223–1240.

Kottke, A. and Rathje, E. (2013). Comparison of time series and random-vibration theory site-response methods. *Bull Seismol Soc Am* 103(3):2111–2127.

McGuire, R. K. (2004), Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.

Moon, S.W. and Ku, T. (2016), "Development of global correlation models between in situ stress-normalized shear wave velocity and soil unit weight for plastic soils", *Canadian Geotech. J.*, 53(10), 1600-1611. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0015>.

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Vigano D (2014). OpenQuake Engine: an Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismol Res Lett* 85:692–702

Pagani, M. and Marcellini, A., 2007. Seismic-hazard disaggregation: a fully probabilistic methodology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), pp.1688-1701.

Plan de Ordenamiento Territorial de Cali – POT (2014). Alcaldía de Santiago de Cali. Tomado de <https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/52108/documento-plan-de-ordenamiento-territorial/>.

Rathje, E. M., and M. C. Ozbej (2006). Site-specific validation of random vibration theory-based seismic site response analysis, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 132, no. 7, 911–922.

Rodriguez-Marek A, Rathje EM, Bommer JJ, Scherbaum F and Stafford PJ (2014) Application of single-station sigma and site response characterization in a probabilistic seismic hazard analysis for a new nuclear site. *Bulletin of the Seismological Society of America* 104(4): 1601– 1619.

Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G.A., y Cardona, O.D (2016). Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14" *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(4), 230-239.

Silva V, Crowley H, Pagani M, Monelli D and Pinho R (2014) Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards* 72(3): 1409–1427.

Silva, V, Horspool, N. Combining USGS ShakeMaps and the OpenQuake-engine for damage and loss assessment. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2019; 48: 634– 652. <https://doi.org/10.1002/eqe.3154>

Storchak, D.A., D. Di Giacomo, I. Bondár, E.R. Engdahl, J. Harris, W.H.K. Lee, A. Villaseñor and P. Bormann (2013). Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009). *Seism. Res. Lett.*, 84, 5, 810-815, doi: 10.1785/0220130034.

Tromans, I.J., Aldama-Bustos, G., Douglas, J., Lessi-Cheimariou, A., Hunt, S., Daví, M., and Robertson, C. (2019). Probabilistic seismic hazard assessment for a new-build nuclear power plant site in the UK. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(1), 1-36. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0441-6>.

Unidad Nacional De Gestión De Riesgo De Desastres - UNGRD. 2018. Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes. Bogotá, Colombia.

Wald D, Quitoriano V, Heaton T, Kanamori H, Scrivner C, Worden BC. Trinet "ShakeMaps": rapid generation of peak ground-motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthq Spectra*. 1999; 15: 537-556.

Yepes-Estrada C, Silva V, Valcárcel J, Acevedo A.B, Tarque N, Huber M.A, Coronel G, and Santa María H, "Modelling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment ", *Earthquake Spectra*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp. 299-322.

EN REVISIÓN