



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



Training and Communication for Earthquake Risk Assessment TREQ Project

Evaluación de Riesgo Sísmico para Santiago de los Caballeros

Entregable 2.6.3 – versión 1.0.0



**Global
Earthquake
Model (GEM)
Foundation**

www.globalquakemodel.org

Evaluación del riesgo sísmico para
Santiago de los Caballeros

Evaluación del riesgo sísmico para Santiago de los Caballeros

Reporte D2.6.3

Reporte técnico producido en el contexto del proyecto TREQ

Versión 1.0.0 – Junio, 2022

Colaboradores

NOMBRE	INSTITUCIÓN
Alejandro Calderón Carpio	Fundación GEM
Shreyasvi Chandrasekhar	Fundación GEM
Thomas Chartier	Fundación GEM
Ramon Delanoy	Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)
Claudia Deveaux Garrido	ONESVIE
Freddy Duran	Servicio Geológico Nacional (SGN)
Edwin García	Servicio Geológico Nacional (SGN)
Julio García Pelaez	Antiguo miembro de la Fundación GEM
Robin Gee	Antiguo miembro de la Fundación GEM
Marco Antonio Gomez	Oficina de Ordenamiento Territorial de Santiago
Pedro Iván Marquez	ONESVIE
Santiago Muñoz	Antiguo miembro del Servicio Geológico Nacional (SGN)
Galvy Núñez	ONESVIE
Marco Pagani	Fundación GEM
Yesica Perez	Servicio Geológico Nacional (SGN)
Leonardo Reyes	Madera ONESVIE
Kerman Rodríguez	Oficina de Ordenamiento Territorial de Santiago
María Betania Roque de Medina	Antiguo miembro del Servicio Geológico Nacional (SGN)
Richard Styron	Fundación GEM
Catalina Yepes Estrada	Fundación GEM

Cita: Yepes-Estrada C, Calderon A (2022). Evaluación de Riesgo Sísmico para Santiago de los Caballeros. GEM-TREQ Reporte Técnico D2.6.3

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 funcionarios de la Oficina del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros, la ONESVIE y el Servicio Geológico Nacional de la República Dominicana.

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	9
Resumen Ejecutivo	10
Introducción	14
1. Amenaza Sísmica	20
1.1 Fuentes de amenaza sísmica.....	21
1.2 Modelos de movimiento del terreno.....	23
1.3 Resultados de amenaza sísmica en roca.....	24
2. Caracterización de los efectos de sitio	28
2.1 Información geotécnica y geofísica.....	28
2.2 Metodología para el análisis de efectos de sitio.....	30
2.3 Funciones de amplificación del movimiento del suelo (AF).....	33
3. Modelo de Exposición.....	36
3.1 Demografía y división administrativa de la ciudad	36
3.2 Recopilación de datos	37
3.3 Clasificación de las edificaciones	37
3.4 Tipologías o clases constructivas predominantes	40
3.5 Modelo de exposición de la ciudad.....	42
4. Modelos de Vulnerabilidad.....	44
4.1 Base de datos de vulnerabilidad global GEM	44
5. Riesgo Sísmico	47
5.1 Riesgo determinista: escenarios de riesgo para la ciudad.....	47

Global Earthquake Model

Lista de escenarios sísmicos.....	48
Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos	49
Perfiles de preparación y respuesta ante emergencias	51
Limitaciones de los perfiles de riesgo.....	53
5.2 Evaluación probabilista: eventos estocásticos para la ciudad.....	61
Metodología y suposiciones en el análisis de escenarios sísmicos	61
Perfil de mitigación y gestión del riesgo.....	62
6. Referencias	65

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Uno de siete perfiles de preparación y respuesta ante emergencias para un evento sísmico originado en la Falla Septentrional en las cercanías de la ciudad.....</i>	12
<i>Figura 2. Perfil de mitigación y gestión del riesgo a largo plazo para Santiago.....</i>	13
<i>Figura 3. Mapa de barrios y subbarrios en la zona urbana del distrito metropolitano de Santiago de los Caballeros, en la República Dominicana.</i>	14
<i>Figura 4. Los tres componentes del riesgo catastrófico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Fuente GFDRR (2014).....</i>	15
<i>Figura 5. Vistazo del repositorio de acceso abierto en línea con los modelos y resultados del Proyecto TREQ.</i>	17
<i>Figura 6. Fallas activas (rojas) y terremotos clasificados como corticales para $MW >= 4.7$ (círculos blancos con diámetro de acuerdo con la magnitud) en La Española.</i>	22
<i>Figura 7. Geometría y eventos considerados en la caracterización de la subducción interface e intraplaca.</i>	23
<i>Figura 8. Tasas de sismicidad intraplaca generadas para la trinchera de Puerto Rico con diferentes porcentajes de participación de la sismicidad distribuida.....</i>	23
<i>Figura 9. Modelos de movimiento del terreno (GMPEs) para cada ambiente tectónico en Colombia y sus correspondientes pesos en el árbol lógico. Fuente: Johnson et al (2022)</i>	24
<i>Figura 10. Mapa de aceleración pico-efectiva (PGA) promedio para el 10% (arriba) y 2% (abajo) de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 800 \text{ m/s}$). Fuente: Johnson et al (2022).....</i>	25
<i>Figura 11. PGA sobre roca en las inmediaciones de Santiago de los Caballeros con (izquierda) 10% y (derecha) 2% POE en 50 años.....</i>	26
<i>Figura 12. Desagregación de la amenaza sísmica en PGA (en roca) para el 10% (izquierda) y 2% (derecha) de probabilidad de excedencia en 50 años para la ciudad de Santiago. [a] y [b] (arriba) Latitud - Región Tectónica (TRT, 1-marrón: subducción intraplaca, 2-rojo: interface de subducción, y 3-amarillo: corteza superficial activa). [c] y [d] (abajo) Magnitud - Distancia - Epsilon (el término entre eventos GMPE)....</i>	27
<i>Figura 13. 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>	29
<i>Figura 14. Perfiles Vs de referencia para Santiago (10 perfiles, datos de Rouillé et al., 2011).....</i>	30

<i>Figura 15. Esquema con metodología para la caracterización de los efectos de sitio. Fuente: Reporte TREQ D.2.2.4 (Gee et al., 2021).....</i>	32
<i>Figura 16. 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.....</i>	33
<i>Figura 17. Modelo de respuesta del suelo para Santiago. Funciones de amplificación (AF) indicando la mediana en cada zona homogénea para diferentes períodos.....</i>	34
<i>Figura 18. Variables categóricas de la capa constructiva (columna izquierda) utilizadas para identificar uno o más atributos estructurales, de ocupación y costo de reemplazo (filas superiores), por cada estructura identificada en Santiago</i>	39
<i>Figura 19. Casas de mampostería en estratos socioeconómicos medio y altos en Santiago. Tomadas de Google Maps (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).</i>	40
<i>Figura 20. Casa de mampostería sin confinamiento ni refuerzo visible en el proceso constructivo. Tomadas de Google Maps (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).</i>	41
<i>Figura 21. Distribución del número de edificaciones y el valor económico de la ciudad a nivel de barrio.</i>	42
<i>Figura 22. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de BGRM (2011).</i>	43
<i>Figura 23. (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.</i>	45
<i>Figura 24. 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.</i>	51
<i>Figura 25. 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.....</i>	52
<i>Figura 26. 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.</i>	52
<i>Figura 27. 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</i>	

Global Earthquake Model

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. 53

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>	18
<i>Tabla 2. Estadísticas principales de tamaño y costo de reemplazo de las edificaciones en la ciudad, por tipo de ocupación.....</i>	43
<i>Tabla 3. Lista de rupturas sísmicas y sus características utilizadas para estimar el riesgo determinista en Santiago. 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>	49

RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento es el resultado del esfuerzo colaborativo entre la Fundación GEM, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la oficina del Plan de Ordenamiento Territorial del Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros y el Servicio Geológico Nacional. El objetivo de este reporte es presentar los resultados de la evaluación de riesgo urbano para el municipio de Santiago de los Caballeros, 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 Santiago se desarrollaron también modelos de amplificación de la intensidad que toman en cuenta la calidad de los estratos de suelo locales. En el proyecto utilizamos el modelo de amenaza sísmica nacional desarrollado por la Fundación GEM y el Servicio Geológico Nacional en el año 2021. Este modelo estima que la amenaza sísmica en el municipio corresponde a una aceleración pico del terreno (PGA) promedio que va de 0.3 g en el suroeste de la ciudad a 0.7 g en el noroeste de la ciudad, con una probabilidad de excedencia de 10% 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 Santiago todas las zonas, con excepción de las zonas 1 y 7, se amplifican en todos los períodos e intensidades, alcanzando hasta un factor 4 en la Zona 8 a 1.0 segundo. Existe una tendencia general de máxima amplificación que se produce a los 0.3 y 0.6 segundos.

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 Santiago se ha desarrollado un modelo de exposición que abarca el límite urbano de la ciudad y distritos aledaños de gran importancia. El modelo 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 de Santiago contiene más de 160,000 edificaciones. Incluye estructuras de uso residencial, comercial, industrial, educativas, institucionales y de salud, con un costo de reemplazo superior a los 25 billones de dólares Estadounidenses (USD) y más de 800 mil habitantes. Durante la elaboración de la base datos se determinó que más del 68% 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.

Global Earthquake Model

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 Santiago se utilizaron 83 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 3 pisos, y el concreto reforzado utilizado en estructuras de 6 a 20 pisos.

En la evaluación del riesgo sísmico se presentan los resultados obtenidos para Santiago. 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 Santiago se realizó una selección de 7 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 sismo hipotético en el segmento oeste de la falla Septentrional, con una magnitud de 6.5 y una profundidad de 9 km, sería de mediano impacto para la ciudad, causando en promedio más de 490 estructuras colapsadas, 200 fatalidades y 1,300 millones de dólares en pérdidas, equivalentes al 5% del valor económico total de la construcción en la ciudad. El escenario de mayor impacto es un sismo con las mismas características, pero ocurriendo en un segmento central de la falla Septentrional, en las cercanías de Santiago. En este caso estimamos que el resultado promedio serían más de 6,000 colapsos, 2,500 fatalidades y 10 mil millones de dólares en pérdidas, equivalentes a un 40% 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. La Figura 1 muestra un ejemplo de estos perfiles. 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. El marco metodológico y el resto de los eventos analizados pueden encontrarse en la sección de Evaluación de Riesgo Sísmico para la ciudad.

Global Earthquake Model

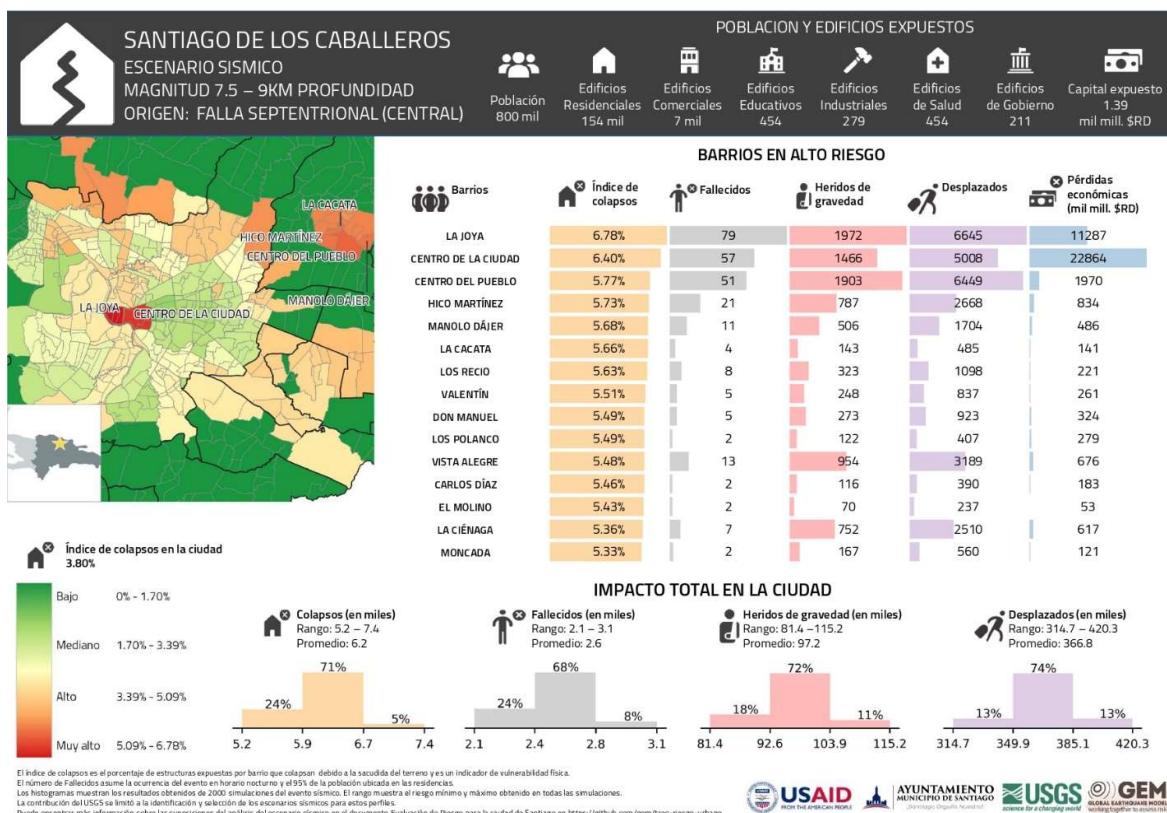


Figura 1. Uno de siete perfiles de preparación y respuesta ante emergencias para un evento sísmico originado en la Falla Septentrional en las cercanías de la ciudad.

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 Santiago 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, Santiago puede tener pérdidas de 13 fatalidades y 69 millones de dólares 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 el Centro de la Ciudad, la Joya, Cienfuegos, Pueblo Nuevo y Buenos Aires. Los resultados probabilísticos del riesgo se presentan en este reporte en la forma de un perfil de mitigación y gestión del riesgo, el cual presentamos en la Figura 2. 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.

Global Earthquake Model

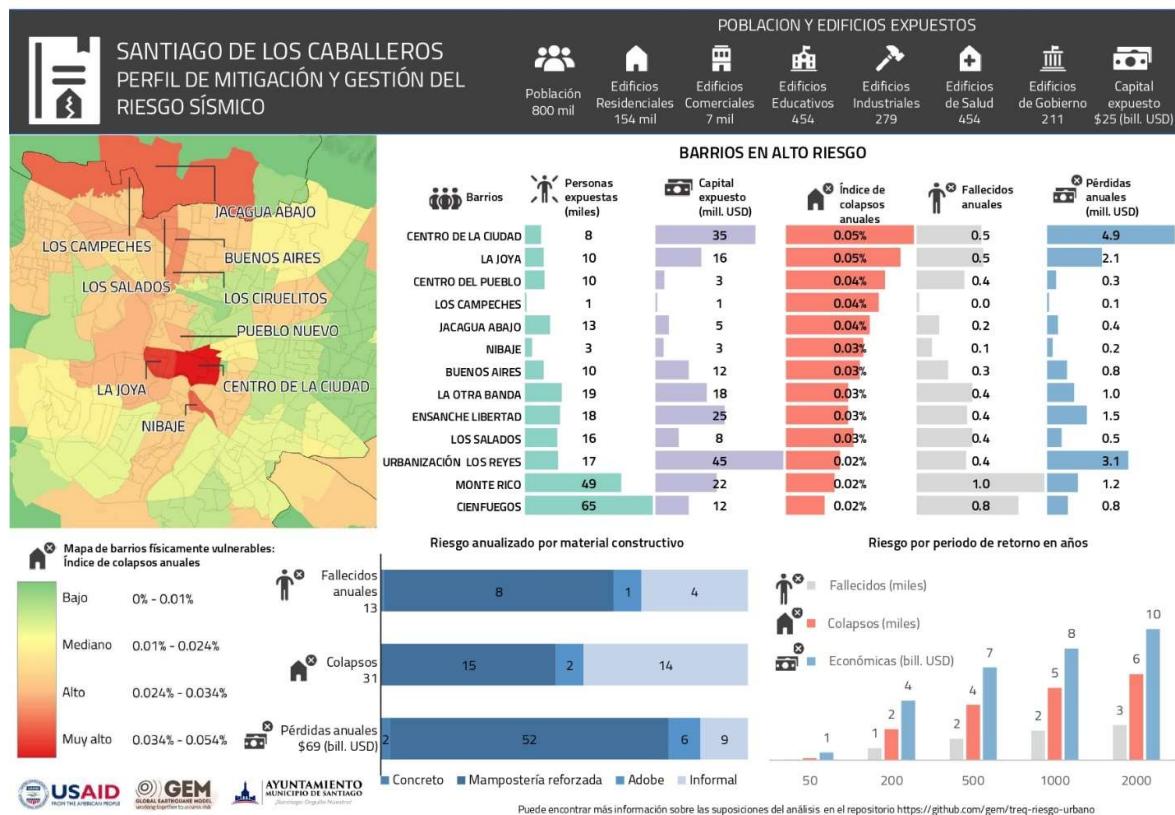


Figura 2. Perfil de mitigación y gestión del riesgo a largo plazo para Santiago.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Santiago de los Caballeros tiene un gran valor patrimonial y económico para la región Cibao Norte de la República Dominicana, siendo uno de los centros industriales más grandes del Caribe. Es la tercera ciudad más grande del país y se estima que su aporte al PIB dominicano está entre el 15% y el 18% (BID, 2015), concentrándose una de las principales fuentes de empleo y la oferta de servicios educativos y de salud en la República Dominicana. La zona metropolitana de Santiago es una de las regiones con mayor tasa de crecimiento demográfico del país. En 2002, el municipio de Santiago concentraba 553 mil habitantes, alrededor del 6,2% de la población nacional (ONE, 2002). Actualmente viven en el municipio más de 750 mil personas, equivalente al 7% de la población del país (ONE, 2011), con un aumento de más del 30% respecto a la década anterior. Santiago es administrado en 6 distritos municipales: Santiago (Cabeceira), Pedro García, Baitoa, La Canela, San Francisco de Jacagua y Hato del Yaque . Más del 82% de la población municipal vive dentro del límite urbano de la ciudad. La Figura 3 muestra la subdivisión en barrios y subbarrios de la zona urbana de Santiago.

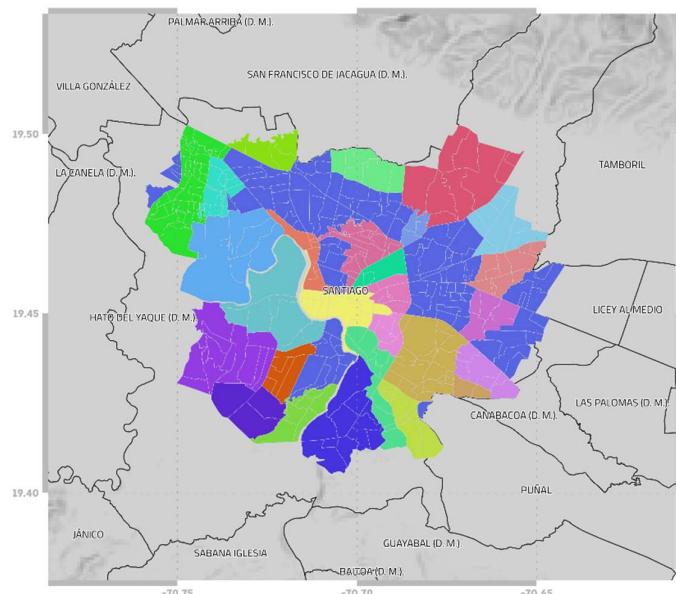


Figura 3. Mapa de barrios y subbarrios en la zona urbana del distrito metropolitano de Santiago de los Caballeros, en la República Dominicana.

De acuerdo con el Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras, R-001, (MOPC, 2011), la ciudad se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica alta. Santiago de los Caballeros se ubica dentro del Valle del Cibao, el cual se caracteriza por un relieve plano y estratigrafía simple con materiales neogénicos y cuaternarios en su mayoría arcillosos (Llorente et al., 2017). Está situado entre las placas del Caribe y de América del Norte, las cuales convergen de forma oblicua. Los terremotos de la corteza superficial representan una amenaza importante para la ciudad, en particular los que podrían

Global Earthquake Model

ocurrir en la falla septentrional que se encuentra a solo 5 km al norte de la ciudad. También hay influencia significativa de los terremotos provenientes de la zona de subducción en el sur del país.

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 de Santiago de los Caballeros – POT, 2017).

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).

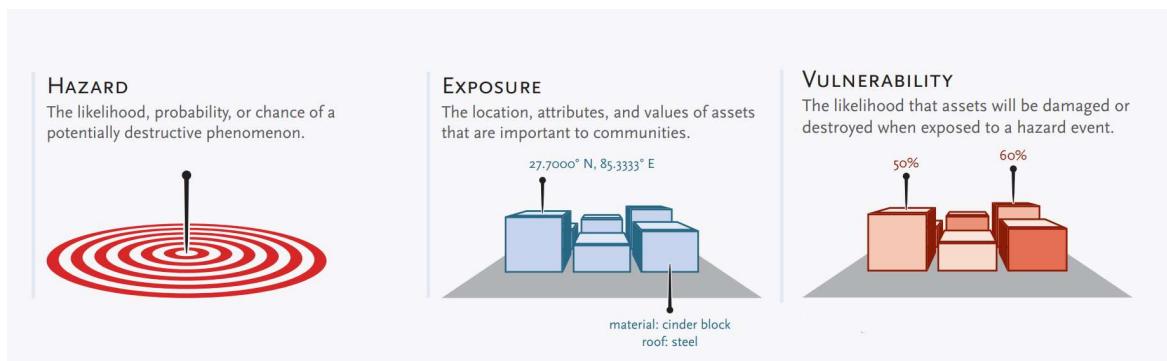


Figura 4. Los tres componentes del riesgo catastrófico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad. Fuente GFDRR (2014).

El presente reporte sintetiza los modelos y resultados de la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico para el municipio de Santiago de los Caballeros. 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

Global Earthquake Model

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 mencionan 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. También hemos publicado los resultados del proyecto y cómo utilizar el repositorio con la información generada para la ciudad en una serie de videos en YouTube: https://youtu.be/EgGev6_ZGF4 y <https://youtu.be/C6eaF0q4l5o>

SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA co 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
Available information in the folders:

- 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

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

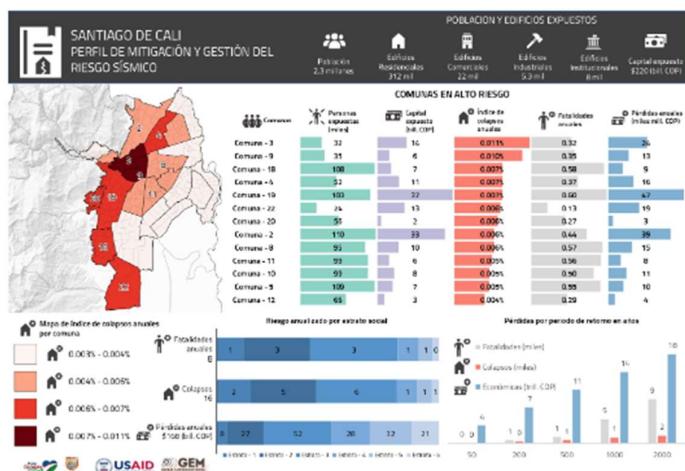


Figura 5. Vistazo del repositorio de acceso abierto en línea con los modelos y resultados del Proyecto TREQ.

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.
[Un informe de resumen ejecutivo con hallazgos y 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.]

Global Earthquake Model

- 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.

Dado que a la fecha la República Dominicana no contaba con un modelo nacional de amenaza sísmica, una de las actividades en el proyecto TREQ fue proponer un modelo en colaboración con expertos locales del Servicio Geológico Nacional (SGN) y la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). El SGN acompañó el desarrollo del modelo facilitando recopilación y revisión de los conjuntos de datos básicos necesarios y el Centro Nacional de Sismología de la UASD facilitó el catálogo más actualizado de la región (La Española).

La caracterización de las fuentes sísmicas, de los modelos de movimiento del terreno y selección de ecuaciones de atenuación (GMPEs) se describen en detalle en el reporte “*D2.2.2 Modelo nacional de amenaza sísmica para la República Dominicana*”.

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 (Vs30). La velocidad Vs30 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.

Esta sección presenta de forma resumida las características principales del modelo de amenaza y sus resultados para condiciones de roca utilizando el software OpenQuake (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

La caracterización de las fuentes sísmicas para el modelo propuesto para la República Dominicana se compone por tres ambientes tectónicos: la sismicidad activa superficial (cortical) y la sismicidad en las zonas de subducción intraplaca e interface.

La sismicidad activa de la corteza superficial, o cortical, se modela mediante dos componentes: (1) la sismicidad distribuida modelada al suavizar las tasas de ocurrencia de fuentes puntuales en las zonas de origen, también conocida como sismicidad "suavizada"; y (2) rupturas que pueden abarcar una o varias fallas que capturan el rango de posibles terremotos que podrían ocurrir dentro de los sistemas de fallas que afectan a La Española. Estas fuentes se basan en el subcatálogo clasificado para la corteza superficial, la base de datos de fallas y las zonas de interface definidas en la trinchera de Los Muertos y en la trinchera de La Española Norte, según lo caracterizado por Terrier-Sedan y Bertil (2021). La Figura 6 presenta las fallas activas y los eventos corticales en la Isla.

Las incertidumbres epistémicas se incluyen en la modelación a través de un árbol lógico, donde cada incertidumbre corresponde a un conjunto de ramas. De esta forma, múltiple hipótesis o suposiciones sobre los parámetros inciertos utilizados en la modelación pueden propagarse en los resultados. Para las fuentes corticales, se consideraron incertidumbres en el método de ponderación utilizado para suavizar la sismicidad distribuida, en la magnitud máxima a través de la relación de escala-magnitud, en la tasa de deslizamiento en los sistemas de fallas de rumbo Oriental y Enriquillo-Plantain Garden, y en la relación de sismicidad en la falla y fuera de la falla.

Global Earthquake Model

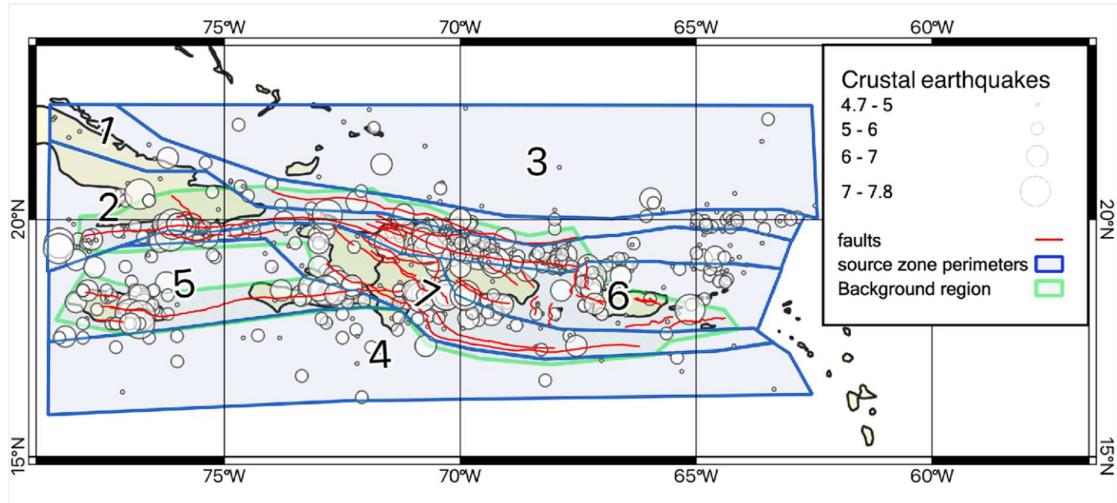


Figura 6. Fallas activas (rojas) y terremotos clasificados como corticales para $MW \geq 4.7$ (círculos blancos con diámetro de acuerdo con la magnitud) en La Española.

La sismicidad en la interface de subducción está asociada con la trinchera de Puerto Rico, la cual se caracterizó como una fuente de falla compleja, es decir, una superficie 3D definida por un conjunto de "bordes" a lo largo del rumbo que están espaciados aproximadamente por igual a lo largo de la superficie de la interfaz de inmersión. Los bordes se derivan de la geometría de la Trinchera de Puerto Rico Slab 2.0 (Hayes et al., 2018) y corresponden a la misma superficie utilizada para clasificar el tipo de sismicidad (interface o intraplaca). Para determinar la distribución de la magnitud de la frecuencia para la interface, se consideró la sismicidad observada clasificada en la interface, las dimensiones de la falla y la tasa de deslizamiento, y una combinación de ambos factores.

La Figura 7 presenta la geometría y los eventos considerados en la caracterización de la subducción interface e intraplaca. Las líneas rojas muestran la proyección superficial del borde superior de las fuentes clasificadas como tipo interface de subducción en la proximidad de las superficies utilizadas para la clasificación tectónica de la sismicidad. El polígono rojo muestra la extensión de la interface de la trinchera de Puerto Rico, y los círculos rojos son terremotos de magnitud $MW > 4.0$ ocurridos desde 1960 clasificados en esta región tectónica. De forma similar, los polígonos y círculos amarillos representan la proyección superficial y los eventos considerados en la subducción intraplaca, separados en la trinchera de La Española Norte (NHT) y en la trinchera de Puerto Rico (PRT). Los puntos negros muestran dónde ocurren los segmentos de las fallas.

Global Earthquake Model

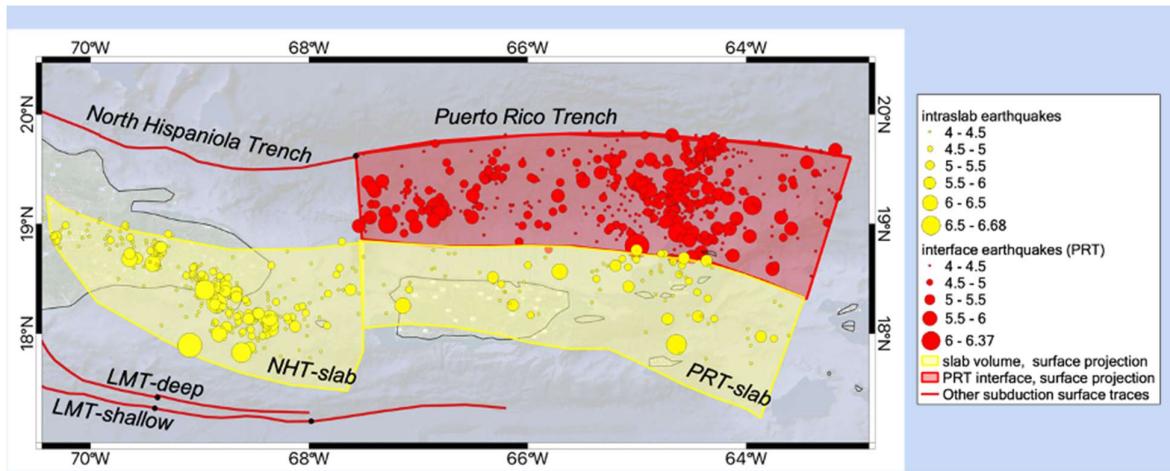


Figura 7. Geometría y eventos considerados en la caracterización de la subducción interface e intraplaca.

La sismicidad en la intraplaca de subducción de las trincheras de La Española Norte y Puerto Rico se modelaron con rupturas no paramétricas restringidas al volumen de la placa de subducción, y se consideró una incertidumbre epistémica en las tasas generadas por una distribución uniforme en contra de una distribución basada en ocurrencias pasadas. Por ejemplo, la Figura 8 presenta las tasas de sismicidad intraplaca generadas para la trinchera de Puerto Rico, donde las tasas se suavizan 10% uniformemente y 90% según el núcleo (izquierda), y 90% uniformemente y 10% según el núcleo (derecha). Cada punto representa un hipocentro de ruptura y está coloreado por la tasa acumulativa de todos los terremotos asignados a esa ruptura.

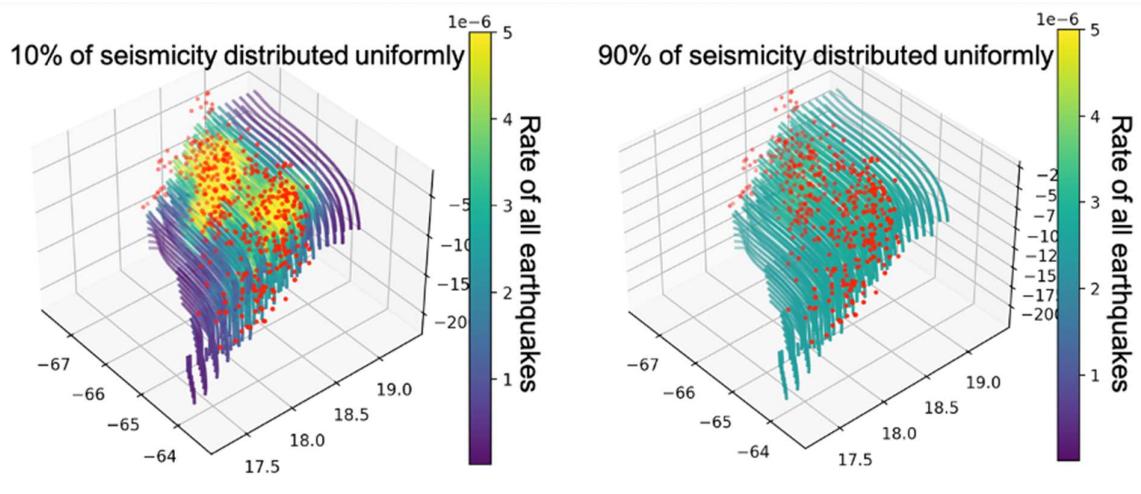


Figura 8. Tasas de sismicidad intraplaca generadas para la trinchera de Puerto Rico con diferentes porcentajes de participación de la sismicidad distribuida.

1.2 Modelos de movimiento del terreno

La caracterización del movimiento del suelo utiliza el modelo desarrollado en el proyecto CCARA (el modelo del Caribe y América Central, CCA). Para este caso se seleccionaron las ecuaciones de

Global Earthquake Model

atenuación, GMPEs, más apropiadas para cada ambiente tectónico (es decir, fuentes corticales, intraplaca e interface de subducción), 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 preseleccionadas 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.

Interface de subducción	Peso
AbrahamsonEtAl2015SInter	0.33
ZhaoEtAl2006SInter	0.33
YoungsEtAl1997SInter	0.34
Subducción intraplaca	Peso
AbrahamsonEtAl2015SSlab	0.33
AtkinsonBoore2003SSlab	0.33
Kanno2006Profundo	0.34
Corteza activa	Peso
AkkarEtAlRjb2014	0.33
CauzziEtAl2014	0.33
AbrahamsonEtAl2014	0.34

Figura 9. Modelos de movimiento del terreno (GMPEs) para cada ambiente tectónico en Colombia y sus correspondientes pesos en el árbol lógico. Fuente: Johnson et al (2022).

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 ($V_{s30} = 800\text{m/s}$). Los valores de amenaza más altos se encuentran cerca de las fallas corticales con mayor actividad: la falla Septentrional en el norte de la República Dominicana y el sistema de fallas Enriquillo-Plantain Garden que divide la península en el suroeste de Haití. A lo largo de estas fallas, el PGA alcanza 0.6 – 0.8 g y 1.2 – 1.7 g para el 10 % y 2 % de probabilidad de excedencia (PoE) en 50 años, respectivamente. Lejos de las fallas principales, la amenaza es menor pero persistente. PGA excede 0.2 y 0.4 g para el 10% y 2% de PoE en 50 años, respectivamente, en la mayor parte de la isla. La amenaza más baja se encuentra en el centro-oeste de Haití.

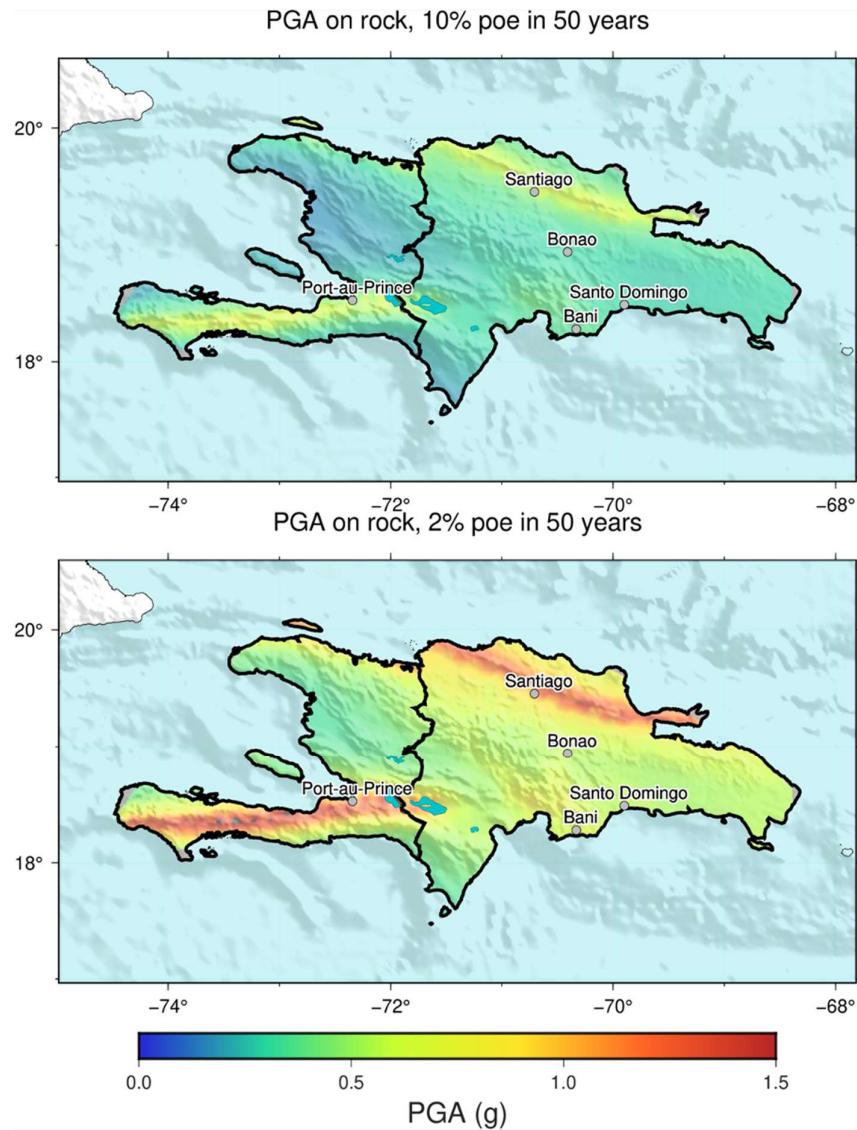


Figura 10. Mapa de aceleración pico-efectiva (PGA) promedio para el 10% (arriba) y 2% (abajo) de probabilidad de excedencia en 50 años en roca ($V_{s30} = 800$ m/s). Fuente: Johnson et al (2022).

La Figura 11 presenta el mapa de amenaza sísmica Santiago, para la aceleración pico efectiva (PGA) promedio para el 10% y 2% de probabilidad de excedencia (PoE) en 50 años en roca ($V_{s30} = 800$ m/s). En general, el peligro aumenta de suroeste a noreste a lo largo de la ciudad, oscilando entre ~0.3 y 0.7 g para la PoE más alta y entre ~0.7 y 1.4 g para la PoE más baja.

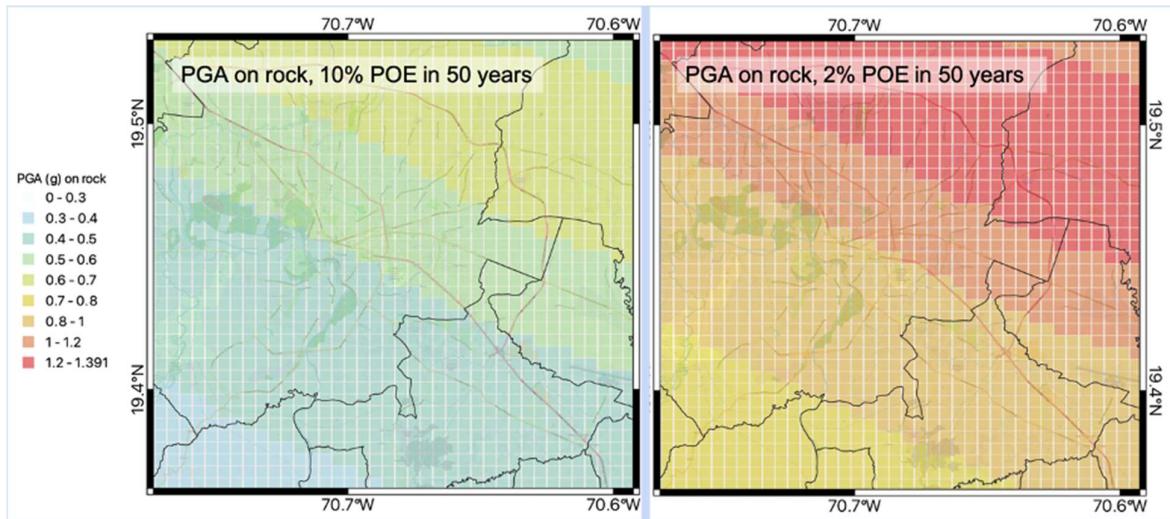


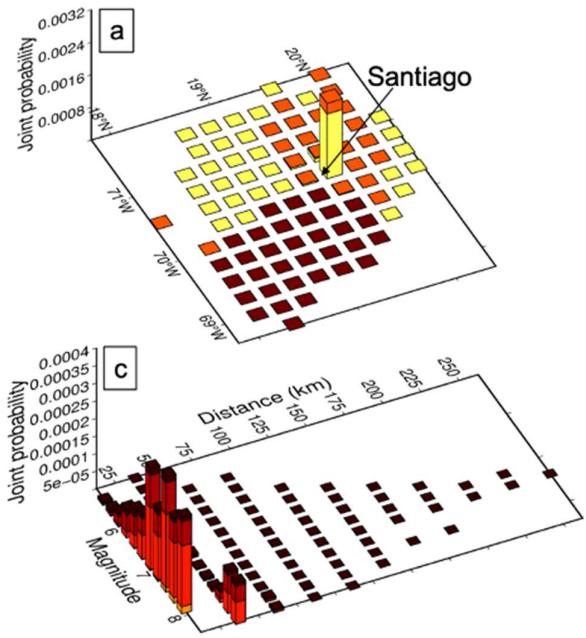
Figura 11. PGA sobre roca en las inmediaciones de Santiago de los Caballeros con (izquierda) 10% y (derecha) 2% POE en 50 años.

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 el centro de la ciudad. El análisis se centró en la aceleración pico-efectiva (PGA) para una probabilidad de excedencia (PoE) del 10% y 2% en 50 años y suelo tipo roca. La Figura 12 muestra los resultados de desagregación para Santiago, revelando que la amenaza para PGA en ambos períodos de retorno (10% y 2% en 50 años correspondientes a 475 y 2475 años) está dominada por fuentes cercanas de la corteza superficial activa con pequeñas contribuciones de la interface de subducción. En particular, las fuentes corticales a menos de 25 km de Santiago y con magnitudes MW entre 6.5 y 8.0 dominan la amenaza. Para una PoE de 2% en 50 años, el impacto de la variable aleatoria GMPE es claro, ya que todas las contribuciones tienen valores positivos grandes (en relación con el rango) de épsilon. De los resultados, inferimos que la falla Septentrional y su falla asociada controlan la amenaza sísmica en Santiago para los períodos de retorno de interés. Las contribuciones de la interface de subducción provienen de la trinchera de La Española Norte pueden tener un mayor impacto cuando se desagregan para otros tipos de medidas de intensidad (es decir, períodos más largos).

Global Earthquake Model

PGA (g), 10% POE in 50 yrs: 0.6g



PGA (g), 2% POE in 50 yrs: 1.2g

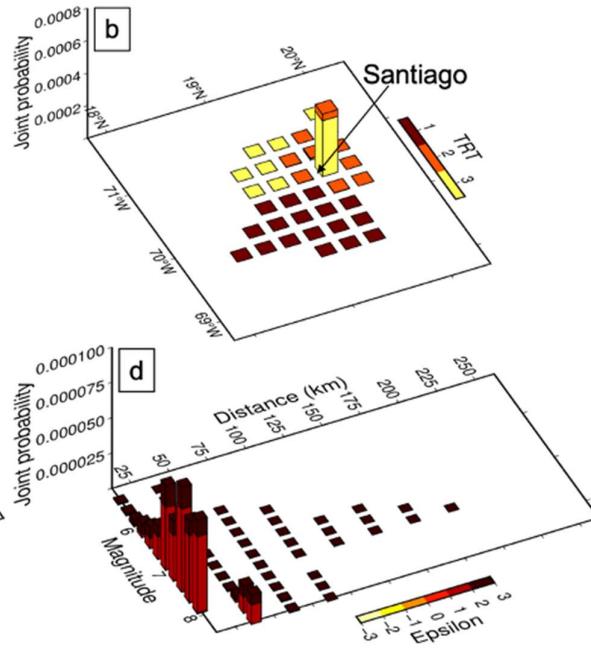


Figura 12. Desagregación de la amenaza sísmica en PGA (en roca) para el 10% (izquierda) y 2% (derecha) de probabilidad de excedencia en 50 años para la ciudad de Santiago. [a] y [b] (arriba) Latitud - Región Tectónica (TRT, 1-marrón: subducción intraplaca, 2-rojo: interface de subducción, y 3-amarillo: corteza superficial activa). [c] y [d] (abajo) Magnitud - Distancia - Épsilon (el término entre eventos GMPE).

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 el municipio de Santiago de los Caballeros 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

Global Earthquake Model

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 $V_s > 760$ m/s.

Para la ciudad de Santiago de los Caballeros se han realizado muy pocos estudios de microzonificación sísmica. El estudio más reconocido es el de Rouillé et al. (2011), del cual se recopiló la caracterización geotécnica y zonación. Rouillé et al. (2011) utiliza datos de 54 perforaciones SPT y 203 mediciones geofísicas (a partir del análisis espectral de ondas superficiales y microtemblores) y se divide la ciudad en 10 microzonas, que abarcan el 99 % de la exposición considerada en este estudio (Figura 13). Para cada zona (a excepción de la zona 8), Rouillé et al. (2011) definió una columna de suelo representativa y asignó propiedades geotécnicas a cada capa, las cuales se utilizan en este estudio. La mayoría de los ocupantes y edificios expuestos se encuentran en las zonas 0, 1 y 6, y la mayor parte del valor económico se encuentra en la zona 8. Dado que el estudio de referencia contiene las columnas de suelo en forma tabulada, incluidos todos los parámetros necesarios, y los perfiles se extienden hasta el lecho rocoso, no fue necesario homogenizar y extender de los perfiles de suelo. Los perfiles más profundos se extienden hasta los 100 m (Figura 14), y el V_{s30} medido en los sitios oscila entre 253 y 800 m/s.

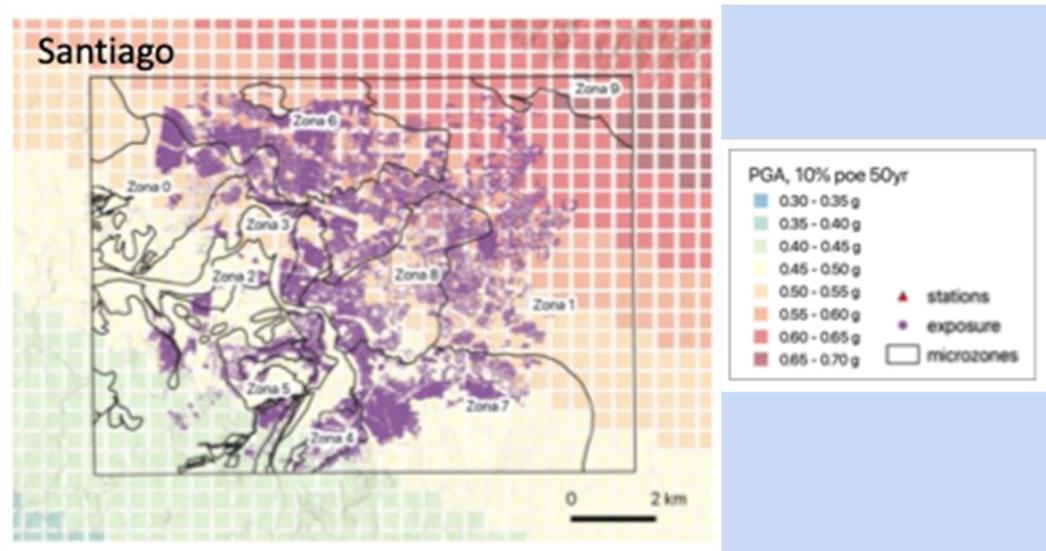


Figura 13. Mapas de amenaza en roca ($V_{s30}=800$ m/s) para PGA con 10% PoE en 50 años, junto con microzonas, estaciones y exposición consideradas en este estudio.

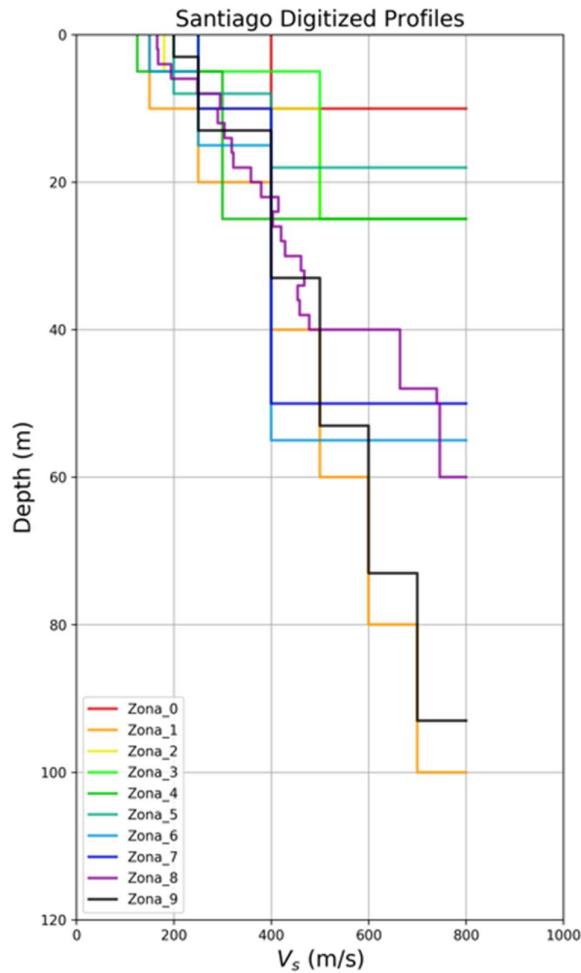


Figura 14. Perfiles V_s de referencia para Santiago (10 perfiles, datos de Rouillé et al., 2011).

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 15 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 16 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

Global Earthquake Model

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 GMPEs. 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.

6.

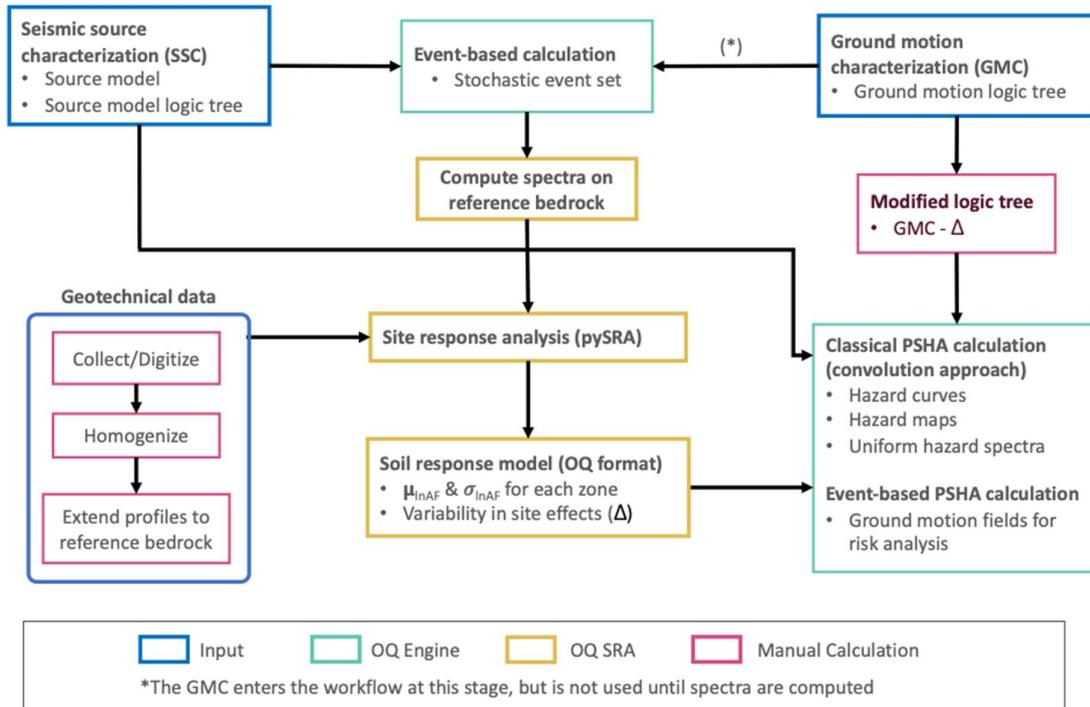


Figura 15. Esquema con metodología para la caracterización de los efectos de sitio.

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

Global Earthquake Model

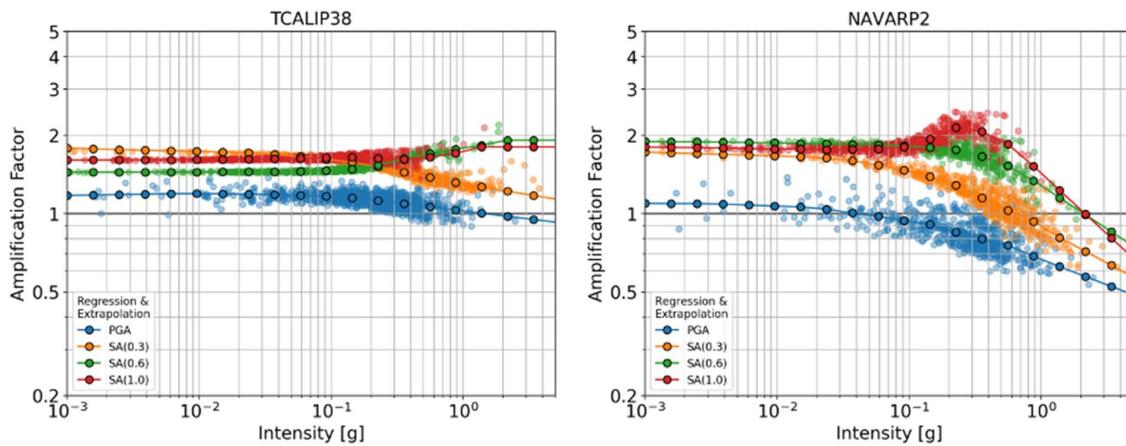


Figura 16. Ejemplo de las funciones de amplificación simuladas para el mismo movimiento de entrada en dos sitios diferentes: a) suelo rígido con $V_{s30}=418\text{m/s}$ (izquierda), y b) suelo blando con $V_{s30}=273\text{ m/s}$ (derecha). Las funciones se estimaron para cuatro períodos (PGA, 0.3, 0.6 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 ($Sa_{\text{superficie}} / Sa_{\text{roca}}$), 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 Santiago se muestra en la Figura 17. Todas las zonas, con excepción de las zonas 1 y 7, se amplifican en todos los períodos e intensidades, alcanzando hasta un factor 4 en la Zona 8 a 1.0 segundo. En todas las zonas, existe una tendencia general de máxima amplificación que se produce a los 0.3 y 0.6 segundos. Enfocándose en las zonas 0, 1, 6 y 8, que son las zonas de mayor impacto en el riesgo, se observa que tienen respuestas notablemente diferentes.

Global Earthquake Model

La zona 1 (arcillas Licey) y la zona 8 tienen la mayor amplificación a intensidades bajas (AFs entre 1 y 3 dependiendo del periodo), mientras que a intensidades altas la zona 8 tiene la mayor amplificación, como se indicó anteriormente. En particular, esta zona no muestra ningún ablandamiento del suelo (a diferencia de las zonas 0, 1 y 6), y la columna de suelo que representa esta zona se caracteriza por un bajo Vs30 (253 m/s) y una alta plasticidad. La Zona 1 tiene la mayor deamplificación de todas las zonas, con PGA deamplificando por encima de 0.1 g, mientras que a 0.3 y 0.6 segundos, la deamplificación se produce por encima de los 0.4 g. En la zona 6 existe una amplia amplificación en todos los periodos e intensidades, especialmente a los 0.6 segundos.

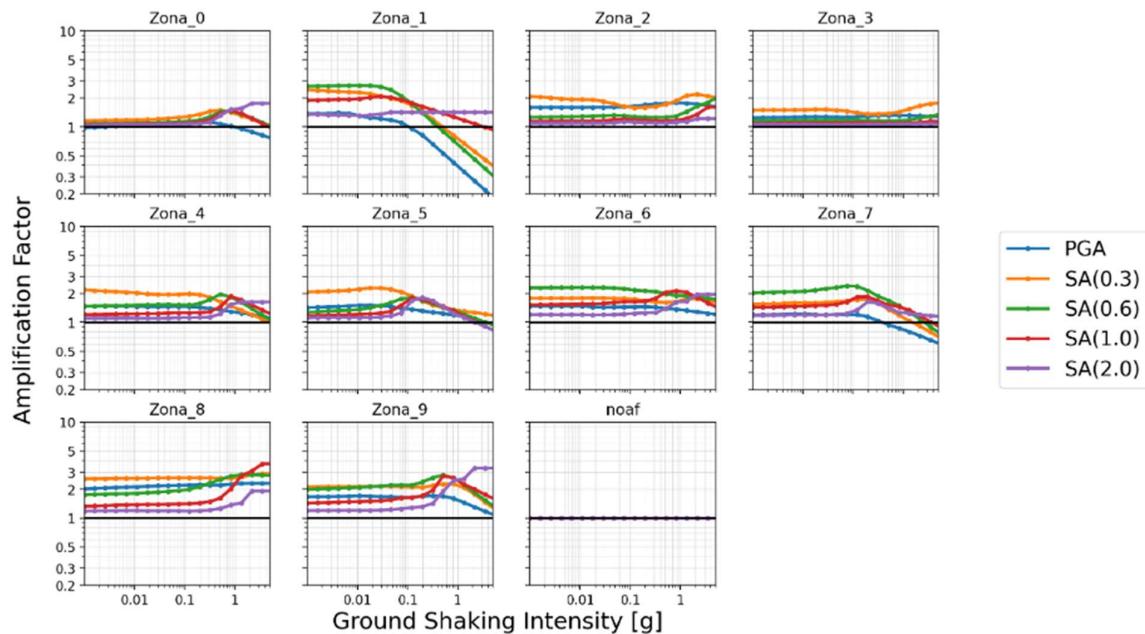


Figura 17. Modelo de respuesta del suelo para Santiago. Funciones de amplificación (AF) indicando la mediana en cada zona homogénea para diferentes períodos.

En Santiago, sólo una comparación general con los resultados de Rouillé et al. (2011) (Figuras 20–35) es posible, porque ese estudio solo calculó espectros de respuesta en la superficie (no hay funciones de amplificación) en función del período. Rouille et al. (2011) realizó análisis de la respuesta de sitio lineal equivalente 1D usando CyberQuake y 8 series de tiempo. No se encontró justificación para agrupar las 10 zonas en 5 clases como se hizo en el estudio (Figura 37), pero sí se observaron algunas similitudes con sus resultados. Similar a Rouillé et al. (2011), se encontró que la zona 0 tiene la respuesta más plana. En contraste con sus resultados, también se observó respuestas moderadas (es decir, $AF < \sim 2$) en las zonas adyacentes (2, 3, 4), que están todas en el oeste de la ciudad, donde las respuestas máximas ocurren en ~ 0.3 segundos. En el este de la ciudad (zonas 1, 7, 8, 9), se encuentran amplificaciones más pronunciadas en períodos más largos (0.3 a 0.6 segundos), lo que en general está de acuerdo con los espectros finales propuestos por Rouillé et al. (2011) (Figura 35). Esto

Global Earthquake Model

probablemente se debe a la presencia de arcillas en el este de la ciudad, que tienden a amplificar el movimiento de períodos más largos, un hallazgo que también se reitera en Llorente et al. (2017).

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, el cual está disponible 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

La ciudad de Santiago de los Caballeros tiene un gran valor patrimonial y económico para la región Cibao Norte de la República Dominicana, siendo uno de los polos industriales más grandes del Caribe. Siendo la tercera ciudad más grande del país, se estima que su aporte al P.I.B dominicano está entre el 15% y el 18% (BID 2015), concentrando una de las principales fuentes de empleo y oferta de servicios educativos y de salud de la República Dominicana. Es también una de las regiones con la mayor tasa de crecimiento demográfico del país. En el 2002 el municipio de Santiago concentraba 553 mil habitantes, alrededor del 6.2% de la población nacional (ONE 2002). Actualmente 750 mil personas viven en el municipio de Santiago, más del 6.8% de la población de la República Dominicana y un aumento mayor al 30% con respecto a la década anterior (ONE 2020). Santiago se administra en 6 distritos municipales: Santiago (Cabeceira), Pedro García, Baitoa, La Canela, San Francisco de Jacagua y Hato del Yaque. Dentro del límite urbano de la ciudad vive más del 82% de la población municipal.

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 Oficina del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Santiago. De esta forma obtuvimos conjuntos de datos actualizados de alta resolución sobre el uso del suelo, las características de las estructuras, sus 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 Santiago de los Caballeros se recopilaron más de 10 conjuntos de datos diferentes, incluido el conjunto de datos de referencia del uso del suelo de la ciudad que presenta el propósito económico del suelo por lote. Se recopilaron conjuntos de datos adicionales que contenían la edad de la ciudad, el material de construcción predominante y el número promedio de pisos por cuadra de la ciudad. De estas fuentes se obtuvo toda la información requerida para modelar la exposición.

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 que pertenecen al segundo grupo. Como ambos tipos son bases de datos georeferenciadas (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 suceder 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.

En la Figura 18 proporcionamos un ejemplo de cómo se usaron las variables categóricas para inferir uno o más atributos estructurales, de ocupación y el costo de reemplazo.

Variables categóricas	Atributos estructurales							
	Material	Sistema	Código	Altura	Año	Cubierta	Ocupación	Costo
USO	X	X	X			X		X
MA_CLAS			X	X		X		X
Tipo_Vivienda	X		X					
Alturas		X		X				X
Mat_Pared	X	X		X				
Año	X	X	X		X			
Tipo_Edificacion			X					
Grado Consolidacion								
Mat_Techo							X	
Cal_Constructiva			X					X
Rango				X				

Figura 18. Variables categóricas de la capa constructiva (columna izquierda) utilizadas para identificar uno o más atributos estructurales, de ocupación y costo de reemplazo (filas superiores), por cada estructura identificada en Santiago

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

Global Earthquake Model

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.

3.4 Tipologías o clases constructivas predominantes

De acuerdo con la información más actualizada de las encuestas de hogares (ENAHO, 2018), el material de construcción predominante en Santiago es la mampostería de bloque de concreto y el concreto reforzado. La mampostería tiene diferentes configuraciones que pueden variar desde niveles aceptables de refuerzo hasta refuerzo bajo o nulo. El nivel de refuerzo depende del barrio y región de la ciudad. La mampostería confinada (denominación MCF+CBH en la taxonomía de Brzev et al. 2013) y la mampostería reforzada (MR+CBH) se encuentra comúnmente en unidades de vivienda individuales de uno a dos pisos (HEX:1 y HEX:2) en barrios construidos después de los años 60 y 70 (por ejemplo, La Herradura). Las zonas más nuevas pueden albergar edificios de apartamentos hechos de mampostería de dos a cuatro pisos (HEX:2 a HEX:4). La mampostería de adobe no armada (MUR+ADO) se concentra en el centro histórico de la ciudad (en los barrios Centro de la Ciudad y La Perla). Sin embargo, los apartamentos de concreto reforzado (CR/LWAL) han ganado popularidad en los últimos 10 años y ahora pueden contener hasta el 15% de todo el inventario residencial. Estas edificaciones tienen rangos de altura que van desde los 5 a los 20 pisos. Este tipo de estructuras predominan en barrios de alto nivel socioeconómico, como Cerros de Gurabo y Villa Olga. El acero es ampliamente utilizado para instalaciones industriales y es la principal clase de construcción en la zona industrial de la ciudad (Zona industrial).



Figura 19. Casas de mampostería en estratos socioeconómicos medio y altos en Santiago. Tomadas de Google Maps (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).

Global Earthquake Model

Debe destacarse que en Santiago muchas de las edificaciones en las tipologías constructivas anteriormente mencionadas iniciaron como construcciones informales. La mampostería sin refuerzo (MUR+CBH) es ampliamente utilizada en las construcciones de escasos recursos económicos por ser un material duradero y resistente a la intemperie. Sin embargo, los muros carecen de refuerzo en acero y mantienen su forma debido a que los bloques están pegados con mortero. Según estudios de riesgo previos (DGOT 2009, BID 2016) esta tipología es ampliamente utilizada en las zonas marginales y de baja densidad (i.e. regiones con casas individuales de uno o dos pisos). Se encuentra distribuida en toda la ciudad, en zonas con niveles socioeconómicos bajos y precarios. La construcción informal emplea materiales fuera la norma (e.g. bloques de concreto de baja calidad o materiales de desecho) configuraciones no apropiadas (e.g. paños de mampostería de longitud y altura no permitida, voladizos en segunda planta), y sistemas constructivos vulnerables a los sismos (e.g. muros sin refuerzo, muros sin confinamiento, pisos blandos). Aunque hay un nuevo código sísmico para la República Dominicana, muchas edificaciones aún carecen de provisiones adecuadas para soportar sismos destructivos. En el pasado, las grandes construcciones han seguido lineamientos existentes, como la normativa sismorresistente de los Estados Unidos (como las normativas del Instituto Norteamericano del Concreto - ACI) para asegurar su calidad estructural. Sin embargo, gran parte de la construcción residencial no sigue a cabalidad las normas constructivas previas o vigentes. Esta alta informalidad constructiva fue considerada en la clasificación de las estructuras de la ciudad. Como resultado directo, una parte considerable de las edificaciones fueron clasificadas en clases constructivas con un bajo nivel de desempeño sísmico, lo cual es un factor agravante del riesgo sísmico.



Figura 20. Casa de mampostería sin confinamiento ni refuerzo visible en el proceso constructivo. Tomadas de Google Maps (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).

3.5 Modelo de exposición de la ciudad

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 barrios. También proveemos estadísticas referentes al tamaño y costo promedio de las edificaciones de la ciudad, la cual puede ser de gran ayuda en investigaciones futuras. Por último, hacemos una presentación de la exposición por zonificación sísmica, la cual ayuda a dimensionar lo que se encuentra en riesgo en las diferentes clasificaciones del suelo de la ciudad.

El conjunto de datos de exposición para Santiago tiene más de 126 mil estructuras y 750 mil ocupantes. En el proceso de modelado se identificaron más de 160 clases de edificios diferentes. Este conjunto de datos también incluye activos residenciales, comerciales, industriales, sanitarios, institucionales y educativos de los sectores público y privado. El valor total de reemplazo de la ciudad fue estimado en 25 mil millones de dólares o 1,394 mil millones de pesos dominicanos (RD\$). El modelo de exposición considera 114 barrios del área metropolitana y de los distritos municipales aledaños de Canabacoa, Las Palomas, Puñal, Licey al medio, San Francisco y Tamboril. Hay un total de 443 vecindarios considerados. En lo referente a la distribución demográfica en la ciudad por región administrativa, los barrios con más ocupantes son Cienfuegos, Monte Rico, Villa Olímpica, Los Jazmines y Pekín. Por otro lado, los barrios con la mayor concentración de capital económico y productivo son Los Cerros del Gurabo, Villa Olga, La Herradura y Los Reyes. La Figura 21 muestra la distribución espacial de los edificios y el valor expuesto en cada barrio de la ciudad.

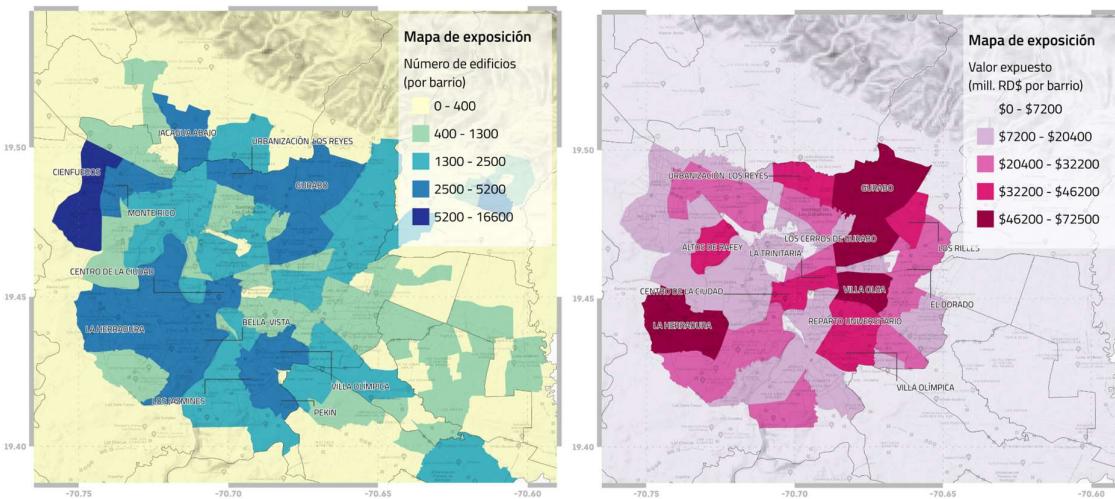


Figura 21. Distribución del número de edificaciones y el valor económico de la ciudad a nivel de barrio.

Global Earthquake Model

Gran parte del trabajo para Santiago se enfocó en actualizar los costos de reposición para la ciudad tomando en cuenta el incremento en los costos de construcción provocado por la alta demanda de vivienda en el país en la última década. En valores actuales, los costos de reposición por metro cuadrado en la ciudad oscilan entre 340 USD/m² y 770 USD/m² para activos residenciales, dependiendo de la calidad de construcción y acabados. Los costos para los sectores de educación y salud se encuentran entre los más altos, y oscilan entre 490 USD/m² y 1500 USD/m². La Tabla 2 muestra las estadísticas principales del tamaño y valor de reemplazo por el tipo de ocupación en la ciudad.

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

Uso	Valor expuesto (millones RD\$)	Área promedio (m ²)	Valor mínimo (RD\$/m ²)	Valor máximo (RD\$/m ²)	Valor promedio (RD\$/m ²)
Comercial	\$ 68,223	382	\$ 18,700	\$ 82,500	\$ 22,980
Educativo	\$ 45,246	3,589	\$ 18,700	\$ 42,350	\$ 31,821
Salud	\$ 21,779	1,600	\$ 82,500	\$ 82,500	\$ 82,500
Industrial	\$ 46,862	6,273	\$ 18,700	\$ 26,950	\$ 22,024
Institucional	\$ 24,397	4,126	\$ 18,700	\$ 31,075	\$ 23,070
Mixto	\$ 269,492	540	\$ 18,700	\$ 82,500	\$ 23,479
Residencial	\$ 915,331	360	\$ 18,700	\$ 42,350	\$ 22,715
Deportivo	\$ 2,833	7,407	\$ 18,700	\$ 26,950	\$ 24,750
Total ciudad	\$ 1,394,164	421	\$ 18,700	\$ 82,500	\$ 22,952

La distribución de la población y el valor de reemplazo por zona sísmica (BRGM, 2011) en el municipio se presenta en la Figura 22. Santiago tiene cuatro zonas con una concentración de habitantes significativa: Zona 0, Zona 1, Zona 6 y Zona 7 y MSQ2. Estas concentran más de 100 mil edificaciones, 900 mil millones de pesos y más de medio millón de habitantes (el 65% de la exposición de la ciudad considerada en este estudio).

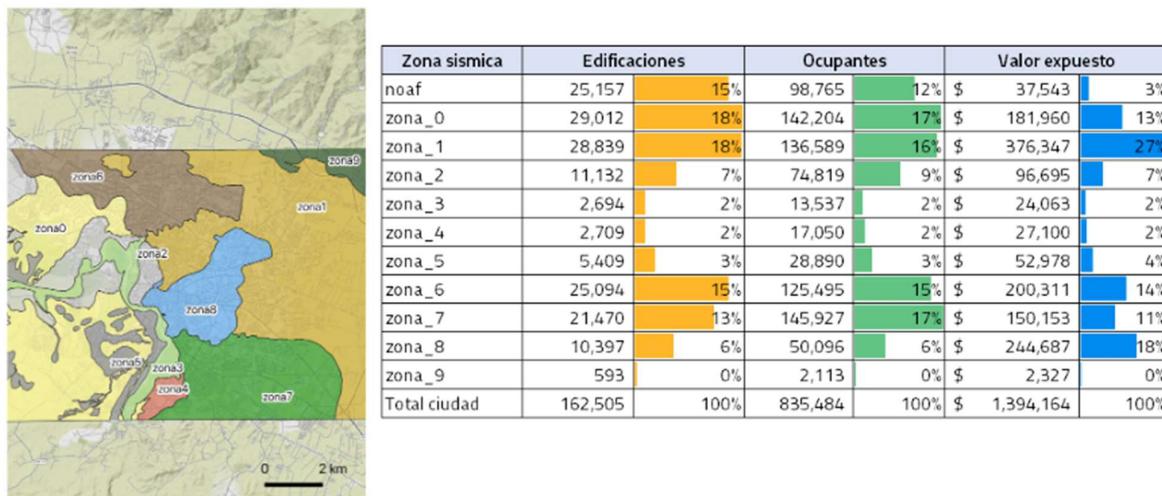


Figura 22. Distribución del número de edificaciones, los ocupantes y el valor expuesto de la ciudad por zona sísmica propuesta en el estudio de BRGM (2011).

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. En el caso de Santiago, la disponibilidad de modelos aún se limita a relaciones empíricas que no son adecuadas para estimaciones de pérdidas económicas o humanas. 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 23, que presenta dos modelos de fragilidad. En el panel superior, para mampostería reforzada (MR) y pórticos de concreto reforzado llenos de mampostería (CR/LFNF), 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 Yépés-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

Global Earthquake Model

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”.

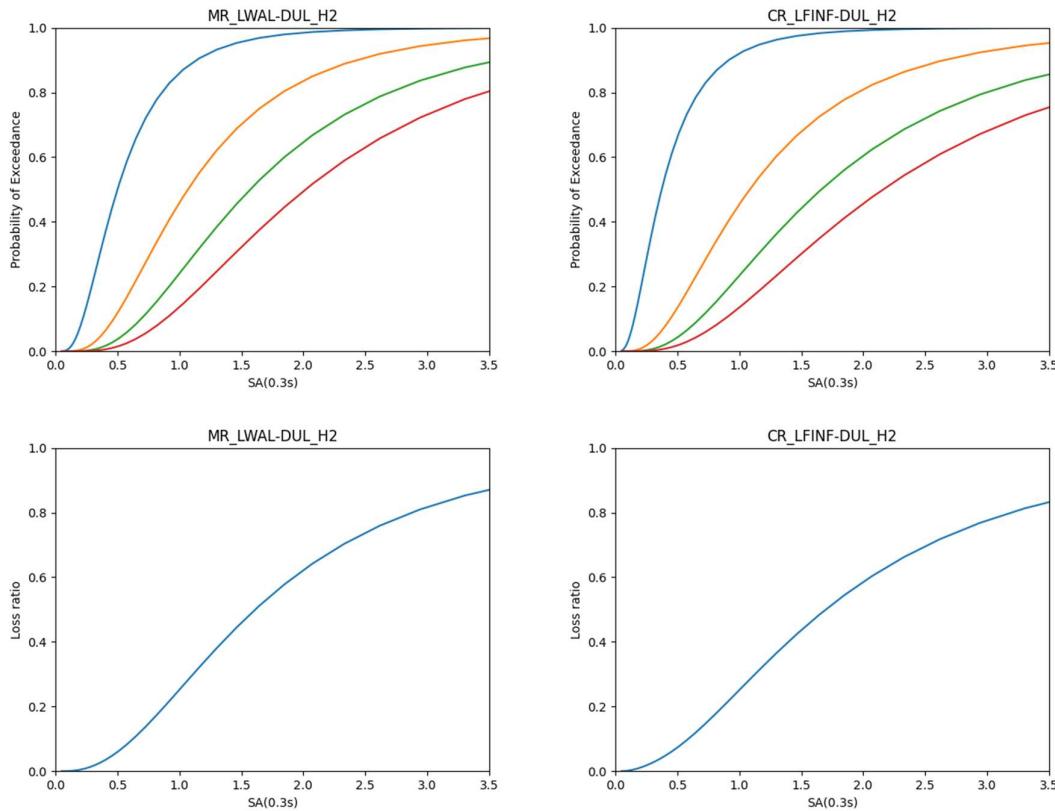


Figura 23. (Arriba) Modelos de fragilidad utilizados para la estimación de daños en edificios para mampostería reforzada (MR) y pórticos de hormigón armado (CR) de baja ductilidad esperada (DUL) y altura de dos pisos (HEX:2). (Abajo) Modelos de vulnerabilidad estructural utilizados para la estimación 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

Global Earthquake Model

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 (leve, 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 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 Santiago utilizamos un total de 83 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 1.1). Los modelos de movimiento del terreno en combinación con las funciones de amplificación para la ciudad (Sección 1.2 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.

Global Earthquake Model

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 y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La selección incluye escenarios históricos de interés para el municipio de Santiago dado el nivel de daño y la cercanía con la ciudad. También incluye escenarios posibles identificados a través del proceso de desagregación que son relevantes para la preparación ante desastres probables, todos provenientes de la Falla Septentrional que gobierna la amenaza sísmica en la parte norte de Isla Española. Este documento proporciona un resumen de la metodología y los eventos seleccionados para la ciudad. El reporte anexo "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

La República Dominicana tiene una larga historia de terremotos destructivos que han afectado severamente la región norte de la Isla de la Española. En 1562, un terremoto de magnitud 7,7 (Mw) en la Falla Septentrional del norte de la isla destruyó las localidades nororientales de Santiago de los Caballeros y Concepción de La Vega, en lo que hoy es República Dominicana. En 1842, otro fuerte evento en el norte (Mw 7,6) causó daños irreparables en Cap Haitien y Port-de-Paix, en Haití, perdiendo la antigua ciudad la mitad de su población en el evento. En 1946 se produjo un terremoto de Mw 8.0 en la provincia de Samaná, República Dominicana, que provocó un saldo estimado de más de 100 muertos y otras 20,000 personas perdieron sus viviendas en las localidades de Samaná y Puerto Plata. Por ende el trabajo de selección de escenarios se enfocó en emplear escenarios históricos con información disponible sobre su intensidad, o en su defecto, obtener del proceso de desagregación eventos con el mismo potencial destructivo para la ciudad que los eventos pasados.

Como resultado modelamos 4 escenarios históricos para los cuales el USGS tiene simulaciones de la intensidad. Estos son el terremoto de Samaná de 1946, los terremotos de Puerto Plata de 1953 y 2003, y el terremoto de Haití de 2010. Los primeros son eventos con alto potencial destructivo para la

Global Earthquake Model

ciudad de ocurrir en la actualidad. El terremoto de Haití fue seleccionado para explorar cómo diferentes simulaciones del evento pueden resultar en un riesgo para la República Dominicana. Modelamos también cuatro escenarios identificados por el USGS mediante el proceso de desagregación de la amenaza. La amenaza sísmica de la ciudad de Santiago está gobernada en su mayoría por eventos cuyo origen es la Falla Septentrional. Este sistema puede producir sismos con magnitudes que van desde Mw 6.0 a Mw 7.5, los cuales pueden darse muy cerca del centro urbano. Por consiguiente los eventos hipotéticos para Santiago son cuatro rupturas en diferentes puntos de la Falla Septentrional. La Tabla 3 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 Santiago. 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	Falla Septentrional (oeste)	6	9
2	Falla Septentrional (central)	6.5	9
3	Falla Septentrional (central)	7.5	9
4	Falla Septentrional (oeste)	7.5	9
5	Terremoto de 1953	6.6	16.7
6	Terremoto de 1946	7.5	15
7	Terremoto de 2003	6.4	10
8	Terremoto de Haití de 2010	7	13

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

Global Earthquake Model

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 barrio, el índice representa el porcentaje de edificios expuestos en el barrio 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 principal en términos de edificaciones, población y valor económico expuesto de la ciudad (ver la Figura 24).



Figura 24. 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 zonas de la ciudad, 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 (ver la Figura 25).

Global Earthquake Model

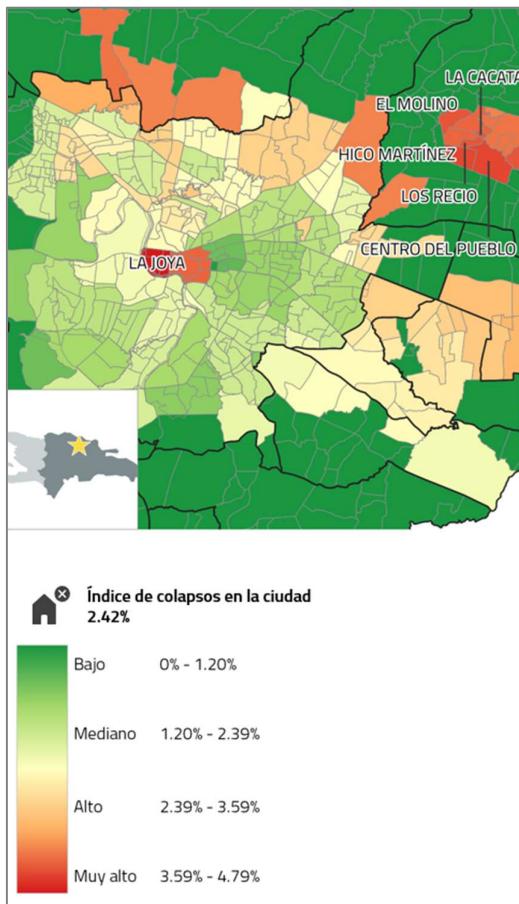


Figura 25. Ejemplo del mapa con la distribución del daño debido al evento, resaltando las comunidades más vulnerables, considerando la fragilidad física de sus estructuras, las características del suelo local y las características de la ruptura modelada.

Tabla de comunidades en alto riesgo: Presenta una tabla con los barrios más impactados por el sismo, de acuerdo con el índice de daño promedio obtenido de todas las simulaciones del evento. Esta tabla destaca las otras métricas de riesgo obtenidas para cada comunidad: el promedio de fatalidades, el promedio de heridos de gravedad, el promedio desplazados y el promedio de pérdidas económicas (ver la Figura 26).

BARRIOS EN ALTO RIESGO					
Barrios	Índice de colapsos	Fatalidades	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mill. DOP)
LA JOYA	4.79%	55	1399	5107	8796
CENTRO DEL PUEBLO	4.39%	39	1453	5188	1605
HICO MARTÍNEZ	4.36%	16	602	2148	680
EL MOLINO	4.26%	1	55	194	44
LA CACATA	4.25%	3	107	385	113
LOS RECIO	4.24%	6	244	874	179
MANOLO DÁIER	4.20%	8	375	1338	387

Figura 26. 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 (ver el ejemplo en la Figura 27).

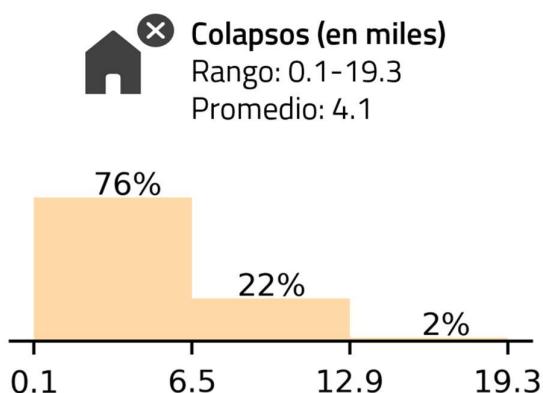


Figura 27. Ejemplo de un histograma de colapsos en la ciudad debido al evento, mostrando el rango de resultados obtenidos para todas las simulaciones. En este ejemplo, el 76% de las simulaciones resultaron en menos de 6,500 colapsos. Menos del 2% resulta en más de 12,900 colapsos. El promedio indica 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.

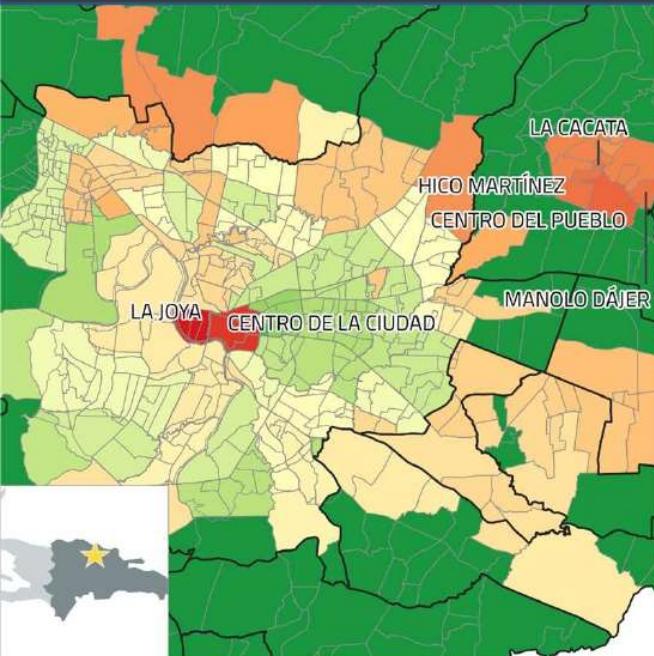


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 7.5 – 9KM PROFUNDIDAD

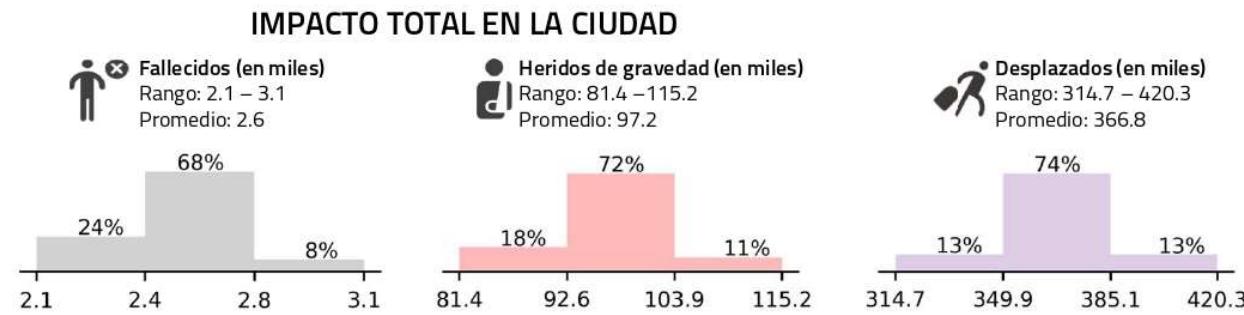
ORIGEN: FALLA SEPTENTRIONAL (CENTRAL)



Índice de colapsos en la ciudad
3.80%



Colapsos (en miles)
Rango: 5.2 – 7.4
Promedio: 6.2



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

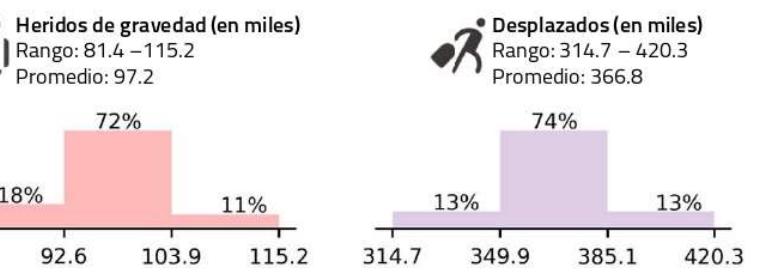
Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>

POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS							
	Población 800 mil		Edificios Residenciales 154 mil		Edificios Comerciales 7 mil		Edificios Educativos 454
	Edificios Industriales 279		Edificios de Salud 454		Edificios de Gobierno 211		Capital expuesto 1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	6.78%	79	1972	6645	11287
CENTRO DE LA CIUDAD	6.40%	57	1466	5008	22864
CENTRO DEL PUEBLO	5.77%	51	1903	6449	1970
HICO MARTÍNEZ	5.73%	21	787	2668	834
MANOLO DÁJER	5.68%	11	506	1704	486
LA CACATA	5.66%	4	143	485	141
LOS RECIO	5.63%	8	323	1098	221
VALENTÍN	5.51%	5	248	837	261
DON MANUEL	5.49%	5	273	923	324
LOS POLANCO	5.49%	2	122	407	279
VISTA ALEGRE	5.48%	13	954	3189	676
CARLOS DÍAZ	5.46%	2	116	390	183
EL MOLINO	5.43%	2	70	237	53
LA CIÉNAGA	5.36%	7	752	2510	617
MONCADA	5.33%	2	167	560	121

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

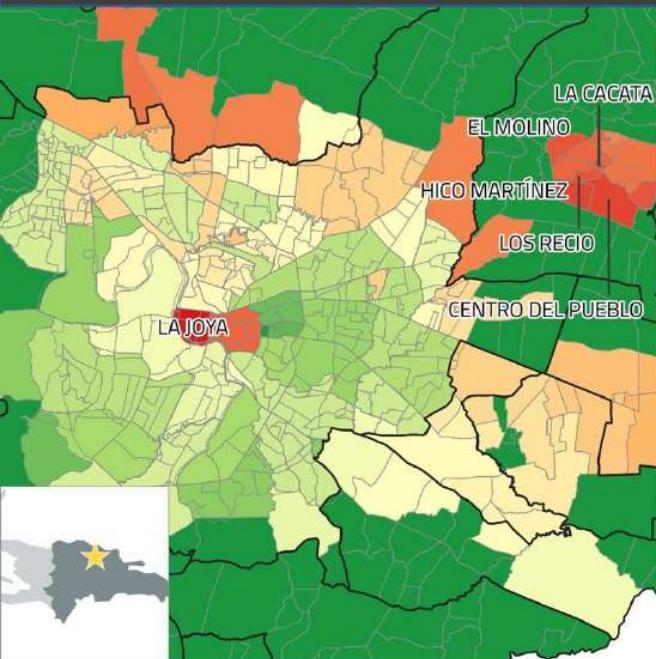


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.5 – 9KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: FALLA SEPTENTRIONAL (CENTRAL)



Índice de colapsos en la ciudad
2.42%



POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS							
	Población 800 mil		Edificios Residenciales 154 mil		Edificios Comerciales 7 mil		Edificios Educativos 454
	Edificios Industriales 279		Edificios de Salud 454		Edificios de Gobierno 211		Capital expuesto 1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	4.79%	55	1399	5107	8796
CENTRO DEL PUEBLO	4.39%	39	1453	5188	1605
HICO MARTÍNEZ	4.36%	16	602	2148	680
EL MOLINO	4.26%	1	55	194	44
LA CACATA	4.25%	3	107	385	113
LOS RECIO	4.24%	6	244	874	179
MANOLO DÁJER	4.20%	8	375	1338	387
VALENTÍN	4.13%	4	186	664	209
DON MANUEL	4.12%	4	206	732	260
CENTRO DE LA CIUDAD	4.09%	37	943	3546	16037
CARLOS DÍAZ	4.09%	2	87	309	147
LA CIÉNAGA	4.05%	6	570	2002	498
VISTA ALEGRE	4.02%	9	702	2481	533
LOS POLANCO	3.99%	1	89	315	219
MONCADA	3.99%	2	125	443	97

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

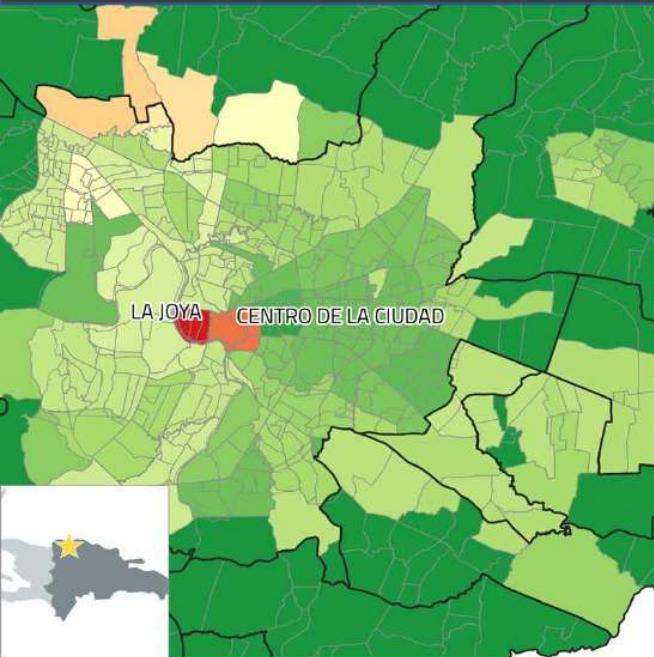


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

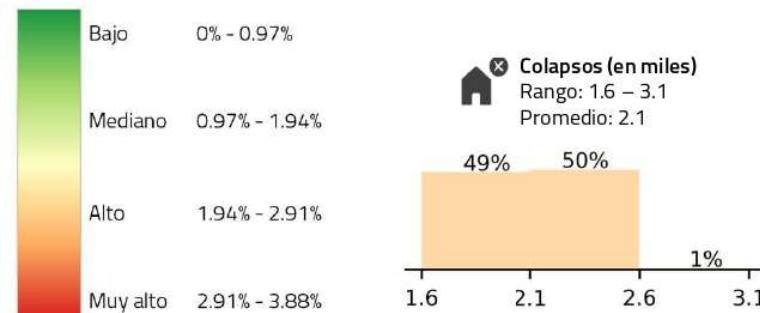
ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 7.5 – 9KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: FALLA SEPTENTRIONAL (OESTE)



Índice de colapsos en la ciudad
1.29%



Barrios

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	3.88%	45	1145	4387	7603
CENTRO DE LA CIUDAD	3.30%	29	747	2932	14182
LA CIÉNAGA	2.44%	3	346	1340	344
CALLEJÓN DE LOS SÁNCHEZ	2.44%	7	379	1518	674
JACAGUA ABAJO	2.27%	12	1012	3998	1397
LOS CAMPECHES	2.20%	1	77	309	162
ESPAILLAT	1.93%	9	212	983	2645
MONTE RICO	1.90%	89	2256	10427	5189
JACAGUA AL MEDIO	1.85%	6	379	1542	809
LOS MORÁN	1.74%	0	13	59	496
LOS CIRUELITOS	1.65%	2	54	258	1441
BUENOS AIRES	1.61%	13	374	1763	2291
ALTOS DE RAFAY	1.58%	7	350	1530	6553
LOS SALADOS	1.58%	25	632	3016	1742
ENSANCHE LIBERTAD	1.55%	24	685	3283	4974

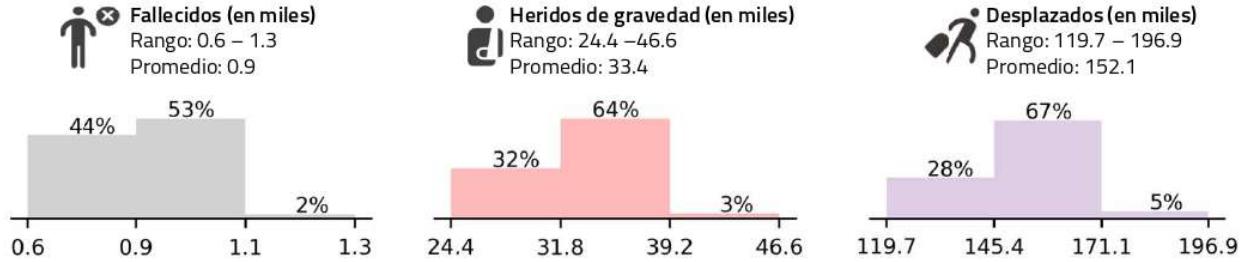
POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS

	Población	Edificios Residenciales	Edificios Comerciales	Edificios Educativos	Edificios Industriales	Edificios de Salud	Edificios de Gobierno	Capital expuesto
	800 mil	154 mil	7 mil	454	279	454	211	1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	3.88%	45	1145	4387	7603
CENTRO DE LA CIUDAD	3.30%	29	747	2932	14182
LA CIÉNAGA	2.44%	3	346	1340	344
CALLEJÓN DE LOS SÁNCHEZ	2.44%	7	379	1518	674
JACAGUA ABAJO	2.27%	12	1012	3998	1397
LOS CAMPECHES	2.20%	1	77	309	162
ESPAILLAT	1.93%	9	212	983	2645
MONTE RICO	1.90%	89	2256	10427	5189
JACAGUA AL MEDIO	1.85%	6	379	1542	809
LOS MORÁN	1.74%	0	13	59	496
LOS CIRUELITOS	1.65%	2	54	258	1441
BUENOS AIRES	1.61%	13	374	1763	2291
ALTOS DE RAFAY	1.58%	7	350	1530	6553
LOS SALADOS	1.58%	25	632	3016	1742
ENSANCHE LIBERTAD	1.55%	24	685	3283	4974

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

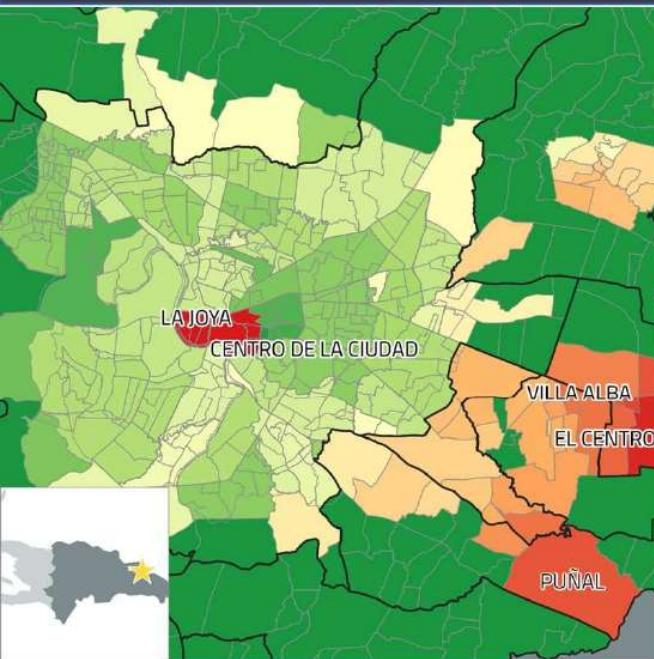


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 7.5 – 15KM PROFUNDIDAD

TERREMOTO DE 1946



Índice de colapsos en la ciudad
0.93%

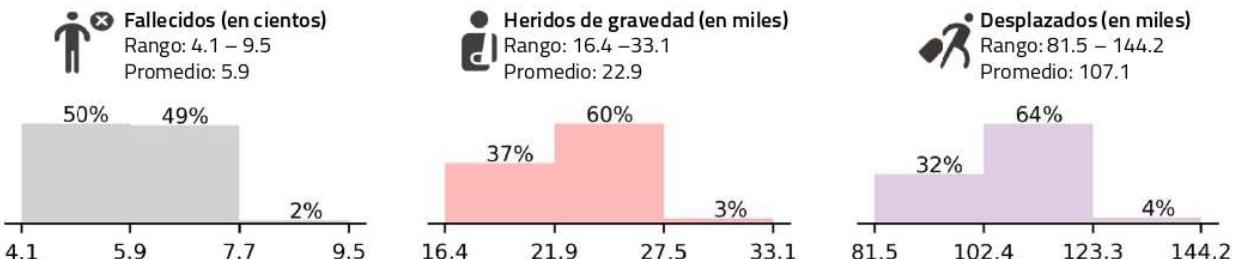


POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS							
	Población 800 mil		Edificios Residenciales 154 mil		Edificios Comerciales 7 mil		Edificios Educativos 454
	Edificios Industriales 279		Edificios de Salud 454		Edificios de Gobierno 211		Capital expuesto 1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	2.26%	26	669	2810	5112
CENTRO DE LA CIUDAD	2.25%	20	510	2135	10425
EL CENTRO	2.15%	8	276	1122	835
VILLA ALBA	2.06%	1	39	157	67
PUÑAL	2.00%	7	555	2199	936
LA CRUZ DE MARÍA FRANCISCA	2.00%	1	49	199	115
URBANIZACIÓN LAS ESMERALDAS	1.99%	0	9	35	28
LOS OSORIAS	1.93%	1	53	214	178
LOS CRUCES	1.88%	0	10	39	71
LAS PALOMAS ARRIBA	1.87%	3	129	520	265
COLORADO	1.87%	3	131	531	390
LIMONAL ARRIBA	1.83%	4	235	948	427
LOS RODRÍGUEZ	1.81%	2	120	490	243
LOS CASTILLOS	1.75%	1	73	298	225
LOS ARITAS	1.74%	2	224	901	243

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

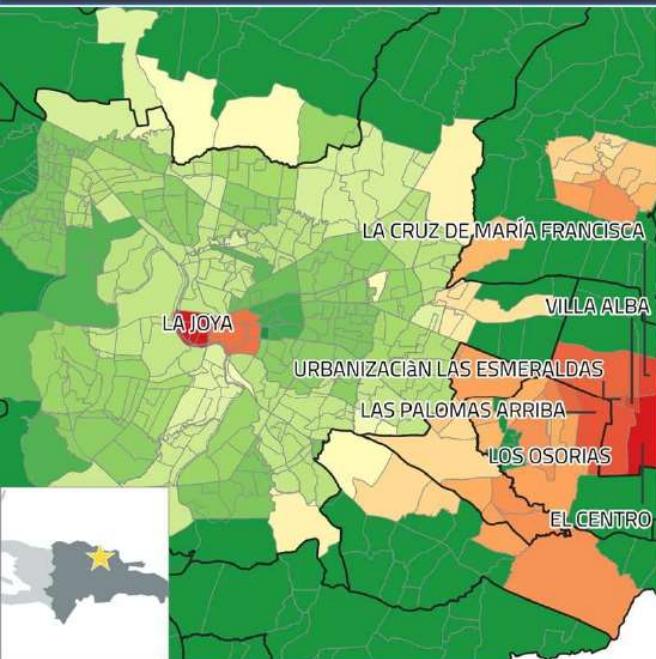


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.6 – 16.7KM PROFUNDIDAD

TERREMOTO DE 1953



Índice de colapsos en la ciudad
0.52%



POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS							
	Población 800 mil		Edificios Residenciales 154 mil		Edificios Comerciales 7 mil		Edificios Educativos 454
	Edificios Industriales 279		Edificios de Salud 454		Edificios de Gobierno 211		Capital expuesto 1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	1.33%	15	393	1728	3342
EL CENTRO	1.30%	5	167	701	548
LA CRUZ DE MARÍA FRANCISCA	1.23%	1	30	125	76
VILLA ALBA	1.23%	1	23	97	43
LOS OSORIAS	1.19%	1	33	135	117
LAS PALOMAS ARRIBA	1.18%	2	81	334	177
URBANIZACIÓN LAS ESMERALDAS	1.17%	0	5	21	18
LOS CRUCES	1.14%	0	6	24	46
LIMONAL ARRIBA	1.14%	2	147	604	283
CENTRO DE LA CIUDAD	1.11%	10	256	1151	5774
TRIPLE PLAY	1.06%	1	97	403	67
COLORADO	1.06%	1	75	313	243
PUYAL	1.06%	4	295	1218	548
LAS PALOMAS O CENTRO DEL PUEBLO	1.06%	2	150	619	174
CENTRO DEL PUEBLO	1.05%	10	349	1481	520

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

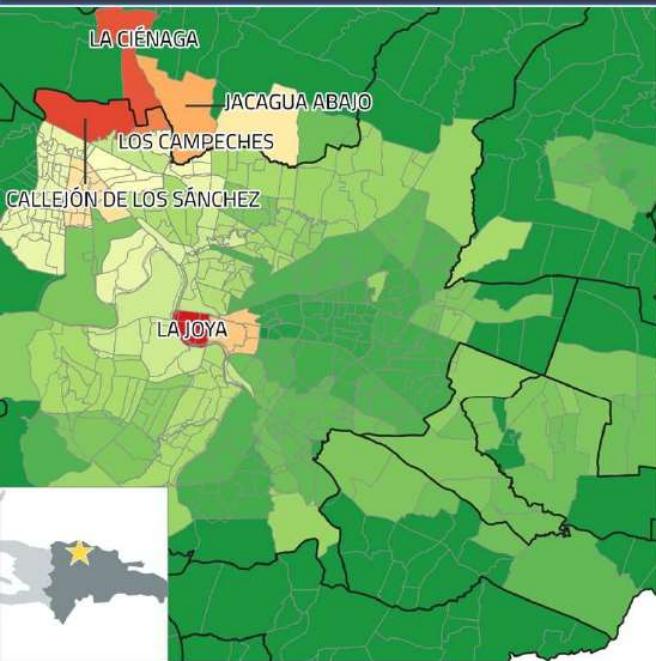


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.0 – 9KM PROFUNDIDAD

ORIGEN: FALLA SEPTENTRIONAL (OESTE)



Índice de colapsos en la ciudad
0.30%

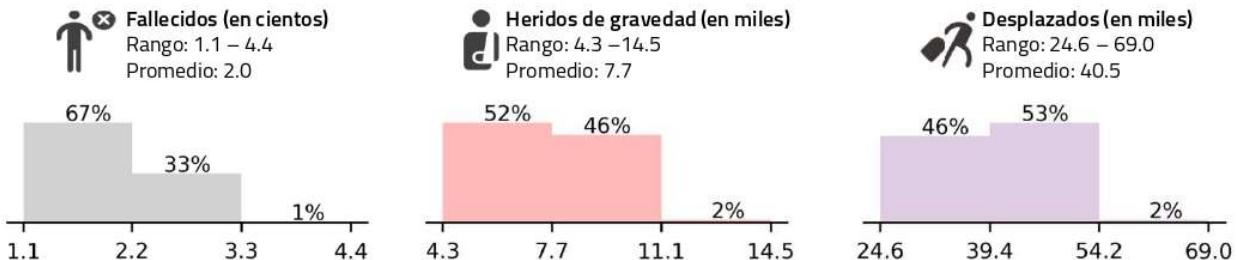


POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS							
	Población 800 mil		Edificios Residenciales 154 mil		Edificios Comerciales 7 mil		Edificios Educativos 454
	Edificios Industriales 279		Edificios de Salud 454		Edificios de Gobierno 211		Capital expuesto 1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	1.01%	12	299	1416	3
CALLEJÓN DE LOS SÁNCHEZ	0.93%	3	146	645	316
LA CIÉNAGA	0.90%	1	128	552	156
LOS CAMPECHES	0.83%	0	29	129	73
JACAGUA ABAJO	0.75%	4	336	1491	580
CENTRO DE LA CIUDAD	0.67%	6	157	781	4207
ESPAILLAT	0.59%	3	66	348	1106
MONTE RICO	0.58%	28	696	3672	2152
JACAGUA AL MEDIO	0.58%	2	119	544	315
LOS MORÁN	0.54%	0	4	20	142
ENSANCHE LIBERTAD	0.48%	7	214	1169	2091
LOS SALADOS	0.48%	7	190	1026	702
CIENFUEGOS	0.45%	22	1455	7036	1461
ALTOS DE RAFAY	0.44%	2	95	478	2413
BUENOS AIRES	0.43%	4	102	551	853

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

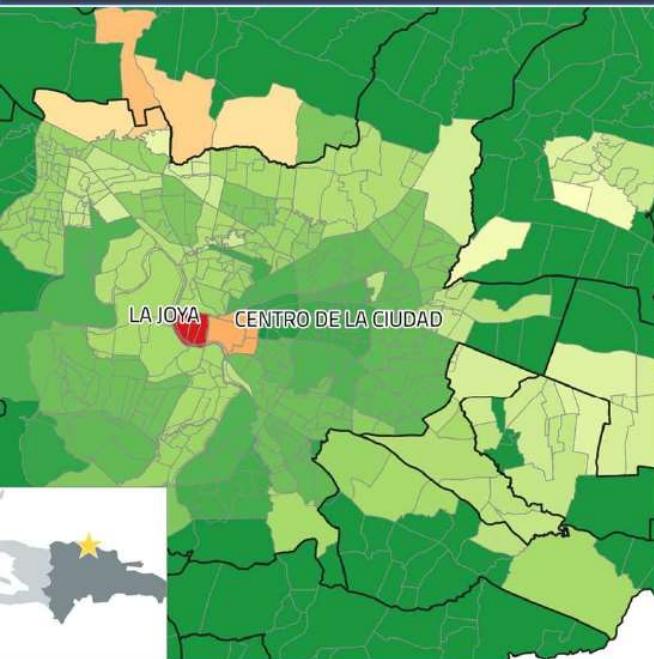


SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

ESCENARIO SISMICO

MAGNITUD 6.4 – 10KM PROFUNDIDAD

TERREMOTO DE 2003



Índice de colapsos en la ciudad
0.21%



POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS							
	Población 800 mil		Edificios Residenciales 154 mil		Edificios Comerciales 7 mil		Edificios Educativos 454
	Edificios Industriales 279		Edificios de Salud 454		Edificios de Gobierno 211		Capital expuesto 1.39 mil mill. \$RD

BARRIOS EN ALTO RIESGO

Barrios	Índice de colapsos	Fallecidos	Heridos de gravedad	Desplazados	Pérdidas económicas (mil mill. \$RD)
LA JOYA	0.72%	8	217	1072	2270
CENTRO DE LA CIUDAD	0.54%	5	126	642	3675
LA CIÉNAGA	0.49%	1	70	320	97
LOS CAMPECHES	0.47%	0	17	77	47
JACAGUA ABAJO	0.46%	3	209	964	396
JACAGUA AL MEDIO	0.43%	1	88	415	250
CALLEJÓN DE LOS SÁNCHEZ	0.42%	1	67	319	173
HICO MARTÍNEZ	0.35%	1	49	241	102
CENTRO DEL PUEBLO	0.33%	3	113	558	234
PONTEZUELA ARRIBA	0.33%	1	68	329	127
LOS MORÁN	0.31%	0	2	12	87
LOS RECIO	0.30%	0	18	88	25
EL MOLINO	0.30%	0	4	19	6
LOS CRUCES	0.30%	0	2	8	18
LIMONAL ARRIBA	0.29%	1	38	185	105

IMPACTO TOTAL EN LA CIUDAD



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

El número de Fallecidos asume la ocurrencia del evento en horario nocturno y el 95% 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.

La contribución del USGS se limitó a la identificación y selección de los escenarios sísmicos para estos perfiles.

Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis del escenario sísmico en el documento Evaluación de Riesgo para la ciudad de Santiago en <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



**AYUNTAMIENTO
MUNICIPIO DE SANTIAGO**
Santiago Orgullo Nuestro



GEM
GLOBAL EARTHQUAKE MODEL
working together to assess risk

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 Santiago 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 1.1) 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 Santiago 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 1.2). 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 los barrios 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 los barrios resaltados en el mapa de colapsos. Las métricas adicionales incluyen el número de personas y valor económico expuesto en los barrios, las fatalidades anuales promedio, y las pérdidas económicas anuales promedio.

Gráfico de riesgo anualizado: El riesgo anualizado por tipología constructiva se muestra en forma de una gráfica de barras. Las tipologías que más contribuyen 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 tipologías 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),

Global Earthquake Model

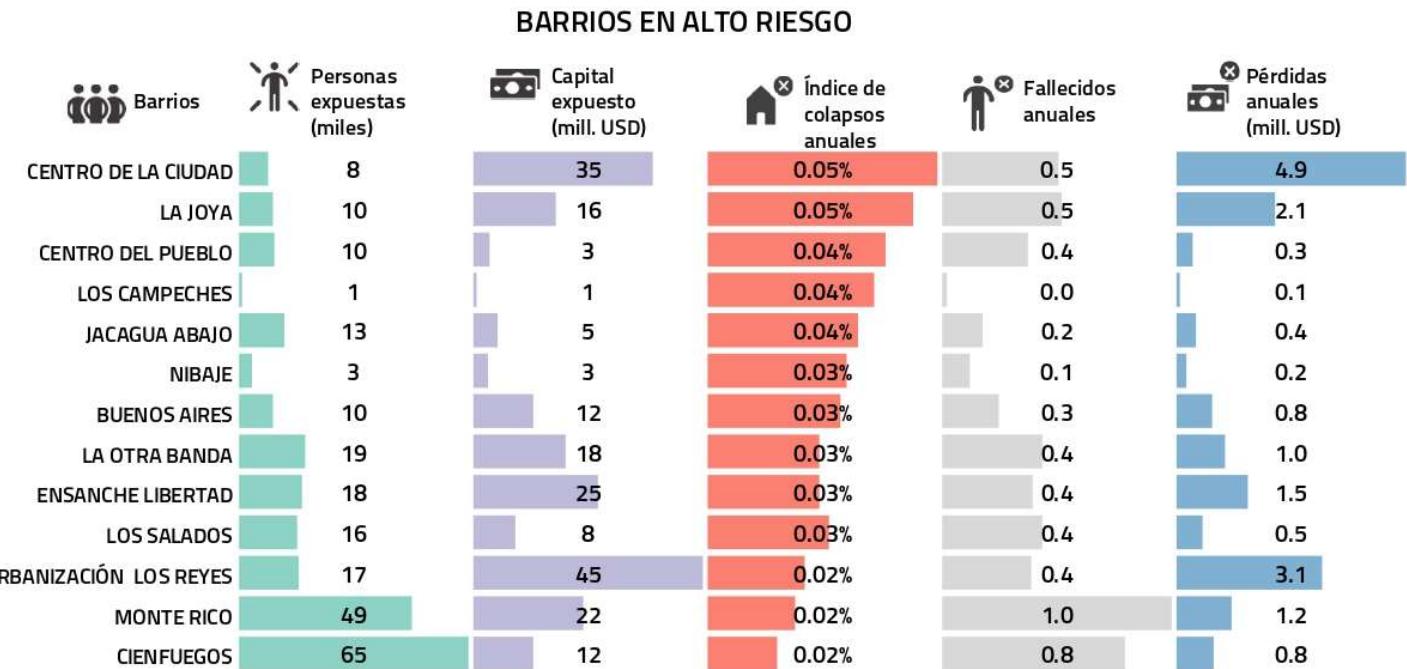
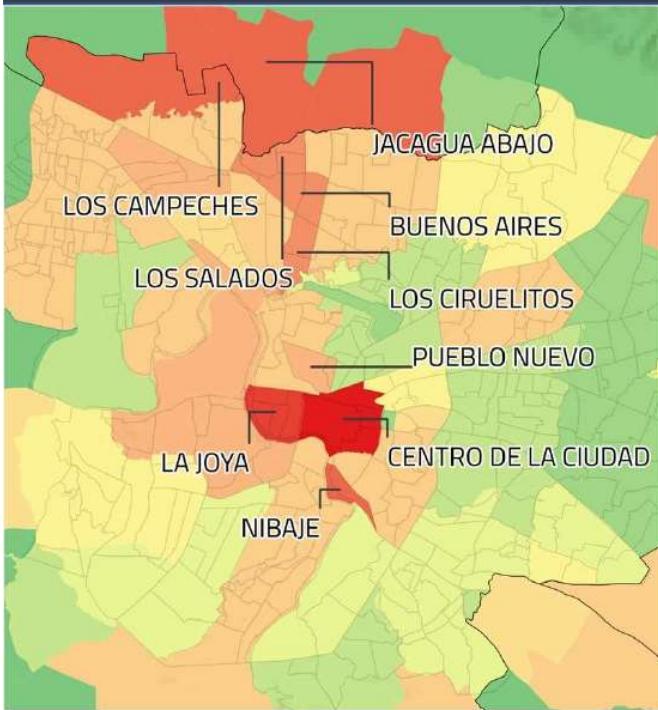
fatalidades y pérdidas económicas. La frecuencia se muestra en la forma de los siguientes períodos de retorno: 50 años, 100 años, 200 años, 500 años, y 1000 años. Esta información puede informar políticas de preparación, gestión y transferencia del riesgo para los eventos sísmicos, dependiendo de su frecuencia e impacto.



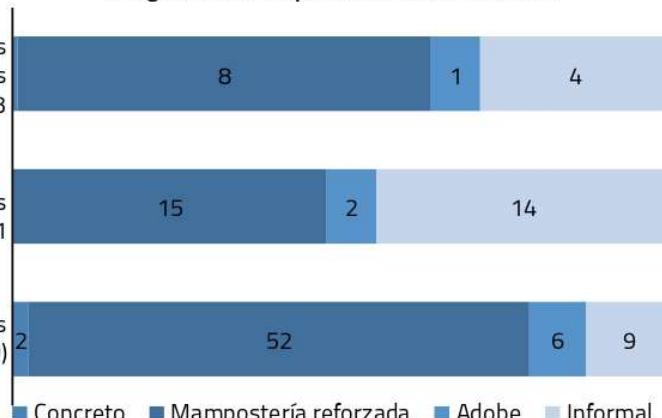
SANTIAGO DE LOS CABALLEROS

PERFIL DE MITIGACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

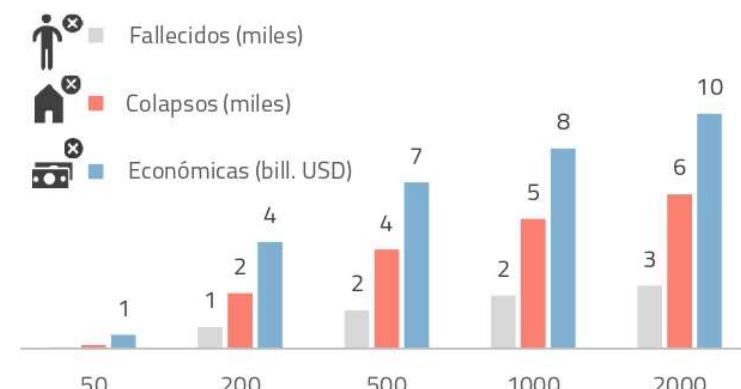
POBLACION Y EDIFICIOS EXPUESTOS	
Población	800 mil
Edificios Residenciales	154 mil
Edificios Comerciales	7 mil
Edificios Educativos	454
Edificios Industriales	279
Edificios de Salud	454
Edificios de Gobierno	211
Capital expuesto	\$25 (bill. USD)



Riesgo anualizado por material constructivo



Riesgo por periodo de retorno en años



Puede encontrar más información sobre las suposiciones del análisis en el repositorio <https://github.com/gem/treq-riesgo-urbano>

6. REFERENCIAS

- 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>.
- 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/>
- Ayuntamiento del Municipio Santiago de los Caballeros (2017). Plan Municipal de Ordenamiento Territorial de Santiago – PMOT 2017 -2030. Tomado de <https://www.sismap.gob.do/Municipal/uploads/evidencias/636592187771659962-PMOT-SANTIAGO-2017-V9-23-enero-2018-definitiva-MAGR.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2015). Plan de Acción de Santiago. Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Fuente issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles
- Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2016). Estudios Base para Santiago de los Caballeros. Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Tomado de issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles
- 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.
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM Technical Report, 02, 188. <https://doi.org/doi: 10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>.
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis, Bull. Seismol. Soc. Am. 58, 1568–1606.
- Dirección General de Ordenamiento y Desarrollo Territorial - DGODT (2009). Amenazas y Riesgos Naturales en República Dominicana. Compendio de Mapas. Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo.
- Fundación DEMUCA (2009). Estudio Socio-Económico para el Ordenamiento Territorial del Municipio de Santiago. Santo Domingo, R.D. Tomado de <https://santiagodeloscaballeros.gob.do/servicios/servicios-oficina-de-planeamiento-urbano/>
- Fundación Rockefeller (2018). Estrategia de Resiliencia – Santiago de los Caballeros. Santiago de los Caballeros, República Dominicana. Tomado de www.100resilientcities.org/strategies/santiago-de-los-caballeros/
- 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.
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab, a comprehensive subduction zone geometry model. Science, 362(6410), 58-61.

Global Earthquake Model

- 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.
- 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.
- Llorente Isidro, M., Belvaux M., Bernardez E., Bertil D., Fernandez-Merodo J., Lain-Huerta L., Lopera-Caballero E., Muños-Tapia S. and Rouillé A. (2017). Geología para el estudio de microzonación sísmica en Santiago de los Caballeros, República Dominicana. *Boletín Geológico y Minero*, 128 (3): 715-736, ISSN: 0366-0176, DOI: 10.21701/bolgeomin.128.3.010.
- Martins, L., Silva, V. Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. *Bull Earthquake Eng* 19, 6719–6745 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>
- McGuire, R. K. (2004), Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones - MOPC (2007). Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras R-001. Tomado de www.mopc.gob.do/media/1039/r-001-reglamento-sismico.pdf
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones - MOPC (2012). Reglamento para Diseño y Construcción de Estructuras en Hormigón Armado R-033. Tomado de www.mopc.gob.do/media/1972/r-033.pdf
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones – MOPC, 2011. Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras. Santo Domingo, República Dominicana.
- Oficina Municipal de Ordenamiento Territorial (2017). Plan de Municipal de Ordenamiento Territorial de Santiago 2018–2030. Municipalidad de Santiago de los Caballeros.
- Oficina Nacional de Estadísticas y Censos (2002). Perfil Estadístico de la Provincia de Santiago. Tomado de [https://www.one.gob.do/provinciales-y-municipales](http://www.one.gob.do/provinciales-y-municipales).
- Oficina Nacional de Estadísticas y Censos (2011). Censo de población y vivienda del 2010. Tomado de [https://www.one.gob.do/provinciales-y-municipales](http://www.one.gob.do/provinciales-y-municipales).
- Oficina Nacional de Estadísticas y Censos (2020). Proyecciones Demográficas Provinciales y Municipales. Tomado de [https://www.one.gob.do/demograficas/proyecciones-de-poblacion](http://www.one.gob.do/demograficas/proyecciones-de-poblacion)
- 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.
- 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.

Global Earthquake Model

Rouillé A., Vanoudheusden E., Belvaux M., Auclair S. (2011) – Microzonificación sísmica de Santiago – República Dominicana. Amenaza sísmica local. Informe final. BRGM/RC-59685-FR, 101 p., 43 fig., 11 tablas, 2 anexos.

Secretaría de Estado de Obras Públicas y Comunicaciones - SEOPC (2007). Reglamento para Diseño y Construcción de Edificios en Mampostería Estructural R-027. Tomado de www.mopc.gob.do/media/1967/r-027.pdf

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>

Sistema de Información Municipal del Ayuntamiento de Santiago – SIMAS (2020). Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago 2018 – 2030. Ayuntamiento del Municipio de Santiago, Repúblca Dominicana.

Terrier-Sedan, M., & Bertil, D. (2021). Active fault characterization and seismotectonic zoning of the Hispaniola island. *Journal of Seismology*, 25(2), 499-520.

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>.

Villar-Vega M, Silva V, Crowley H, Yepes C, Tarque N, Acevedo A, Hube M, Gustavo C, María H (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, vol. 33, issue 2 (2017) pp. 581-604 Published by Earthquake Engineering Research Institute.

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, Hube M.A, Coronel G, and Santa María H, "Modelling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment ", *Earthquake Spectra*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp. 299-322.