



**Institución Universitaria**

**Estimación del riesgo sísmico y diseño de  
estrategias de mitigación en una zona  
periurbana del corregimiento de San  
Cristóbal, Medellín**

**Kelly Johanna Zapata Trujillo**

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas  
Medellín, Colombia  
2025



# **Estimación del riesgo sísmico y diseño de estrategias de mitigación en una zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, Medellín**

**Kelly Johanna Zapata Trujillo**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Desarrollo Sostenible**

Director:

MSc. Fernando Alexis Osorio Vergara

Línea de Investigación:

Prevención y corrección de factores medio ambientales que afecten la salud humana

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas

Medellín, Colombia

2025



*“Todo lo bueno tarda”*



## Resumen

Se realizó un análisis del riesgo sísmico en el Corregimiento de San Cristóbal, Medellín, considerando un enfoque determinista de la amenaza sísmica definida en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. Para este propósito, se integraron los datos obtenidos de Google Street View, MapGis9 y la base de datos catastral, junto con las curvas de fragilidad ajustadas a las edificaciones dentro del área de estudio. Estas edificaciones fueron agrupadas en polígonos homogéneos, excluyendo zonas afectadas por condiciones de riesgo asociadas a movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales.

El análisis se realizó con el software OpenQuake Engine, aplicando las Ecuaciones de Predicción de Movimiento Fuerte del Suelo empleadas en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica. Este proceso permitió estimar la intensidad de movimiento del suelo, daños en las edificaciones y costos de reposición en caso de colapso.

Con base en los resultados, se diseñaron estrategias para reducir el riesgo sísmico, incluyendo medidas estructurales y no estructurales. Estas estrategias buscan orientar intervenciones y fortalecer la resiliencia comunitaria para la gestión del riesgo sísmico.

**Palabras clave:** Riesgo sísmico, reducción del riesgo, gestión del riesgo de desastres, amenaza sísmica, vulnerabilidad sísmica, exposición sísmica, mampostería no reforzada.

## Abstract

A seismic risk analysis was performed in the Corregimiento de San Cristóbal, Medellín, considering a deterministic approach to the seismic hazard defined in the Municipal Disaster Risk Management Plan. For this purpose, data obtained from Google Street View, MapGis9 and the cadastral database were integrated, together with the fragility curves adjusted to the buildings within the study area. These buildings were grouped into homogeneous polygons, excluding areas affected by risk conditions associated with mass movements, floods and torrential floods.

The analysis was performed with the OpenQuake Engine software, applying the Strong Ground Motion Prediction Equations used in the National Seismic Hazard Model. This process allowed estimating the intensity of ground motion, building damage and replacement costs in case of collapse.

Based on the results, strategies were designed to reduce seismic risk, including structural and non-structural measures. Strategies seek to guide interventions and strengthen community resilience for seismic risk management.

**Keywords: Seismic risk, risk reduction, disaster risk management, seismic hazard, seismic vulnerability, seismic exposure, unreinforced masonry.**

# Contenido

	Pág.
<b>1. Introducción .....</b>	<b>18</b>
1.1 Marco teórico .....	22
1.2 Estado del arte .....	25
1.2.1 Modelo de amenaza sísmica .....	26
1.2.2 Modelos de vulnerabilidad sísmica .....	28
1.2.3 Modelos de fragilidad sísmica.....	29
1.2.4 Modelos de exposición sísmica .....	30
1.2.5 Modelos de riesgo sísmico .....	31
1.2.6 Software de evaluación de riesgo sísmico .....	32
1.2.7 Intervenciones de reducción del riesgo sísmico .....	34
1.3 Objetivos .....	38
1.3.1 Objetivo general.....	38
1.3.2 Objetivos específicos .....	38
1.4 Estructura de la tesis .....	38
<b>2. Metodología .....</b>	<b>41</b>
2.1 Enfoque y tipo de investigación .....	41
2.2 Población y grupo focal de estudio .....	41
2.3 Lugar de estudio .....	42
2.4 Métodos .....	44
2.4.1 Conocimiento del riesgo sísmico .....	44
2.4.2 Reducción del riesgo sísmico .....	45
<b>3. Estimación del riesgo sísmico .....</b>	<b>47</b>
3.1 Generalidades.....	47
3.2 Amenaza sísmica.....	53
3.2.1 Revisión de literatura .....	53
3.2.2 Fuentes de amenaza sísmica .....	54
3.2.3 Modelos de movimiento del terreno .....	57
3.2.4 Resultados de la amenaza sísmica.....	58
3.3 Modelo de exposición.....	74
3.3.1 Taxonomía de edificaciones .....	76
3.3.2 Tipologías o clases constructivas predominantes .....	78
3.4 Modelo de vulnerabilidad.....	84
3.5 Riesgo sísmico.....	89
3.5.1 Resultados del análisis de escenarios sísmicos.....	90

<b>4. Diseño de medidas de mitigación del riesgo sísmico.....</b>	<b>95</b>
4.1 Diseño de intervenciones estructurales.....	95
4.1.1 Alternativas convencionales de intervención estructural.....	98
4.1.2 Alternativas no convencionales de intervención estructural.....	109
4.2 Diseño de intervenciones no estructurales.....	118
4.2.1 Guía para la construcción de un plan familiar de respuesta a emergencias causadas por eventos sísmicos .....	119
4.2.2 Guía para la construcción de un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico .....	129
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>141</b>
5.1 Conclusiones .....	141
5.2 Recomendaciones .....	144

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1. Localización Corregimiento de San Cristóbal, Medellín, Antioquia, Colombia. .....	20
Figura 1-2. Intervenciones de reducción del riesgo sísmico.....	34
Figura 1-3. Intervenciones correctivas físicas convencionales y no convencionales.....	37
Figura 2-1. Polígonos de estudio en vista panorámica. ....	43
Figura 2-2. Polígonos de estudio con una vista detallada.....	43
Figura 2-3. Estructura de la investigación.....	46
Figura 3-1. Geología de la cuenca del Río Aburrá.....	49
Figura 3-2. Geología en la zona de estudio. ....	50
Figura 3-3. Superficie del Corregimiento de San Cristóbal. ....	51
Figura 3-4. PGA con 2% de probabilidad de excedencia en 50 años. Modelo Nacional de Amenaza Sísmica. ....	53
Figura 3-5. Sismicidad histórica del departamento de Antioquia.....	54
Figura 3-6. Sismicidad histórica del Distrito de Medellín.....	55
Figura 3-7. Localización de los eventos sísmicos modelados para el análisis de amenaza sísmica.....	57
Figura 3-8. Flujo de trabajo para la calculadora de riesgo basada en escenarios dados. 58	
Figura 3-9. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico PMGRD2015 Superficial y las GMPE's AbrahamsonEtAl2014. a) PGA b) SA (0.4). ....	60
Figura 3-10. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico PMGRD2015 Superficial y las GMPE's CauzziEtAl2014. a) PGA b) SA (0.4).....	61
Figura 3-11. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico PMGRD2015 Superficial y las GMPE's Idriss2014. a) PGA b) SA (0.4). ....	62
Figura 3-12. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico PMGRD2015 Profundo y las GMPE's Abrahamson2016. a) PGA b) SA (0.4). ....	63
Figura 3-13. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico PMGRD2015 Profundo y las GMPE's MontalvaEtAl2017. a) PGA b) SA (0.4). ....	64
Figura 3-14. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico PMGRD2015 Profundo y las GMPE's ZhaoEtAl2006 a) PGA b) SA (0.4).....	65
Figura 3-15. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico Acevedo2020 Superficial y las GMPE's AbrahamsonEtAl2014. a) PGA b) SA (0.4).....	66
Figura 3-16. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico Acevedo2020 Superficial y las GMPE's CauzziEtAl2014. a) PGA b) SA (0.4). ....	67
Figura 3-17. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico Acevedo2020 Superficial y las GMPE's Idriss2014. a) PGA b) SA (0.4).....	68

Figura 3-18. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico Acevedo2020 Profundo y las GMPE's Abrahamson2016. a) PGA b) SA (0.4). ....	69
Figura 3-19. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico Acevedo2020 Profundo y las GMPE's MontalvaEtAl2017. a) PGA b) SA (0.4). ....	70
Figura 3-20. Resultados de la amenaza sísmica en términos de para el evento sísmico Acevedo2020 Profundo y las GMPE's ZhaoEtAl2006 a) PGA b) SA (0.4).....	71
Figura 3-21. Espectro elástico de aceleraciones para el rango de valores de PGA entre 0.15g y 0.35 g. ....	74
Figura 3-22. Distribución de las edificaciones por tipo de sistema estructural. ....	78
Figura 3-23. Edificaciones presentes en la zona de estudio.....	79
Figura 3-24. Distribución de tipologías constructivas según la taxonomía de edificaciones de GEM en la zona de estudio. ....	80
Figura 3-25. Distribución de irregularidades de planta y altura en las edificaciones. ....	80
Figura 3-26. Distribución de presencia de vigas de amarre y voladizos en las edificaciones. ....	81
Figura 3-27. Distribución de sistemas de losas y de cubierta en las edificaciones. ....	82
Figura 3-28. Distribución de áreas totales de las edificaciones. ....	82
Figura 3-29. Distribución de costos estimados de reposición de las edificaciones. ....	83
Figura 3-30. Distribución del costo estimado de reposición.....	83
Figura 3-31. Curvas de fragilidad de edificaciones de mampostería no reforzada de uno y dos pisos del Valle de Aburrá sin agrupar obtenidas por Osorio Vergara (2024).....	85
Figura 3-32. Curvas de fragilidad para el mecanismo de falla en el plano para edificaciones de mampostería no reforzada. a) 3 niveles, b) 4 niveles, c) 5 niveles, obtenidas por Acevedo et al. (2017).....	86
Figura 3-33. Curvas de fragilidad para edificaciones de mampostería reforzada de dos niveles obtenidas por Alonzo Hernández & Martínez Díaz (2018).....	87
Figura 3-34. Curvas de fragilidad para edificaciones de mampostería confinada de uno y dos niveles obtenidas por Galán Galdámez & Samayoa Escalante (2020). ....	88
Figura 3-35. Curvas de fragilidad para edificaciones de concreto reforzado con mampostería de relleno de mediana altura obtenidas por Fikri & Ingham (2022).....	89
Figura 3-36. Distribución de daño en edificaciones para el peor escenario de riesgo sísmico.....	90
Figura 3-37. Distribución de daño en edificaciones de mampostería no reforzada para el peor escenario de riesgo sísmico.....	91
Figura 3-38. Distribución de daño en edificaciones de mampostería confinada para el peor escenario de riesgo sísmico.....	91
Figura 3-39. Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el peor escenario de riesgo sísmico.....	92
Figura 4-1. Proceso de implementación de medidas para mitigar la vulnerabilidad sísmica. ....	98
Figura 4-2. Priorización de condiciones a subsanar en una edificación.....	99
Figura 4-3. Ejemplo de localización de juntas sísmicas en la planta de una edificación.....	101
Figura 4-4. Ejemplo reforzamiento de muro con malla electrosoldada y revoque.....	103

Figura 4-5. Refuerzo de muro existente con de revoque con malla. ....	103
Figura 4-6. Ejemplo de construcción de viga de confinamiento sobre muro de mampostería. .....	105
Figura 4-7. Ejemplo de construcción de vigas de amarre sobre toda la edificación. ....	105
Figura 4-8. Ejemplo de construcción de columna de confinamiento en muro de mampostería. ....	106
Figura 4-9. Ejemplo de localización de columnas de confinamiento en una edificación.	107
Figura 4-10. Ejemplo de ubicación de una viga dintel sobre una abertura de un muro. .	108
Figura 4-11. Planta típica de una vivienda de mampostería no reforzada localizada en la zona de estudio. ....	110
Figura 4-12. Localización de medidas de intervención no convencionales en esquinas y muros de una planta típica. ....	112
Figura 4-13. Ejemplo de conexión de muros de mampostería en las esquinas utilizando una pieza única de malla formada por tiras de bambú.....	114
Figura 4-14. Ejemplo de reforzamiento de un muro de mampostería con mallas de bandas de polipropileno. ....	116
Figura 4-15. Ejemplo de colocación de mallas de bandas de polipropileno para el reforzamiento de muros de mampostería. ....	116
Figura 4-16. Ejemplo de conformación de malla con hilazas de fibras de algodón. ....	117
Figura 4-17. Proceso para la construcción de un plan familiar de emergencias ante la ocurrencia de un evento sísmico. ....	120
Figura 4-18. Zonas de exposición de las edificaciones frente a fenómenos de movimiento en masa. ....	125
Figura 4-19. Proceso para la elaboración del plan comunitario de gestión del riesgo sísmico. ....	130
Figura 4-20. Momentos de la Sesión 1 - Conocimiento y Reducción del Riesgo Sísmico. ....	131
Figura 4-21. Roles comunitarios para el apoyo en la respuesta a emergencias ocasionadas por la ocurrencia de un evento sísmico. ....	135

## Lista de tablas

Tabla 3-1. Características de los eventos hipotéticos de modelación de amenaza sísmica. .....	56
Tabla 3-2. Ecuaciones de Predicción de Movimiento Fuerte del Suelo [GMPE's] para los ambientes tectónicos en la zona de estudio.....	58
Tabla 3-3. Resultados de aceleración para los escenarios sísmicos superficiales y profundos definidos.....	73
Tabla 3-4. Taxonomía de Edificios utilizada en el modelo de exposición para la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal.....	77
Tabla 3-5. Parámetros de curvas de fragilidad utilizados para el modelo de vulnerabilidad. .....	89
Tabla 4-1. Recomendaciones de intervención de reducción del riesgo sísmico. ....	96
Tabla 4-2. Caracterización de las personas que integran el grupo familiar.....	121
Tabla 4-3. Caracterización de las mascotas que integran el grupo familiar. ....	121
Tabla 4-4. Caracterización de las amenazas al interior de la vivienda. ....	122
Tabla 4-5. Información de vulnerabilidad física de la vivienda.....	123
Tabla 4-6. Información sobre la vulnerabilidad familiar.....	124
Tabla 4-7. Clasificación del grado de exposición de una vivienda frente al fenómeno de movimiento en masa.....	125
Tabla 4-8. Acciones familiares para la reducción del riesgo ante la ocurrencia de un evento sísmico.....	126
Tabla 4-9. Contactos de familiares y amigos de apoyo. ....	127
Tabla 4-10. Contactos de organismos de respuesta. ....	128
Tabla 4-11. Contenido propuesto del kit de emergencias.....	128
Tabla 4-12. Ejemplo del mensaje inicial del ejercicio de simulación. ....	137
Tabla 4-13. Modelo de formato para informe de evaluación de un ejercicio de simulación. .....	138

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
<b>AIS</b>	Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
<b>CBML</b>	Comuna – Barrio – Manzana – Lote [Código catastral]
<b>CENAPRED</b>	Centro Nacional de Prevención de Desastres - México
<b>CONACYT</b>	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías - México
<b>DAGR</b>	Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - Medellín
<b>DANE</b>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística - Colombia
<b>DSHA</b>	Deterministic Seismic Hazard Analysis [Sigla en inglés para Análisis de Amenaza Sísmica Determinista]
<b>FEMA</b>	Federal Emergency Management Agency [Sigla en inglés para Agencia Federal para el Manejo de Emergencias – Estados Unidos]
<b>FOREC</b>	Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - Colombia
<b>GAR</b>	Global Assessment Report [Sigla en inglés para Informe de Evaluación Global sobre Reducción del Riesgo de Desastres]
<b>GEM</b>	Global Earthquake Model [Sigla en inglés para Modelo Sísmico Mundial]
<b>GMPE</b>	Ground Motion Prediction Equations [Sigla en inglés para Ecuaciones de Predicción de Movimiento Fuerte del Suelo]
<b>IDIGER</b>	Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - Bogotá
<b>Medellín Distrito Especial CTi</b>	Medellín Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación
<b>NIBS</b>	National Institute of Building Sciences [Sigla en inglés para Instituto Nacional para Ciencias de la Construcción – Estados Unidos]
<b>NRML</b>	Natural Hazard Risk Markup Language [Sigla en inglés para Lenguaje de Marcado de Riesgos Naturales], utilizado por el software OpenQuake Engine.
<b>NSR-10</b>	Sigla para Norma Sismorresistente 10 [Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes 2010]
<b>NSR-98</b>	Sigla para Norma Sismorresistente 98 [Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes 1998]
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible

XVI Estimación del riesgo sísmico y diseño de estrategias de mitigación en una zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, Medellín

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<b>OFDA</b>	Office of Foreign Disaster Assistance [Sigla en inglés para Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero de Estados Unidos]
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>PGA</b>	Peak Ground Acceleration [Sigla en inglés para Aceleración Pico del Terreno]
<b>PMGRD</b>	Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres - Medellín
<b>PNGRD</b>	Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia
<b>POMCA</b>	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
<b>POT</b>	Plan de Ordenamiento Territorial - Medellín
<b>PREPARE</b>	Programa de Preparación de Personal de Rescate y Emergencia para Mejorar la Respuesta ante Sismos – Eje Cafetero - Colombia
<b>PSHA</b>	Probabilistic Seismic Hazard Analysis [Sigla en inglés para Análisis de Amenaza Sísmica Probabilístico]
<b>SA</b>	Spectral Acceleration [Sigla en inglés para aceleración espectral]
<b>SARA</b>	South America Risk Assessment [Sigla en inglés para Evaluación de Riesgo en Suramérica]
<b>SDOF</b>	Single Degree Of Freedom [Sigla en inglés para Un Solo Grado de Libertad]
<b>SGC</b>	Servicio Geológico Colombiano
<b>TREQ</b>	Training and Communication for Earthquake Risk Assessment [Sigla en inglés para Capacitación y Comunicación para la Evaluación de Riesgos de Terremotos]
<b>UNDRR</b>	United Nations Disaster Risk Reduction Office [Sigla en inglés para Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres]
<b>UNGRD</b>	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia
<b>USAID</b>	United States Agency for International Development [Sigla en inglés para Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional]
<b>VPN</b>	Valor Presente Neto
<b>WGS 84</b>	World Geodetic System 84 [Sigla en inglés para Sistema Geodésico Mundial 1984]
<b>XML</b>	Extensible Markup Language [Sigla en inglés para Lenguaje de Marcado Extensible]

## Nomenclatura

Nomenclatura	Término
$A_a$	Aceleración horizontal pico efectiva
$A_v$	Velocidad horizontal pico efectiva
$F_a$	Coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos del espectro de aceleración sísmica, debida a efectos de sitio
$F_v$	Coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios del espectro de aceleración sísmica, debida a los efectos de sitio
$f_y$	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado
$f'_c$	Resistencia especificada a la compresión del concreto
$g$	Acercación de la gravedad [9,8 m/s]
$I$	Coeficiente de importancia
$M_w$	Magnitud de momento sísmico
$M_0$	Momento sísmico
$M_s$	Magnitud de ondas superficiales
$S_a$	Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado. Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad para un periodo de vibración $T$
$T$	Periodo de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para periodos cortos y la parte descendiente del mismo
$T_L$	Periodo de vibración correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para periodos largos
$T_0$	Periodo de vibración del inicio de la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones
$V_{si}$	Velocidad media de la onda de cortante del suelo del estrato $i$ , medida en campo, en m/s

# 1. Introducción

Los sismos son vibraciones de la corteza terrestre, inducidas por el paso de ondas sísmicas, estas generalmente son causadas por el desplazamiento de las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre (Tarbuck et al., 2005). Colombia se encuentra localizada en el norte de Suramérica, donde se presenta el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Arcila et al., 2020), lo que dio origen a la Cordillera de los Andes. Esta localización geográfica también hace parte del “*Cinturón de Fuego del Pacífico*”, donde ocurren cerca del 85% de los eventos sísmicos a nivel mundial (Jaldin Vásquez, 2013).

El riesgo sísmico es entendido como la probabilidad de pérdidas humanas, económicas o ambientales causadas por un sismo, y resulta de asociar tres componentes principales: la amenaza sísmica, la vulnerabilidad sísmica y la exposición (Hinestroza Farfán, 2018).

La amenaza sísmica, es definida como el valor esperado de futuras acciones sísmicas en un sitio de interés y puede ser cuantificada, entre otros, en términos de una aceleración horizontal del terreno esperada (Ministerio de Ambiente, 2010). El territorio colombiano presenta diferentes niveles de amenaza y aproximadamente el 83% de la población está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta (Arcila et al., 2020). En la historia reciente de Colombia se han presentado eventos sísmicos que han causado una amplia destrucción de edificaciones e infraestructura, con impactos sociales y económicos en todo el país, como el sismo de Popayán en 1983 [magnitud 5,6 Mw] y el sismo del Eje Cafetero en 1999 [magnitud 6,1 Mw] (Arcila et al., 2020). Medellín se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia, localizada en un valle de origen tectónico, rodeado de fallas, con una enorme masa de roca cercana que puede amplificar las ondas (Amaya Correa, 2012).

Otra variable importante para tener en cuenta en la estimación del riesgo sísmico es la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, entendida como la cuantificación de la incapacidad intrínseca de estas para soportar ciertos niveles de sollicitación (Ministerio de Ambiente, 2010). A pesar de que Colombia tiene regulación en construcción sismorresistente desde 1984, la construcción informal y viviendas sin diseño de ingeniería es común en todo el país, representando más del 90% del grueso de los edificios urbanos residenciales (Yepes-Estrada et al., 2017). Medellín presenta zonas con diferentes características que favorecen una alta vulnerabilidad sísmica, como la alta densidad de población, asentamientos informales sin construcciones sismorresistentes y sin cumplimiento de los lineamientos del Plan de Ordenamiento Territorial [POT] (Amaya Correa, 2012).

Dadas las condiciones históricas de desarrollo de la ciudad de Medellín, Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación [Medellín Distrito Especial CTi], y sobre todo en las

zonas periurbanas, los pobladores han autoconstruido sus viviendas con carencia de criterios técnicos, con baja calidad en los materiales y localización inadecuada, situación que dificulta la predicción de su comportamiento. Estas condiciones aumentan la vulnerabilidad sísmica y en consecuencia se tiene un aumento considerable en el riesgo sísmico (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002). Se ha observado que la mayoría de estas edificaciones corresponden a viviendas de mampostería no reforzada y no confinada de hasta cinco niveles de altura (Acevedo et al., 2017).

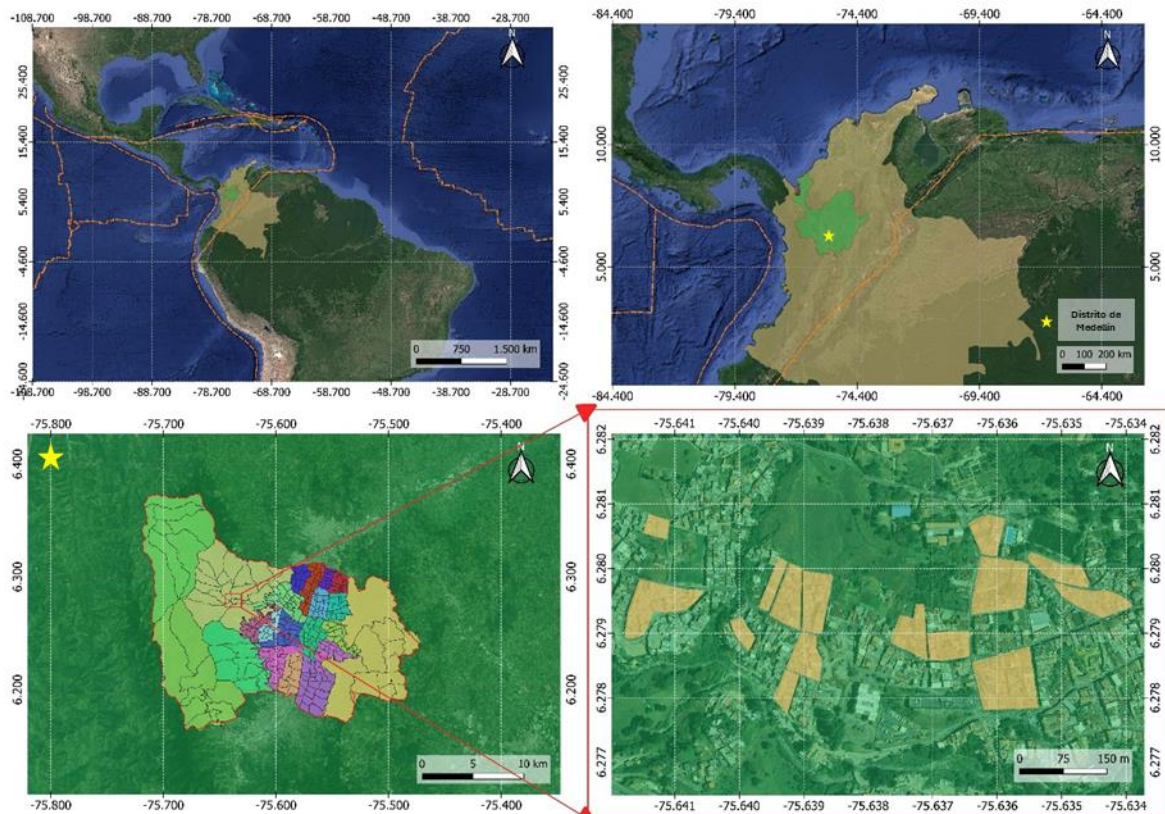
Por su parte, la exposición sísmica puede definirse como la población, edificaciones, instalaciones e infraestructura que se encuentran localizadas en los lugares que tienen posibilidad de que se presente un evento sísmico (Osorio Vergara, 2015). Según el Censo Nacional de Población y Vivienda (2018), Medellín tiene 2'372.330 habitantes, distribuidos en 793.068 viviendas, de las cuales 355.252 corresponden a casas y 22.005 viviendas tipo cuarto; en total se tienen 692.517 viviendas construidas en bloque, ladrillo y piedra (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2018).

La mampostería no reforzada corresponde a un tipo de construcción consistente en paneles verticales de piezas de mampostería unidas por medio de un mortero con ausencia de refuerzo interno o elementos de confinamiento (Ministerio de Ambiente, 2010). Este se considera como uno de los sistemas estructurales con menor capacidad para la disipación de energía, desde el punto de vista del diseño sismorresistente (Rodríguez Miranda, 2015).

En conformidad con la evaluación de un escenario de riesgo sísmico realizado por Acevedo et al. (2020) en el Distrito de Medellín, se identificó un mayor Índice de Pérdida Anual Promedio para las edificaciones con sistemas estructurales compuestos por muros de mampostería no reforzada, indicando la alta vulnerabilidad de este tipo de construcción. Según datos del 2017, esta tipología constructiva representa aproximadamente el 53% de las edificaciones residenciales de la ciudad (González-González, 2017), con tendencias a aumentar debido al crecimiento de los límites urbanos con altas vulnerabilidades sociales y económicas (Espinoza Malpartida, 2019). Al evaluar diferentes escenarios de riesgo sísmico, se identifica que los mayores impactos negativos representados en víctimas mortales, lesionados, y viviendas con colapsos parciales y totales, se presentarían en las zonas altas de las laderas occidental y oriental del Distrito de Medellín (Acevedo et al., 2020).

En la ladera occidental del Distrito de Medellín se localiza el Corregimiento San Cristóbal, a once kilómetros del centro de la ciudad. Tiene una extensión de 49,5 kilómetros cuadrados, donde el 97% del corregimiento corresponde a área rural y un 3% área urbana. Se configura como un territorio estratégico desde la dimensión ambiental, debido a que contribuye a la contención de la expansión urbana, la conservación del agua, la protección del suelo y las coberturas especialmente boscosas (Alcaldía de Medellín, 2020). La principal cuenca hidrográfica del corregimiento es la quebrada La Iguaná, que cruza todo su territorio en dirección de occidente a oriente y cuenta con numerosos afluentes que le llegan desde las montañas (Ochoa Márquez & Daza Contreras, 2019). En la Figura 1-1 se presenta la localización del Corregimiento de San Cristóbal.

Figura 1-1. Localización Corregimiento de San Cristóbal, Medellín, Antioquia, Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

En caso de materializarse el peor escenario de riesgo sísmico contemplado en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres [PMGRD], correspondiente a un sismo de 7,4  $M_w$ , en el sistema de Fallas Cauca – Romeral, con localización en las coordenadas [-75,68; 6,20], se tendría la pérdida significativa de vidas y daños severos en las estructuras, infraestructura, bienes, servicios públicos y medio ambiente (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016), tal como se detalla en el numeral 3.2.2 *Fuentes de amenaza sísmica*.

Este trabajo de investigación pretende plantear alternativas de intervención para reducir el riesgo sísmico en una zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, a partir del conocimiento de los factores determinantes y la implementación de posibles acciones de intervención urbanas integrales potenciales que contribuyan a la sostenibilidad del territorio.

Tradicionalmente, las estrategias de mitigación del riesgo sísmico se han enfocado principalmente en la construcción nueva, dejando de lado las problemáticas de estructuras antiguas, así como la construcción informal, que suele ser la principal causa de daños y víctimas en eventos sísmicos importantes (Silva et al., 2020).

El riesgo sísmico no se puede eliminar, pero es posible modificarlo o reducirlo implementando medidas de prevención y mitigación sobre los elementos expuestos (Cabrera Cárdenas et al., 2021). Las acciones de intervención correctivas encaminadas a la reducción del riesgo sísmico, de manera general, corresponden al mejoramiento de la infraestructura con énfasis en las intervenciones de reforzamiento estructural (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, 2016).

La estimación y reducción del riesgo de desastres, y en particular, la reducción del riesgo sísmico contribuye al alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS], los cuales buscan erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible (Organización de las Naciones Unidas, 2022). Esta investigación aporta al alcance de las metas de tres ODS:

- **ODS 9. *Industria, innovación e infraestructuras.*** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Las metas de este objetivo incluyen desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, así como aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales, fomentando la innovación y aumentando el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo (Organización de las Naciones Unidas, 2022).
- **ODS 11. *Ciudades y comunidades sostenibles.*** Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Una de las metas de este objetivo es asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales. Además de reducir significativamente el número de muertes y pérdidas económicas causadas por los desastres, haciendo hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad (Organización de las Naciones Unidas, 2022).
- **ODS 12. *Producción y consumo responsables.*** Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, algo fundamental para sostener los medios de subsistencia de las generaciones actuales y futuras. Una de las metas de este objetivo es reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización (Organización de las Naciones Unidas, 2022); al prevenir el colapso de las edificaciones por consecuencia de eventos sísmicos, se tendría la reducción de residuos de construcción y demolición.

Por su parte, la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (2015), aprobó el Marco de Sendai, con cuatro prioridades de acción:

i) Comprender el riesgo de desastres, ii) Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo, iii) Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia, iv) Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres - UNDRR, 2015).

## 1.1 Marco teórico

En este marco teórico se presentan los términos utilizados como soporte contextual de la investigación titulada “*Estimación del riesgo sísmico y diseño de estrategias de mitigación en una zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, Medellín*”.

### **Amenaza sísmica**

La amenaza sísmica representa la severidad y la frecuencia de los sismos que pueden ocurrir en un lugar específico (Arcila et al., 2020). Un modelo de amenaza sísmica permite cuantificar las acciones sísmicas en términos de uno o varios parámetros de intensidad de movimiento del suelo, a los cuales se encuentra expuesta tanto la población como la infraestructura de una zona particular.

### **Análisis de amenaza sísmica determinista [DSHA]**

Método de análisis de amenaza sísmica que incluye la evaluación de un único escenario sísmico, puede corresponder a un evento histórico, el sismo máximo probable o un evento predefinido (Kramer, 1996). Para llevar a cabo este análisis de amenaza sísmica, es necesario identificar las posibles fuentes de falla, seleccionar el sismo de control con una distancia y una magnitud fija, estimar los movimientos del terreno utilizando ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del suelo [GMPE's] y finalmente evaluar el riesgo en el lugar de estudio (Hosseinpour et al., 2021).

### **Análisis probabilístico de la amenaza sísmica [PSHA]**

Método de análisis de la amenaza sísmica empleado para determinar los parámetros del movimiento del terreno, como el espectro de respuesta de diseño, utilizados en análisis estructurales y el diseño de ingeniería. Este enfoque considera la identificación de todas las fuentes sísmicas posibles y la probabilidad de que ocurra una ruptura en cada una, la determinación de la distribución temporal mediante relaciones de recurrencia, la estimación los movimientos del terreno utilizando GMPE's, y finalmente la evaluación la probabilidad de excedencia de las intensidades del movimiento del terreno (Hosseinpour et al., 2021).

### **Ecuaciones de Predicción de Movimiento Fuerte del Suelo [GMPE]**

Expresiones que permiten estimar la intensidad esperada del movimiento del terreno en función de la magnitud, la distancia entre la fuente y el sitio, y la intensidad sísmica en el lugar de estudio, así como parámetros sísmicos, tectónicos y geométricos (Stewart et al., 2015; Taipe Acosta, 2013).

### **Vulnerabilidad sísmica**

La vulnerabilidad sísmica es una característica inherente de las estructuras, determinada por su diseño y construcción, y es independiente de la amenaza sísmica. Representa el grado de daño que una estructura puede sufrir debido a un movimiento sísmico del terreno de una intensidad específica. Una función de vulnerabilidad de una estructura describe de

manera gráfica o matemática, la probabilidad de daño de esta en función de la intensidad del movimiento sísmico (Caicedo et al., 1994).

### **Fragilidad sísmica**

La fragilidad de un edificio está vinculada a su vulnerabilidad sísmica y puede cuantificarse a través de curvas de fragilidad (Moreno González & Bairán García, 2010). Estas curvas se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada (Federal Emergency Management Agency, 1999).

### **Estado de daño**

Los estados de daños permiten evaluar el estado de las edificaciones después de un evento sísmico. Se puede estimar el estado de daño de las edificaciones observando los daños en elementos estructurales y no estructurales, y categorizando la estructura en uno de los estados, que van desde sin daños hasta daños totales o colapso (Sinha & Shiradhonkar, 2012).

### **Exposición sísmica**

La exposición sísmica abarca la población, edificaciones, instalaciones e infraestructura situadas en áreas susceptibles a sismos. Esta exposición se caracteriza por la localización, clasificación, cuantificación y definición de los elementos expuestos, así como por las características que condicionan su vulnerabilidad y el valor social y económico. En el caso de las edificaciones, caracterizar su exposición implica inventariar los edificios y definir sus características estructurales, como la tipología estructural, el material, el año de construcción, la altura, entre otros (Coronel-Delgado, 2016). Un modelo de exposición puede presentarse a escala municipal, comunal, barrial, manzana y construcciones individuales (Hinestroza Farfán, 2018).

### **Riesgo sísmico**

El riesgo sísmico se entiende como la probabilidad de que ocurran pérdidas humanas, sociales y económicas debido a eventos sísmicos. Este riesgo resulta de la combinación de tres factores: amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad (Boore & Bommer, 2004).

### **Evaluación de riesgo sísmico**

Las evaluaciones de riesgo sísmico se realizan a través de modelos de interacción entre las variables de amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad. Se evalúa el riesgo sísmico para estimar el daño a edificaciones y las muertes probables entre los residentes de cada zona de estudio (Programa PREPARE-USAID/OFDA, 2017).

### **OpenQuake**

Software de código abierto desarrollado por la Fundación Global Earthquake Model [GEM] utilizado para el análisis de amenaza sísmica y riesgos asociados a sismos a nivel mundial.

Este software permite a una amplia gama de usuarios acceder a herramientas avanzadas y colaborar en el desarrollo de metodologías y algoritmos para cálculos precisos y reproducibles (Pagani et al., 2014).

### **Edificaciones residenciales**

Las edificaciones residenciales tienen un uso exclusivo para la vivienda de personas y la realización de actividades cotidianas. Estas pueden ser edificaciones aisladas, con muros perimetrales compartidos con otras edificaciones o un conjunto de unidades habitacionales localizadas en propiedad horizontal (Esquivel, 2016).

### **Estructura**

Una estructura es un conjunto de elementos interconectados cuya función es recibir cargas, soportar esfuerzos y transmitirlos al suelo, asegurando el comportamiento estático y dinámico de la edificación. Entre los elementos estructurales se incluyen muros, columnas, vigas, arcos y cerchas (EcuRed, 2019).

### **Tipologías estructurales**

En Colombia, de acuerdo con la NSR-10, se pueden identificar cuatro tipos de sistemas estructurales (Ministerio de Ambiente, 2010):

- *Sistema de muros de carga:* En este sistema, las cargas verticales son soportadas por muros de carga. No cuenta con pórticos completos, y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales.
- *Sistema combinado:* En este sistema, las cargas verticales son resistidas por un pórtico esencialmente completo, pero no resistente a momentos. Las fuerzas horizontales son contrarrestadas por muros estructurales o pórticos diagonales. Alternativamente, las cargas verticales y horizontales pueden ser soportadas por un pórtico resistente a momentos, combinado con muros estructurales o pórticos diagonales; sin embargo, no cumple los requisitos para ser un sistema dual.
- *Sistema de pórtico:* Este sistema está constituido por un pórtico espacial, resistente a momentos y esencialmente completo, sin diagonales. El pórtico es responsable de resistir todas las cargas verticales y horizontales.
- *Sistema dual:* Este sistema está formado por un pórtico espacial resistente a momentos y sin diagonales, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales. Para que un sistema estructural sea clasificado como sistema dual, debe cumplir los siguientes requisitos:
  - El pórtico espacial resistente a momentos, sin diagonales y esencialmente completo, debe ser capaz de soportar las cargas verticales.
  - Las fuerzas horizontales deben ser resistidas por la combinación de muros estructurales o pórticos con diagonales junto con el pórtico resistente a momentos, el cual puede ser un sistema de pórticos de capacidad especial para la disipación de energía.

- Ambos sistemas deben diseñarse de manera que, en conjunto, sean capaces de resistir la totalidad del cortante sísmico en la base, en proporción a sus rigideces relativas. Se debe considerar la interacción del sistema dual en todos los niveles de la edificación; en ningún caso la responsabilidad de los muros horizontales, o de los pórticos con diagonales puede ser menor del 75% del cortante sísmico en la base.

### **Mampostería no reforzada**

La mampostería no reforzada es un sistema estructural compuesto por muros de mampostería ensamblados con mortero, que no cumple con los requisitos mínimos de refuerzo establecidos para la mampostería parcialmente reforzada. Este sistema se caracteriza por su baja capacidad para disipar energía en el rango inelástico de deformaciones (Ministerio de Ambiente, 2010).

### **Reducción del riesgo sísmico**

La reducción del riesgo sísmico se abarca en todas las acciones correctivas [de mitigación] y preventivas [prospectivas] que se pueden implementar para disminuir la probabilidad de que las edificaciones sufran daños ante un sismo. Entre las medidas de mitigación del riesgo sísmico se incluyen el aseguramiento de objetos que pueden caer y causar daños, el mejoramiento de viviendas con enfoque en la intervención estructural, la reconstrucción de edificaciones, entre otras (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, 2016).

### **Reforzamiento estructural**

El reforzamiento estructural consiste en intervenciones realizadas en la estructura de una o varias edificaciones con el propósito de acondicionarlas a los niveles de seguridad sismorresistente de acuerdo con los requisitos de la NSR-10 (Ministerio de Ambiente, 2010). Estas intervenciones buscan mejorar las características de la edificación para aumentar su desempeño estructural y prolongar su vida útil (Soto Barraza, 2008).

## **1.2 Estado del arte**

La estimación del riesgo sísmico es fundamental para la gestión del riesgo desastres y la planificación urbana, dado el significativo impacto que los terremotos pueden tener en las comunidades y la infraestructura. El estado del arte en este campo explora las metodologías utilizadas para evaluar la amenaza sísmica, la vulnerabilidad, la fragilidad y la exposición; así como la identificación de avances y tendencias para la mitigación del riesgo sísmico.

### 1.2.1 Modelo de amenaza sísmica

La amenaza sísmica se entiende como la probabilidad de que se produzca un movimiento del suelo con una intensidad específica durante un periodo determinado en una ubicación concreta (Bommer, 2002). Esta amenaza se divide en dos categorías principales: las sacudidas transitorias y los fallos permanentes del terreno, que son efectos secundarios de los sismos. En la evaluación de pérdidas, la intensidad de las sacudidas del suelo es el aspecto principal, dado que la identificación y modelación de los parámetros relacionados con la amenaza secundaria de los terremotos resulta más compleja y menos precisa (Bird & Bommer, 2004). Los efectos secundarios de los sismos incluyen rupturas en fallas superficiales, licuefacción del suelo, asentamientos, movimientos en masa y otras inestabilidades de las laderas, además de tsunamis e incendios estructurales, entre otros (Hosseinpour et al., 2021).

Las metodologías para evaluar la amenaza sísmica ofrecen dos opciones. Primero, el análisis DSHA considera un terremoto único, ya sea un evento histórico, un sismo máximo esperado o un escenario específico (Kramer, 1996). En contraste, el análisis PSHA es una herramienta comúnmente utilizada para determinar parámetros del movimiento del suelo, como el espectro de respuesta de diseño, que son fundamentales para los análisis estructurales y el diseño de ingeniería. Este método tiene en cuenta todas las posibles fuentes sísmicas que podrían afectar el área en estudio, evaluando diversas combinaciones de distancia y magnitud. Para describir la relación entre magnitud y frecuencia de cada fuente sísmica, se utiliza una relación de recurrencia [Gutenberg-Richter] (Hosseinpour et al., 2021). El espectro de respuesta de diseño se asocia a una probabilidad anual específica de ocurrencia de eventos sísmicos (Cornell, 1968). Ambas metodologías emplean las GMPE's más adecuadas para incorporar las condiciones del sitio de referencia (Hosseinpour et al., 2021).

A nivel global, el *Global Assessment Report* [GAR], un proyecto de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [UNDRR], tiene como objetivo llevar a cabo una evaluación global del riesgo asociado a diversas amenazas naturales. En el marco de este proyecto, en 2015 se realizaron evaluaciones globales de estas amenazas, incluida la amenaza sísmica, empleando un enfoque probabilístico con resolución gruesa. Este enfoque consistió en definir provincias tectónicas generalizadas a nivel mundial, asignar relaciones de atenuación específicas a cada provincia y aplicar la metodología de sismicidad suavizada, lo que permitió obtener diferentes parámetros de sismicidad a escala global (Ordaz et al., 2015).

Para América Latina y el Caribe, se desarrolló un modelo de amenaza sísmica probabilístico homogéneo y continuo, generando curvas de excedencia de intensidad en varias ubicaciones para la creación de mapas de amenaza sísmica con distintos periodos de retorno (Salgado-Gálvez et al., 2018).

En el caso de Colombia, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD] ha publicado el Atlas de Riesgo Nacional (2018), donde se establecen los parámetros de amenaza sísmica a nivel municipal. Este modelo de amenaza sísmica para Colombia incluye fuentes sismogénicas definidas por la estructura, características y reología de la corteza. Además, se toma en cuenta el modelo de elevación digital del

terreno, así como mapas geológicos, tectónicos, de fallas activas y de velocidad de propagación de ondas sísmicas, junto con un catálogo de eventos sísmicos que considera frecuencia, magnitud y profundidad (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, 2018).

El Servicio Geológico Colombiano [SGC] desarrolló el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica (2020), a través de un análisis PSHA considerando un catálogo sísmico integrado, un modelo de fuentes sísmicas teniendo en cuenta los ambientes tectónicos presentes en Colombia y la selección de ecuaciones de atenuación para obtener la estimación de la amenaza sísmica y mapas de amenaza en roca en firme (Arcila et al., 2020).

En el ámbito local, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el Distrito de Medellín y diversos autores han desarrollado una serie de estudios que evidencian un avance significativo en el conocimiento de la amenaza sísmica en los diferentes municipios del Valle de Aburrá (Universidad de los Andes, 2019). Por ejemplo, Arango & Velásquez (1993) realizaron una recopilación histórica de los sismos percibidos en la ciudad de Medellín y de los daños reportados en cada uno de ellos. Así mismo, el estudio de amenaza, zonificación, análisis y vulnerabilidad sísmica para Medellín evaluó específicamente la amenaza sísmica para la ciudad, recopilando información sobre las condiciones geológicas y geotécnicas de los materiales presentes, y estableciendo lineamientos para futuras microzonificaciones sísmicas (Hincapié A. et al., 1994).

Además, se llevaron a cabo trabajos de instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín, incluyendo estudios de neotectónica en fallas cercanas, así como la utilización de modelos probabilísticos para evaluar la amenaza sísmica. Simultáneamente, se realizaron estudios geológicos y geomorfológicos detallados, y estudios geotécnicos que incluyeron perforaciones profundas, toma de muestras inalteradas y la ejecución de ensayos dinámicos especializados (Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres - SIMPAD, 1999). Adicionalmente, se instaló la Red Acelerográfica de Medellín, fortaleciendo la capacidad de monitoreo sísmico en la ciudad.

Posteriormente, se avanzó en la microzonificación sísmica del Valle de Aburrá y la definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundación. En este proceso, se realizaron estudios de neotectónica de fallas localizadas en el suroccidente del Valle de Aburrá y se completó una evaluación de la amenaza sísmica en la región, obteniendo una geología y geotectónica precisa (Grupo de sismología de Medellín, 2002).

Más adelante, la armonización de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá e inclusión de los corregimientos de Medellín que desarrolló el Área Metropolitana del Valle de Aburrá tuvo un enfoque probabilista. Este proyecto integró información geológica, geotécnica y de amenaza sísmica local, estableciendo las aceleraciones espectrales esperadas y presentando una caracterización espacial de la amenaza en superficie para toda el área de estudio. Además, se definieron los parámetros de amenaza sísmica y amplificación del suelo, que fueron fundamentales para la elaboración del espectro de diseño dentro de una malla de cálculo que abarcó el Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2016).

## 1.2.2 Modelos de vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica se puede describir cualitativamente como la susceptibilidad de una categoría de elementos expuestos a sufrir efectos negativos debido a terremotos principales (Vielma et al., 2008). Un análisis de vulnerabilidad requiere definir su naturaleza y alcance, lo cual está determinado por varios factores, como el tipo de daño que se busca evaluar, el nivel de amenaza en la zona, la información disponible sobre las estructuras y los datos relacionados con los daños observados en sismos que han afectado la zona de interés (Pinto et al., 2005). El objetivo principal de los estudios de vulnerabilidad sísmica es determinar los factores de riesgo sísmico, los cuales se determinan según el grado de pérdidas que pueden sufrir las estructuras durante el tiempo que estén expuestas a la actividad sísmica (Aldama Ojeda et al., 2008).

En la literatura se han propuesto diversos métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica, los cuales se dividen en dos grandes categorías: métodos empíricos y métodos analíticos. Según Kassem et al. (2020), los métodos empíricos incluyen procedimientos que se realizan a través de inspecciones visuales rápidas desde el exterior de la edificación, sin considerar el interior. Utilizan estimaciones cualitativas para correlacionar variables como el número de pisos, la altura, las irregularidades en planta y en elevación, la antigüedad de la edificación y el tipo de suelo. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en países como Estados Unidos, Canadá, Japón, Turquía, India y Nueva Zelanda (Kassem et al., 2020).

Por otro lado, los métodos analíticos para determinar la vulnerabilidad sísmica se enfocan en simular el comportamiento de la infraestructura durante movimientos sísmicos. Estos métodos incluyen análisis estáticos lineales, dinámicos lineales, estáticos no lineales y dinámicos no lineales. Entre ellos, el análisis estático no lineal es uno de los más populares debido a su simplicidad (Kassem et al., 2020). Este análisis consiste en aplicar gradualmente cargas laterales a una estructura para prever su comportamiento frente a movimientos sísmicos (Cagua Gómez et al., 2023). El resultado es una “*Curva de Capacidad*” que relaciona la fuerza aplicada a la estructura con el desplazamiento lineal o no lineal de la misma. Esta curva permite obtener propiedades mecánicas como la rigidez, la resistencia y la ductilidad de la estructura (Kassem et al., 2020).

La preocupación por la vulnerabilidad sísmica ha aumentado debido a las pérdidas humanas y económicas asociadas a eventos sísmicos en las últimas dos décadas (Kassem et al., 2020). El movimiento sísmico impone demandas significativas en el entorno construido, lo que hace necesario calcular la respuesta de las estructuras para establecer criterios de diseño y construcción de edificios resistentes a terremotos (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, 2018). Generalmente, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se enfoca en parámetros como el tipo de sistema estructural, la respuesta sísmica, las condiciones del suelo y la regularidad en planta y en altura de las edificaciones (Kassem et al., 2020).

Además, se han desarrollado varios métodos específicos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Por ejemplo, el método híbrido (Kappos et al., 2006), combina datos estadísticos con resultados de análisis no lineales estáticos y dinámicos, utilizando modelos de costos de reparación para estructuras de concreto reforzado y mampostería

no reforzada. Así mismo, se desarrolló un método por la Federal Emergency Management Agency (2015), basado en inspecciones visuales rápidas y evalúa factores como la tipología estructural, el tipo de suelo, la configuración estructural y los materiales.

Así mismo, la Fundación GEM elaboró una guía para la evaluación empírica de la vulnerabilidad sísmica (Rossetto et al., 2014). Esta guía presenta un procedimiento para construir curvas de fragilidad y vulnerabilidad a partir de información sobre daños y pérdidas post-eventos sísmicos. También se ha realizado una comparación de diferentes métodos de evaluación, proponiendo un sistema de calificación que considera la descripción de la vulnerabilidad, los factores de respuesta de las edificaciones, la varianza de los resultados, la aplicabilidad y la facilidad de uso (Alam et al., 2012).

En el contexto colombiano, se ha desarrollado el Índice de Vulnerabilidad Sísmica para edificaciones de mampostería, basado en la opinión de expertos (Maldonado Rondón et al., 2007). Este índice considera parámetros como el sistema estructural, la calidad del sistema resistente a sismos, la posición de la cimentación, el tipo de suelo, la pendiente del terreno, el tipo de diafragma horizontal, la configuración en planta y en elevación, la distancia máxima entre muros, el tipo de cubierta y el estado de conservación de la edificación.

Los modelos de vulnerabilidad se obtienen a partir del modelo de fragilidad asociado a un modelo de consecuencias que relaciona los estados de daño en las edificaciones con los costos de reparación o reconstrucción, las pérdidas humanas y el impacto social (Crowley et al., 2017).

### **1.2.3 Modelos de fragilidad sísmica**

La fragilidad de una edificación está vinculada con su vulnerabilidad sísmica y puede cuantificarse a través curvas de fragilidad. Estas curvas representan gráficamente la función de distribución acumulada que muestra la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural ante una acción sísmica determinada (Federal Emergency Management Agency, 1999).

El Departamento de Seguridad Nacional, Preparación para Emergencias y Dirección de Respuesta, de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias [FEMA] de Estados Unidos desarrolló una metodología y un software para la estimación de pérdidas multirriesgo (Federal Emergency Management Agency, 1999). Esta metodología incluye el desarrollo de curvas de fragilidad para la estimación de pérdidas materiales y sociales en edificios con diferentes sistemas estructurales, sistemas de transporte y sistemas de servicios vitales. Específicamente, se introdujeron dieciséis [16] modelos básicos de edificación considerando sistemas estructurales de madera, perfiles de acero, concreto, concreto pretensado y mampostería reforzada (Rojas Gil, 2010).

Por otro lado, diversos autores en América Latina han propuesto el desarrollo de curvas de fragilidad para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones con diferentes sistemas estructurales. Por ejemplo, Galán Galdámez & Samayoa Escalante (2020) abordaron la mampostería reforzada de un nivel; Rojas Gil (2010) se centró en

edificaciones con pórticos de concreto de poca altura; y Osorio Vergara (2024) y Alonzo Hernández & Martínez Díaz (2018) exploraron edificaciones de uno y dos niveles de mampostería no reforzada.

En Colombia, se han desarrollado curvas específicas de fragilidad para estructuras de concreto reforzado, analizando casos de estructuras de uno a seis niveles, sometidas a nueve registros sísmicos medidos en el país, con aceleración del suelo mayor a 0,1 g. Estas curvas de fragilidad presentan cuatro niveles de daño sísmico: leve, moderado, extenso y completo (Aguiar & Bobadilla, 2006). Además, se han formulado curvas de fragilidad para la evaluación del riesgo sísmico de viviendas de Barrancabermeja (Hinestroza Farfán, 2018) y para edificaciones residenciales de Antioquia, donde se desarrollaron funciones de fragilidad para edificaciones de mampostería no reforzada de hasta seis niveles (Acevedo et al., 2017). Finalmente, se han planteado curvas de fragilidad para edificaciones de uno y dos niveles de mampostería no reforzada del Valle de Aburrá, (Osorio Vergara, 2024).

#### **1.2.4 Modelos de exposición sísmica**

Los modelos de exposición son elementos fundamentales en la evaluación del riesgo sísmico, debido a que ofrecen información detallada sobre la cantidad y características de los edificios y otras estructuras susceptibles de ser afectadas por un terremoto. Un modelo de exposición sísmica típicamente incluye datos sobre número de edificaciones, ubicación geográfica, costos de reposición, número de ocupantes y categorías de vulnerabilidad asociadas (Silva et al., 2020).

Silva et al. (2020) desarrollaron un modelo de riesgo sísmico global que incorpora un modelo de exposición con datos de alrededor de 1,3 mil millones de edificaciones residenciales, 90,9 millones de edificaciones comerciales y 35,5 millones de edificaciones industriales en todo el mundo. Se estimó que el costo de reposición de estas edificaciones asciende aproximadamente a 203,6 billones de dólares, concentrándose el 76% de dicho costo en sólo 15 países.

En América Latina se han desarrollado diversos modelos de exposición a la amenaza sísmica para edificaciones residenciales, entre ellos, en el Área Metropolitana de Caracas, Venezuela (Coronel-Delgado, 2016), en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica (Arroyo-Solórzano, 2023), y en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador (Chicaiza Puchaicela, 2017).

En cuanto a la descripción y cuantificación de la infraestructura en Colombia, se han desarrollado modelos de exposición sísmica en varias ciudades como Bogotá, Cali y Barrancabermeja (Acevedo et al., 2020; Hinestroza Farfán, 2018). En particular, para el departamento de Antioquia, se elaboró un modelo de exposición sísmica de viviendas, considerando las áreas en planta de las zonas construidas, la distribución porcentual del número de pisos de las edificaciones y la distribución porcentual de los sistemas estructurales. Dichos modelos de exposición generados cuentan con tres niveles de refinamiento: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, los municipios de Antioquia por fuera del Valle de Aburrá con información disponible en los cascos urbanos y municipios

de Antioquia sin información disponible. Para estos últimos se utilizaron imágenes satelitales y recorridos virtuales a través de la plataforma Google Street View (Acevedo et al., 2017; Osorio Vergara, 2015).

Así mismo, González-González (2017) desarrolló un modelo de exposición sísmica a escala barrial para las viviendas en Medellín, a partir de una metodología basada en la caracterización y clasificación de tipologías estructurales presentes en la ciudad. Este análisis se realizó mediante encuestas, información catastral y recorridos virtuales a través de la herramienta Google Street View. Se encontró que la tipología constructiva más común es la mampostería no reforzada, representado el 53% del total de área construida de la ciudad.

### 1.2.5 Modelos de riesgo sísmico

El objetivo del proceso de evaluación del riesgo sísmico a nivel urbano, regional y nacional es cuantificar la magnitud y la probabilidad de los posibles efectos adversos que puedan presentar los eventos sísmicos. Esta información se proporciona a los gestores de riesgos de desastres y a los responsables de la toma de decisiones para que puedan actuar de manera adecuada (Newman et al., 2017). Los resultados de la evaluación de riesgos se presentan cuantificando los daños físicos y las pérdidas económicas y sociales y su probabilidad de ocurrencia (Coburn & Spence, 2002).

En este sentido, se creó un modelo global de riesgo sísmico probabilístico, empleando un repositorio de modelos locales y regionales de riesgo sísmico y un conjunto de datos de exposición global proporcionados por la Fundación GEM. Este modelo permitió obtener métricas de riesgo sísmico tales como las pérdidas económicas promedio anualizadas, las curvas de probabilidad de excedencia de pérdida y las pérdidas totales para diferentes periodos de retorno (Silva et al., 2020). Estos hallazgos sugieren que las pérdidas económicas causadas por los terremotos podrían impactar significativamente la economía de los países, lo que podría representar un desafío por los esfuerzos de reconstrucción y recuperación después de la ocurrencia de un evento sísmico (Silva et al., 2020).

Los resultados del modelo global de riesgo sísmico también señalan que las estructuras sin diseño de ingeniería, como las edificaciones de mampostería no reforzada y de adobe o tierra, son las que más contribuyen [aproximadamente el 75%] a las pérdidas económicas medias anualizadas a nivel mundial (Silva et al., 2020).

Colombia ha sido incluida en estudios de riesgo sísmico de América Latina (Dinamité et al., 1999; Petersen et al., 2018; Salgado-Gálvez et al., 2018) para los cuales se desarrollaron investigaciones sobre la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad sísmica de algunas de sus ciudades principales. El proyecto *South America Risk Assessment [SARA]* planteó perfiles de riesgo sísmico para algunos países de Suramérica (GEM Secretariat, 2015).

Así mismo, se ha implementado análisis PSHA para la evaluación del riesgo sísmico. Se realizó una evaluación del riesgo para las ciudades de Bogotá, Cali y Medellín (Pulido et al., 2015), obteniendo pérdidas anuales esperadas y máxima probable por ciudad.

Igualmente, para la ciudad de Barrancabermeja se obtuvo la pérdida promedio anual esperada y los daños en las edificaciones (Hinestroza Farfán, 2018). El Proyecto *Training and Communication for Earthquake Risk Assessment* [TREQ] desarrolló el análisis de riesgo sísmico para la ciudad de Cali (Yepes-Estrada et al., 2022), implementado análisis DSHA y PSHA.

En ciudades como Bogotá, Medellín, Cali, Manizales y algunas localidades cercanas, se han desarrollado estudios de microzonificación sísmica, desde finales de los años 90 y comenzando el siglo XXI (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010; Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006; G. Bernal et al., 2015; Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, 2005). Más recientemente, se realizaron estudios de escenarios de riesgo sísmico para las viviendas de mampostería no reforzada en Cali, Medellín y Bogotá (Acevedo et al., 2020). Estos estudios compararon los resultados de riesgo entre las ciudades, utilizando métricas de riesgo sísmico, tales como las curvas de probabilidad de excedencia de pérdidas económicas y las pérdidas económicas promedio anuales. Los escenarios de riesgo sísmico se seleccionaron teniendo como criterio el impacto económico o pérdida agregada con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. El propósito del estudio fue contribuir a la reducción del riesgo sísmico, compartiendo información, modelos y resultados que puedan apoyar actividades de mitigación de riesgos de desastres. Sin embargo, en el caso de Medellín, se limitó la evaluación a la zona urbana, excluyendo los centros poblados de las veredas, que corresponden en su mayoría a construcciones de mampostería no reforzada (Acevedo et al., 2020).

En el marco de la evaluación y análisis del riesgo de desastres en Colombia para el *Programa de Financiamiento y Aseguramiento del Riesgo de Desastres* del Banco Mundial, se estimó para Medellín la curva de pérdida máxima probable para un portafolio de edificaciones, así como la pérdida anual esperada en los diferentes grupos de uso (Ingeniería Técnica y Científica & Banco Mundial, 2013).

Finalmente, la Universidad de los Andes (2019) llevó a cabo una evaluación probabilista del riesgo sísmico de las edificaciones de diferentes usos en los municipios del Valle de Aburrá. Esta evaluación incluyó grupos seleccionados de edificaciones indispensables como las destinadas a salud, educación, seguridad, entre otras. Además, el estudio complementó las herramientas disponibles para la divulgación de la información, como el sistema de información sísmica, y desarrolló e implementó una metodología para la evaluación de edificaciones post-desastre (Universidad de los Andes, 2019).

### 1.2.6 Software de evaluación de riesgo sísmico

El primer código de computador para la evaluación probabilista de riesgo sísmico data de la década de 1970, con el desarrollo de *EQRISK* (McGuire, 1976) y *FRISK* (McGuire, 1978). Posteriormente, en las décadas siguientes, varios grupos de investigación desarrollaron software de código abierto y gratuito como la familia de *SEISRISK* (Bender & Perkins, 1982, 1987), *CRISIS* (M. Ordaz et al., 2013), *EqHaz* (Assatourians & Atkinson, 2013), *EQRM* (Robinson et al., 2005) y *OpenSHA* (Field et al., 2003).

Los modelos *EQRISK*, *FRISK*, *SEISRISK*, *CRISIS*, *EqHaz*, *EQRM* y *OpenSHA* son herramientas utilizadas para la evaluación del riesgo sísmico, cada una con características y enfoques metodológicos específicos. *EQRISK* y *FRISK* (McGuire, 1976, 1978) se centran en la evaluación probabilística de la amenaza sísmica, utilizando fuentes sísmicas definidas y funciones de atenuación. *EQRISK* proporciona un enfoque más amplio, considerando el riesgo sísmico en una zona extensa y evaluando la vulnerabilidad de los elementos expuestos (McGuire, 1976), mientras que *FRISK* se enfoca en la modelación de fallas individuales y efectos locales, permitiendo una caracterización más detallada del riesgo (McGuire, 1978). *SEISRISK* (Bender & Perkins, 1982, 1987) también utiliza un enfoque probabilístico, integrando fuentes sísmicas y funciones de atenuación para calcular la probabilidad de exceder niveles específicos de movimiento del suelo. Por otro lado, *CRISIS* (Ordaz et al., 2013) es un software que permite no solo evaluar la amenaza sísmica, sino también calcular pérdidas potenciales, ofreciendo una visión más completa del riesgo (Hosseinpour et al., 2021).

*EqHaz* es similar a *CRISIS* en su enfoque, pero se centra más en la probabilidad de excedencia de movimientos del suelo, lo que lo hace ideal para estudios de amenaza sísmica específicos. *EQRM* (Robinson et al., 2005) es un modelo de evaluación de riesgos que se enfoca en las pérdidas económicas y daños a infraestructuras, permitiendo análisis más detallados de vulnerabilidad y exposición. Finalmente, *OpenSHA* es una plataforma versátil y abierta que permite a los usuarios realizar simulaciones sísmicas y análisis de amenaza. Entre las ventajas de estos modelos se encuentran su capacidad para realizar análisis detallados y cuantitativos del riesgo, mientras que sus desventajas incluyen la necesidad de datos precisos y actualizados, así como la complejidad en su implementación y uso. Las diferencias entre ellos radican principalmente en el enfoque del modelado, la naturaleza de la salida [curvas de amenaza, estimaciones de pérdidas, etc.] y el nivel de detalle en la caracterización de las fuentes sísmicas (Hosseinpour et al., 2021).

En este contexto, *OpenQuake Engine*<sup>1</sup>, desarrollado por la Fundación GEM, destaca como un software para el análisis de amenaza y riesgo sísmico. Este software se caracteriza por su reproductibilidad, realización de pruebas y el proceso de desarrollo basado en la comunidad (Pagani et al., 2014). Además, ha sido diseñado para ser modular y flexible, teniendo librerías de código abierto para amenaza y riesgo sísmico.

*OpenQuake-Hazard* está estructurado como un módulo basado en Python, que modela rupturas sísmicas y calcula resultados tales como curvas de amenaza, conjuntos de eventos estocásticos y campos de movimiento del terreno (Monelli et al., 2012). Este módulo tiene capacidad de adaptarse a múltiples casos y responder a diferentes necesidades, incluyendo diversas estrategias de modelado de fuentes sísmicas, a través de cuatro calculadoras (Pagani et al., 2014):

- *Calculadora PSHA Clásica*: Esta calculadora deduce curvas y mapas de amenaza, así como los espectros de amenaza uniforme resolviendo el procedimiento de integración PSHA. Es comúnmente utilizada a escala regional y nacional, así como en sitios específicos de emplazamiento.

---

<sup>1</sup> [OpenQuake Engine](#)

- *Calculadora PSHA basada en eventos*: Calcula conjuntos de eventos estocásticos [es decir, catálogos sintéticos de rupturas sísmicas] y campos de movimientos del terreno para cada ruptura, teniendo en cuenta posiblemente la correlación espacial de los residuos dentro de los eventos.
- *Calculadora de desagregación*: A partir de un modelo PSHA, esta calculadora determina los escenarios sísmicos que más contribuyen a un determinado nivel de amenaza en un lugar específico.
- *Calculadora de escenarios DSHA*: Dada una ruptura sísmica y una ecuación de predicción de movimiento del terreno, se puede calcular un conjunto de campos de movimiento del suelo, comúnmente utilizada para casos a escala urbana.

### 1.2.7 Intervenciones de reducción del riesgo sísmico

Las acciones orientadas a la reducción del riesgo sísmico se centran en los elementos expuestos, dado que la amenaza sísmica no puede ser modificada. Estas intervenciones se clasifican en prospectivas y correctivas, con el objetivo principal de disminuir la vulnerabilidad sísmica (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, 2016). Estas medidas se dividen en físicas y no físicas. Las medidas físicas incluyen asegurar objetos que puedan caer y causar daño, mejorar viviendas a través de intervenciones estructurales y reforzar construcciones existentes. Por su parte, las medidas no físicas abarcan el cumplimiento de normativas sismorresistentes, la divulgación pública sobre los riesgos sísmicos, la capacitación y la organización comunitaria, así como los esquemas de transferencia del riesgo. La reposición de edificaciones también es un tipo de intervención correctiva clave para reducir los elementos vulnerables expuestos. En la Figura 1-2 se presentan los distintos tipos de intervención para la reducción del riesgo sísmico.

Figura 1-2. Intervenciones de reducción del riesgo sísmico.



Fuente: Adaptada de (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, 2016).

Entre las intervenciones prospectivas, una de las más relevantes en Colombia ha sido la implementación de normativas sismorresistentes. La primera de ellas, el Decreto 1400 de 1984, surgió después del terremoto de Popayán en 1983 y estuvo vigente por 14 años, abarcando disposiciones sobre cargas de diseño y varios materiales, como concreto, mampostería y estructuras metálicas, además de sanciones pertinentes ante el incumplimiento. Posteriormente, se aprobó la Ley 400 de 1997, que dio lugar a la Norma Sismorresistente 1998 [NSR-98], actualizada a la NSR-10 en 2010 (García, 2014). Sin embargo, a pesar de estas normativas, la construcción informal sigue siendo un desafío en Colombia, con edificaciones que no cumplen con las regulaciones sismorresistentes debido a factores como la falta de control urbanístico, la corrupción, la informalidad laboral y el acceso limitado a servicios básicos (Henao Trujillo & Sánchez Uribe, 2023).

Otra herramienta esencial en la reducción del riesgo sísmico es la protección financiera, que se puede lograr a través de instrumentos de retención y transferencia del riesgo (Ley 1523, 2012). Un caso destacado es el de la ciudad de Manizales, que ha implementado medidas de protección financiera mediante esquemas de aseguramiento. En este contexto, se diseñó un seguro colectivo voluntario que protege tanto a edificaciones del sector público como del privado, con el objetivo de garantizar el bienestar y la seguridad de la población (Marulanda et al., 2015; Parra Sánchez, 2022).

Las intervenciones correctivas para la mitigación del riesgo incluyen medidas físicas, en donde se destacan las reparaciones, que buscan restaurar la capacidad de carga original de una edificación afectada con daños; la reconstrucción, que implica reconstituir partes gravemente afectadas, garantizando una capacidad de carga igual o superior a la original; y el reforzamiento estructural, que incrementa la capacidad de carga sin que la estructura presente necesariamente daños previos (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002; Follador et al., 2024). Entre las técnicas de reforzamiento más comunes están el uso de polímeros reforzados con fibra, el recubrimiento con ferrocemento y concreto lanzado, el confinamiento de elementos, la adición de acero de refuerzo y la aplicación de mallas sintéticas (Ashraf et al., 2012).

Las medidas físicas se diferencian entre intervenciones convencionales y no convencionales. Las convencionales incluyen la adición de elementos de concreto reforzado, el encamisado de columnas y vigas con acero o concreto, y el uso de materiales compuestos como fibras de carbono o vidrio. También se emplean refuerzos metálicos, el aumento de sección de los elementos estructurales o la instalación de sistemas de aislamiento sísmico (Estrada Santos & Yoplac Carhuatanta, 2019; Murillo Carranza, 2021). Las no convencionales recurren a nuevas técnicas constructivas y materiales alternativos, como polímeros reforzados con fibra (Ospina Molina & Castrillón Arenas, 2021), aleaciones con memoria de forma y nanomateriales (del Río Bueno, 2004). Además, existen técnicas de reforzamiento, como el tratamiento superficial, costura de grietas con inyección de lechada epóxica, sustitución de mortero, uso de reforzamiento externo con materiales como bambú y polímeros reforzados con fibra de vidrio, refuerzo en las uniones de los muros, postensado con neumáticos de caucho, confinamiento de muros y malla de refuerzo en diferentes materiales (Bhattacharya et al., 2014).

Dentro de las técnicas convencionales de reforzamiento, el tratamiento superficial se centra en reparar los daños en los muros de mampostería no reforzada. Entre las técnicas

más destacadas se encuentra el concreto lanzado, que mejora la resistencia al corte y a la flexión, previene grietas y aumenta la capacidad de deformación. Otra opción, no convencional, es la instalación de mallas de bambú, destacada por su bajo costo y facilidad de aplicación sin requerir mano de obra especializada. Así mismo, como medida convencional de reforzamiento, los polímeros reforzados con fibra son valorados por su resistencia, ligereza, anticorrosión y facilidad de implementación; en particular se menciona como alternativa no convencional el mortero reforzado con textiles, con fibras de alta resistencia en una matriz inorgánica, ofrece compatibilidad con los sustratos, mayor rentabilidad, rendimiento a altas temperaturas y permeabilidad mejorada (Keshmiry et al., 2024).

Otra técnica convencional es la costura de grietas mediante la inyección de lechada epóxica, que restaura la unión en las estructuras de mampostería. Es económica, de fácil acceso, operación sencilla y no afecta el aspecto de la edificación. El rejuntado de mampostería, por su parte, reemplaza el mortero por uno compatible con las propiedades de las unidades de mampostería y añade barras de refuerzo en las grietas (Keshmiry et al., 2024).

El postensado de elementos de acero al interior de la mampostería, como alternativa convencional, incrementa la ductilidad y resistencia de las estructuras, reduciendo la deflexión por grietas sin alterar el aspecto de las edificaciones, aunque tiene un costo relativamente alto y puede causar contracción en la mampostería, así como sufrir corrosión por la exposición de los elementos de acero (Keshmiry et al., 2024). Para la construcción de muros de mampostería postensada se comienza con la fundición de una viga de concreto que sirve como base para el muro, en la cual se ancla un cable de presfuerzo. A continuación, se levanta el muro de mampostería, dejando los cables libres y sueltos, y se agrega el mortero de protección en las perforaciones verticales que contienen los tensores. Es importante que el tensado se realice mientras el mortero esté fluido y maleable. Finalmente, se coloca la placa permanente de transmisión y se ejecuta el tensado del cable (Zalamea León, 2013).

El confinamiento con elementos de concreto refuerza la mampostería en las esquinas, uniones y límites de las aberturas mediante la construcción de elementos de concreto reforzado, mejorando así la ductilidad en el plano de los muros y su capacidad de disipación de energía (Keshmiry et al., 2024).

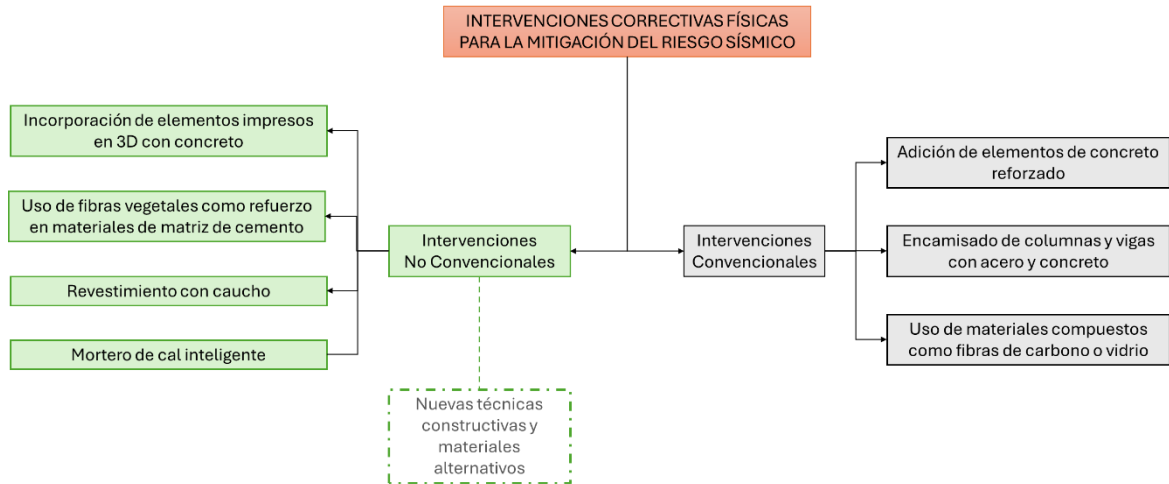
Finalmente, el uso de refuerzo con barras de acero horizontales en forma de "L", colocadas cada dos hileras de mampostería (Nayak & Dutta, 2016), mejora significativamente las uniones de los muros, las cuales son una de las áreas más vulnerables en las edificaciones de mampostería. Este tipo de refuerzo aumenta la resistencia a la flexión y al cizallamiento, incrementando la resistencia y rigidez en la dirección del plano. Sin embargo, se ha observado que esta técnica puede provocar corrosión en los elementos de acero debido a la exposición (Keshmiry et al., 2024).

Entre las técnicas no convencionales de reforzamiento estructural para edificaciones de mampostería no reforzada, destacan la incorporación de elementos impresos en 3D con concreto (Gebhard et al., 2023), el uso de fibras vegetales como refuerzo en materiales compuestos de matriz de cemento, como la fibra de coco (Laverde et al., 2022; Ranjan et al., 2023), y materiales como la malla de gallinero (Mahesh et al., 2023). También se

incluyen el recubrimiento con caucho (Sadek & El-Attar, 2015) y el uso de mortero de cal inteligente, que incorpora rellenos conductores como grafito, nanotubos y microfibras de carbono (Drougkas et al., 2023).

En la Figura 1-3 se presentan las clases de intervenciones físicas para la mitigación del riesgo sísmico, diferenciadas entre intervenciones convencionales y no convencionales.

**Figura 1-3.** Intervenciones correctivas físicas convencionales y no convencionales.



Fuente: Elaboración propia.

En Colombia, el Título E de la NSR-10 establece los requisitos para la construcción y reforzamiento sismorresistente de viviendas de uno y dos niveles de mampostería confinada y bahareque encementado, teniendo en cuenta las condiciones estructurales que permiten un funcionamiento adecuado de estas edificaciones ante cargas laterales y verticales en diferentes zonas de amenaza sísmica (Ministerio de Ambiente, 2010). Así mismo, se presentó una guía para la evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería de origen informal (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023), considerando opciones viables en cuanto a costos, factibilidad de ejecución y pertinencia.

Build Change & Swisscontact (2015) desarrollaron el Manual de Evaluación y Reforzamiento Sísmico para Reducción de Vulnerabilidad en Viviendas, para ser utilizado en el tipo de edificación que típicamente existe en las áreas de construcción informal de Colombia, específicamente la de mampostería de baja altura, de hasta un máximo de 3 niveles, con cubierta liviana o cubierta en placa, proporcionando información sobre soluciones y técnicas de reforzamiento que se pueden implementar con materiales, mano de obra y equipos disponibles localmente.

## 1.3 Objetivos

A continuación, se plantean el objetivo general y los específicos para este trabajo de investigación.

### 1.3.1 Objetivo general

Diseñar estrategias de mitigación del riesgo sísmico en una zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, Medellín.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar el riesgo sísmico de una zona periurbana del Corregimiento de San Cristóbal, Medellín, empleando un modelo de amenaza sísmica basado en un escenario de amenaza sísmica probable, funciones de fragilidad sísmica y un modelo de exposición sísmica a escala de edificación.
- Diseñar intervenciones estructurales, con facilidad de ser replicadas, para algunas de las edificaciones encontradas en una zona periurbana del Corregimiento de San Cristóbal Medellín, empleando técnicas y materiales convencionales y no convencionales para la construcción y soluciones basadas en la naturaleza.
- Diseñar estrategias para la mitigación del riesgo sísmico en una zona periurbana del Corregimiento de San Cristóbal, Medellín que incluyan los diseños de intervención estructural planteados previamente.

## 1.4 Estructura de la tesis

En el *capítulo introductorio* se presenta el marco teórico que sustenta este trabajo de investigación, abarcando el estado del arte sobre los modelos de amenaza, vulnerabilidad, fragilidad, exposición y riesgo sísmico. Así mismo, se aborda el uso de software para la evaluación del riesgo sísmico y se exploran las intervenciones destinadas a su reducción. Además, se establecen el objetivo general y los específicos que guía el desarrollo del trabajo de investigación.

El *segundo capítulo* detalla la metodología empleada, describiendo el enfoque y tipo de investigación, la población objetivo, el lugar de estudio y los métodos utilizados para comprender y reducir el riesgo sísmico.

En el *tercer capítulo* se explica el proceso de estimación del riesgo sísmico, incluyendo una descripción general sobre el lugar y polígonos de estudio, y una evaluación detallada de la amenaza sísmica, el modelo de exposición, el modelo de vulnerabilidad y los resultados obtenidos en cuanto al riesgo sísmico.

El *cuarto capítulo* define las medidas de intervención necesarias para la mitigación del riesgo sísmico, empleando medidas estructurales, incluyendo técnicas y materiales convencionales y no convencionales, además de medidas no estructurales como una guía para la construcción de un plan familiar de emergencias y un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico.

Finalmente, se presentan las *conclusiones y recomendaciones* partiendo de los resultados obtenidos en el trabajo de investigación. Estas incluyen la importancia de implementar estrategias de mitigación del riesgo sísmico basadas en medidas estructurales y no estructurales, la necesidad de fortalecer la capacidad técnica de las autoridades locales para la evaluación y gestión del riesgo, y la urgencia de sensibilizar a la comunidad sobre el riesgo sísmico y las acciones necesarias para reducir su vulnerabilidad y aumentar la resiliencia. Así mismo, se destaca la utilidad de los estudios de riesgo sísmico para orientar las decisiones de planificación y reforzar las capacidades del territorio frente a eventos sísmicos.



## **2. Metodología**

La metodología en una investigación se refiere al diseño sistemático del estudio, asegurando la validez y fiabilidad de los resultados, y respondiendo a los objetivos planteados (Ortega, 2023). En este trabajo de investigación, se establece una metodología alineada con el objetivo general y los específicos, describiendo los procedimientos, técnicas, actividades y demás estrategias metodológicas necesarias.

### **2.1 Enfoque y tipo de investigación**

Esta investigación adopta un enfoque mixto, lo cual implica procesos de recolección, análisis y vinculación de datos tanto cuantitativos como cualitativos (Hernández Sampieri et al., 2014). En primer lugar, el enfoque cualitativo se centra en describir el fenómeno a partir de sus rasgos determinantes (Bernal, 2010), utilizando la recolección y análisis de los datos para ajustar las preguntas de investigación o identificar nuevas interrogantes durante el proceso de interpretación (Hernández Sampieri et al., 2014). De hecho, inicialmente se aplicó este enfoque cualitativo para formular preguntas relacionadas con los escenarios de riesgo sísmico en una zona periurbana del Corregimiento de San Cristóbal, Medellín.

Por otro lado, el enfoque cuantitativo se basa en la medición de características de un fenómeno (Bernal, 2010) y emplea la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández Sampieri et al., 2014).

### **2.2 Población y grupo focal de estudio**

Para la selección de los polígonos de estudio, descritos más adelante, se estableció como condición inicial la elección de manzanas completas, considerando parámetros como el tipo de sistema estructural, el número de niveles y las áreas en planta. Además, se tuvo en cuenta que estas edificaciones no estuvieran localizadas en zonas con restricciones urbanísticas, tales como zonas de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, así como áreas de retiro cercanas a fuentes hídricas.

Por otra parte, la información de las edificaciones en los polígonos seleccionados se recopiló a través del levantamiento de datos utilizando Google Street View. Las variables obtenidas para el análisis de cada edificación incluyen las coordenadas de localización, el

tipo de sistema estructural, el número de viviendas por edificación, el número de pisos, el tipo de sistema de cubierta, el tipo de losa de entrepiso, el ancho de fachada principal [entendida esta como la fachada en la que se encuentra la entrada principal de la edificación], el largo de la edificación [medida perpendicular a la fachada de la entrada principal] y observaciones generales sobre el estado de conservación.

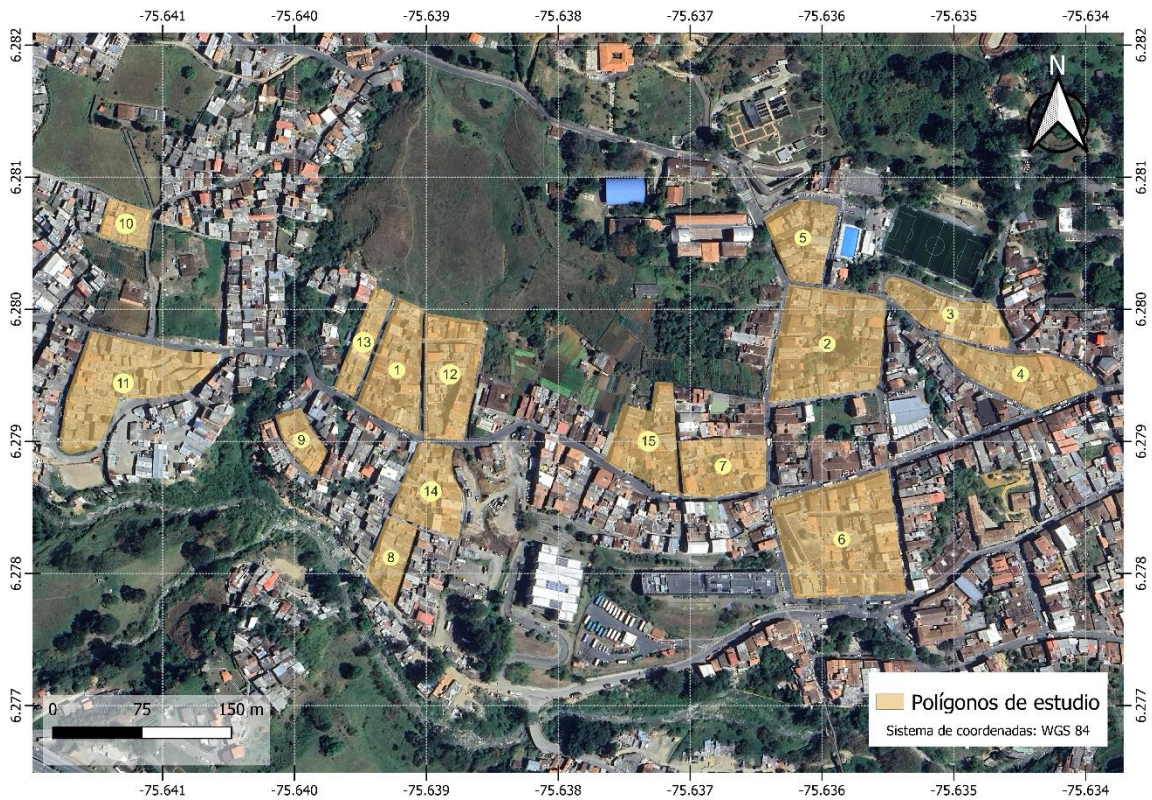
## 2.3 Lugar de estudio

Este proyecto de investigación se desarrolló en la cabecera urbana del Corregimiento de San Cristóbal, en Medellín, ubicado al occidente de la ciudad, en la vertiente norte de la cuenca de la quebrada La Iguaná (Corporación Penca de Sábila, 2006). El parque principal se localiza en las coordenadas geodésicas Longitud: -75.635740, Latitud: 6.277451, con el geode de referencia WGS 84.

Las direcciones de referencia de los polígonos de estudio se listan a continuación y en la Figura 2-1 se muestran los polígonos de estudio en vista satelital:

1. Carreras 134 y 135, con calle 63.
2. Carreras 130 y 131, con calles 63C y 64.
3. Carreras 129 y 129A, con calles 64 y 64A.
4. Carreras 128 y 129A, con calles 63 y 64.
5. Carreras 130B y 131, con calles 64 y 65.
6. Carreras 130 y 131, con calles 62 y 63.
7. Carreras 131 y 132, con calles 63 y la servidumbre con nomenclatura Carrera 131 N°63-49.
8. Carreras 133D y 134, con calles 62 y 62C.
9. Carreras 135 y 136, con calles 62C y 62D.
10. Carreras 140 y 142, con calles 64 y 65.
11. Carreras 139 y 141, con calles 62 y 63.
12. Carreras 133C y 134, con calle 63.
13. Carreras 135 y 136, con calle 63.
14. Carreras 133C y 134, con calles 62C y 63.
15. Carrera 132 con calle 63.

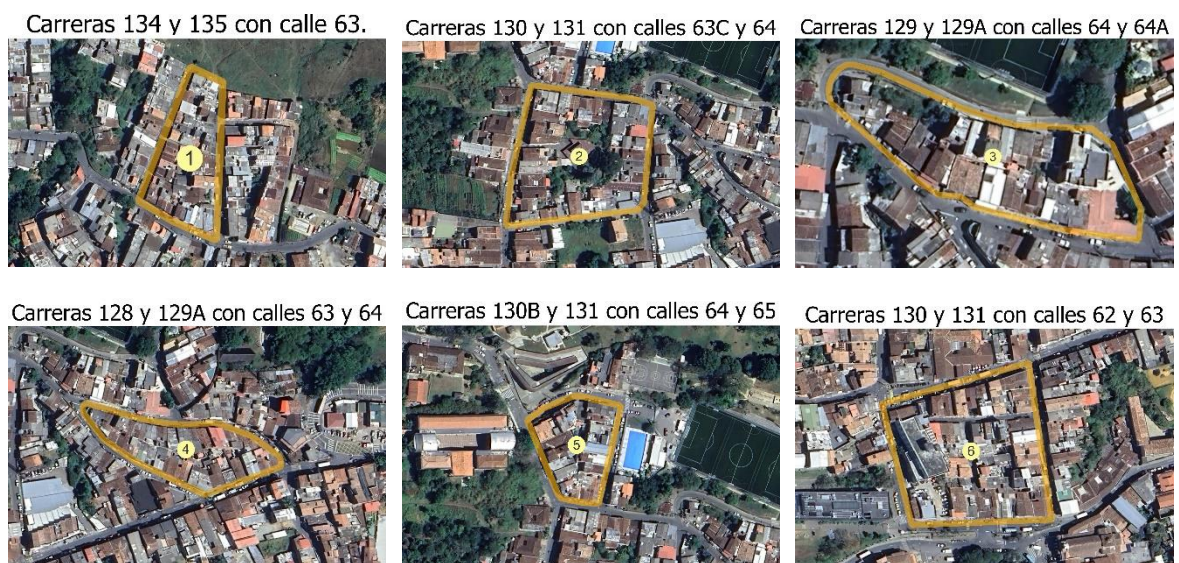
**Figura 2-1.** Polígonos de estudio en vista panorámica.



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, en la Figura 2-2 se presentan los polígonos de estudio con una vista detallada.

**Figura 2-2.** Polígonos de estudio con una vista detallada.



**Figura 2-2.** Polígonos de estudio con una vista detallada (continuación).



Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Métodos

Las etapas para el desarrollo de esta investigación, presentadas en la Figura 2-3, están vinculadas tanto a los objetivos específicos como con los procesos de conocimiento y reducción del riesgo de desastres, planteados en la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Ley 1523, 2012).

### 2.4.1 Conocimiento del riesgo sísmico

#### Estimación del riesgo sísmico

En la etapa del conocimiento del riesgo sísmico, se llevó a cabo la estimación del mismo a partir de la interacción de las variables clave en un escenario de riesgo sísmico, tales como la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición.

Para el desarrollo de la etapa se comenzó con una revisión bibliográfica inicial, presentada en el *numeral 1.2*, cuyo propósito fue conocer el estado del arte global sobre el riesgo sísmico y, de este modo, formular las preguntas de investigación. Seguidamente, se procedió a definir los polígonos de estudio, basándose en los criterios definidos en el *numeral 2.2* y la recolección de información en campo. Esta información se obtuvo mediante el diligenciamiento de formularios técnicos para cada edificación con el fin de construir el modelo de exposición sísmica.

Además, se planteó el escenario de riesgo sísmico tomando como referencia el evento sísmico definido en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) y de dos fallas para los ambientes tectónicos superficial y profundo planteados por Acevedo et al. (2020), para la construcción del modelo de amenaza sísmica.

En cuanto al modelo de fragilidad, se realizó una revisión bibliográfica con el fin de determinar las funciones de fragilidad aplicables a las edificaciones identificadas en los polígonos de estudio, tomando en cuenta las características definidas en el modelo de exposición sísmica.

Finalmente, se realizó el procesamiento de las variables de amenaza, fragilidad y exposición en el aplicativo *OpenQuake*, con el fin de disponer de la información necesaria para la estimación del riesgo sísmico, descrita en el *capítulo 3*.

## 2.4.2 Reducción del riesgo sísmico

### Diseño de intervenciones estructurales

En las zonas rurales y periurbanas de los países en desarrollo, donde gran parte de la población es de escasos recursos y carece de conocimientos técnicos en ingeniería o construcción, se ha avanzado muy poco en la protección de las viviendas frente a los riesgos sísmicos. En estas áreas, la mampostería no reforzada es la forma predominante de construcción. Aunque este tipo de edificaciones responde adecuadamente a cargas verticales debido a la capacidad de resistencia a la compresión de la mampostería, su desempeño frente a cargas sísmicas es considerablemente limitado. La vulnerabilidad de estas estructuras ante movimientos sísmicos representa un grave riesgo para la seguridad de las comunidades, especialmente en regiones propensas a terremotos. Por ello, es fundamental implementar intervenciones de reforzamiento que mejoren la resistencia a la tensión de estas edificaciones, asegurando su sostenibilidad y reduciendo el riesgo de colapso durante los sismos. Estas acciones son esenciales no solo para salvaguardar la vida de los habitantes, sino también para minimizar las pérdidas económicas y materiales en estas comunidades vulnerables (Bhattacharya et al., 2014).

Para la formulación del diseño de intervenciones estructurales, se realizó una revisión bibliográfica sobre las intervenciones estructurales planteadas en edificaciones de mampostería no reforzada, presentada en el *numeral 1.2.7*, y se procedió con el diseño de intervenciones estructurales genéricas que puedan ser replicadas con facilidad en diferentes edificaciones, con criterios de soluciones basadas en la naturaleza para el

reforzamiento estructural y la utilización de materiales no convencionales en la repotenciación de edificaciones de esta tipología estructural como la madera, guadua, entre otras, como se presenta en el *capítulo 4*.

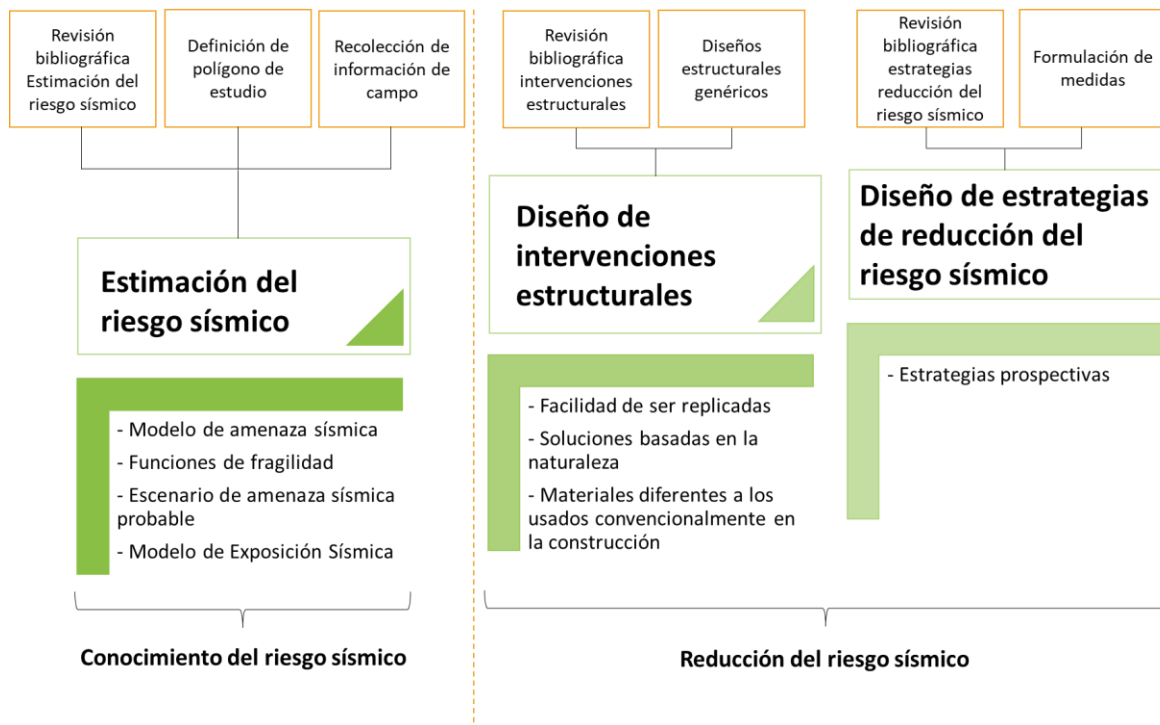
### Diseño de estrategias de reducción del riesgo sísmico

En esta etapa, se continuó con la revisión bibliográfica sobre intervenciones no estructurales y no estructurales relacionadas con el riesgo sísmico, con el objetivo de formular estrategias de reducción enfocadas en el diseño de intervenciones prospectivas.

Se propusieron medidas estructurales para reducir la vulnerabilidad sísmica, utilizando técnicas y materiales convencionales adaptados a viviendas de mampostería no reforzada. Para ello, se seleccionó una planta típica de la zona de estudio, identificando los puntos clave para intervención. Entre las técnicas propuestas se incluyen el reforzamiento de esquinas con mallas de bambú y el fortalecimiento de muros mediante mallas de bandas de polipropileno y fibras de algodón, recubiertas con mortero.

Por otro lado, las medidas no estructurales se diseñaron en forma de guías metodológicas orientadas a la elaboración de un plan familiar de emergencias y un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico.

**Figura 2-3.** Estructura de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

## 3. Estimación del riesgo sísmico

Para llevar a cabo una evaluación de riesgo sísmico a nivel urbano, es fundamental considerar tres componentes: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad sísmicas (Yepes-Estrada et al., 2022). En la *sección 3.1*, se ofrece una visión amplia de las características geológicas y geomorfológicas del departamento de Antioquia, el Distrito de Medellín y el Corregimiento de San Cristóbal, con el fin de tener una mejor comprensión de la amenaza sísmica. Además, se describe la dinámica del crecimiento poblacional y la cultura constructiva, aspectos esenciales para entender la vulnerabilidad sísmica.

En la *sección 3.2*, se describen las fuentes de sismicidad presentes en la región donde se encuentran los polígonos de estudio y los modelos de movimiento del terreno que se emplearon para evaluar la intensidad de la acción sísmica, estos modelos consideran la atenuación de la intensidad sísmica tanto por expansión geométrica, en la que la energía se distribuye a medida que la superficie del frente de onda crece, como la atenuación física, que ocurre cuando los materiales del interior de la Tierra absorben parte de la energía de las ondas sísmicas (Cornell, 1968).

En la *sección 3.3*, se detalla el inventario de las edificaciones urbanas que están expuestas a la amenaza sísmica, correspondientes a los polígonos de estudio ubicados en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, en Medellín.

La *sección 3.4* explica la metodología utilizada para estimar la fragilidad física de las edificaciones. Para ello, se empleó un conjunto de curvas de fragilidad que permiten estimar el riesgo sísmico en edificios que comparten características estructurales similares.

Finalmente, en la *sección 3.5* se presentan los resultados obtenidos para los polígonos de estudio, localizados en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal en el Distrito de Medellín.

### 3.1 Generalidades

#### Localización

El departamento de Antioquia se ubica en la región noroccidental de Colombia, dentro de las cordilleras Central y Occidental de la cadena de Los Andes, con un área total de 63.612 km<sup>2</sup>. El territorio, predominantemente montañoso, alberga parte de las fosas de los ríos Magdalena, Cauca, Porce y Atrato (González, 2001). La Cordillera Central se extiende transversalmente desde el Valle del río Magdalena en el oriente hasta el Valle del río

Cauca, dividiéndose en dos ramales por el río Porce desde su nacimiento en la Cuchilla de San Miguel [en el municipio de Caldas, al sur de Medellín], hasta su desembocadura en el río Cauca. A partir del nacimiento del Río Aburrá, la cordillera se ensancha, dando origen al Valle de Aburrá y a los Llanos de Cuivá (González, 2001)

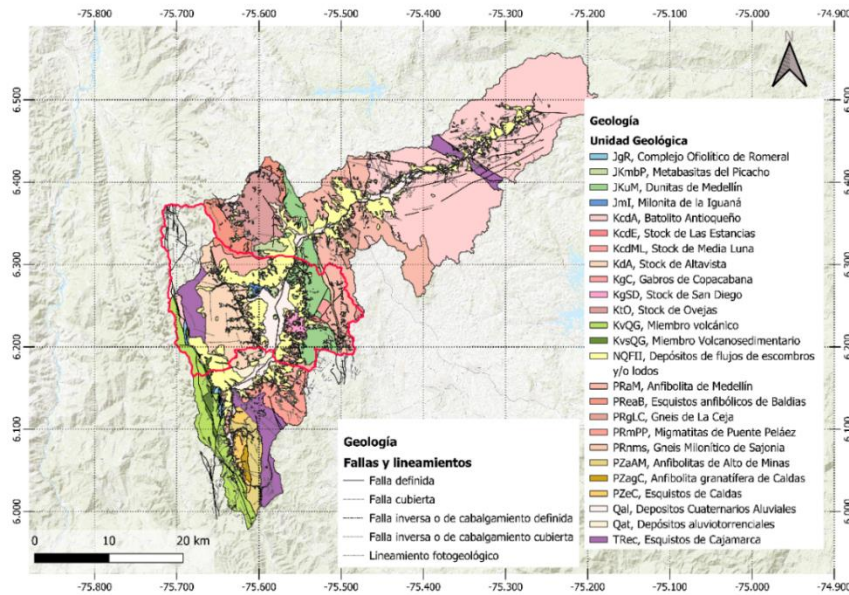
Medellín se encuentra en el sector sur del departamento de Antioquia, específicamente en la cuenca del Río Aburrá. Desde una perspectiva física, el Valle de Aburrá es una depresión situada en el centro de la parte norte de la Cordillera Central, siguiendo el curso del Río Aburrá, que tiene una dirección predominante Sur-Norte con una ligera desviación al Nororiente. El Valle se distingue por una gran variedad de unidades litológicas, fallas geológicas y una geomorfología relativamente compleja (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023).

## Geología

En términos geológicos, Medellín está situada en una región que incluye el Valle de Aburrá y los altiplanos circundantes, donde emergen diversas unidades litodémicas con rocas de distintas edades, orígenes y composiciones. Las edades de estas rocas abarcan desde el paleozoico hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición, se encuentran rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas, gabros y basaltos; rocas volcanosedimentarias y depósitos aluviales de vertiente, además de depósitos de origen antrópico (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023). Estas unidades litodémicas están limitadas por fallas regionales como el sistema Cauca – Romeral y por fallas menores con orientación Norte – Sur (Fondo Adaptación et al., 2016). La Figura 3-1 muestra la caracterización geológica en términos de fallas y unidades geológicas en la cuenca del río Aburrá, donde se localizan el Distrito de Medellín y los polígonos de estudio.

La Figura 3-2 ofrece un acercamiento a las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, destacando la presencia de Metabasitas del Picacho, Stock de Altavista, Anfibolita de Medellín, Depósitos Cuaternarios Aluviales, Depósitos Aluviotorrenciales y Depósitos de flujos de escombros y/o lodos. En esta última unidad geológica se encuentran localizados la totalidad de los polígonos de estudio.

Las Metabasitas del Picacho corresponden a metagabros con textura ígnea, gabros miloníticos y anfibolitas de varios tipos asociados a una secuencia de piso oceánico y muestran evidencias de haber sufrido procesos de deformación. El Stock de Altavista se desarrolla en un relieve de cuchillas, con lineamientos que controlan el cauce de las quebradas que drenan hacia el Valle de Aburrá, y está compuesto por rocas de dioritas hornbléndicas, cuarzodioritas y gabros (Fondo Adaptación et al., 2016). La Anfibolita de Medellín es una roca compuesta principalmente por hornblenda y feldespato, de grano medio a fino y formas euhedrales, con textura generalmente isotrópica a bandeada, a veces difícil de diferenciar de un gabro o una diorita; estas rocas han sufrido un metamorfismo de medio a alto grado (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012).

**Figura 3-1.** Geología de la cuenca del Río Aburrá.

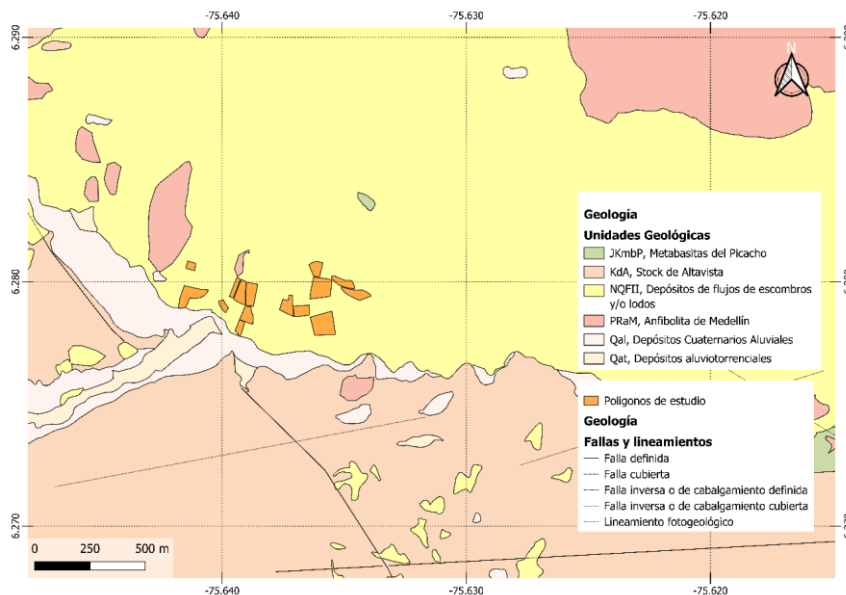
Fuente: Elaboración propia a partir de (Fondo Adaptación et al., 2016).

Los depósitos cuaternarios aluviales están asociados a terrazas y abanicos del río Aburrá y sus quebradas afluentes, como la quebrada La Iguaná. Se caracterizan por ser moderadamente seleccionados, con clastos subangulosos a subredondeados. Están asociados a un relieve colinado producto de la incisión. En cuanto a los depósitos aluvio torrenciales se caracterizan por ser clasto-soportados, con clastos desde formas redondeadas hasta subangulosas (Fondo Adaptación et al., 2016).

Los depósitos de flujos de escombros y/o lodos se identifican como un tipo de movimiento en masa que incluye material fino y grueso, desplazándose como un fluido debido a su alto contenido de agua. Al ser depositados, estos flujos no presentan estructuras debido al arrastre y movimiento del material, aunque con el tiempo, pueden desarrollar nuevas estructuras debido a procesos exógenos como la meteorización, lixiviación y enterramiento (Saldaña Rodríguez, 2022). Los polígonos de estudio están ubicados en depósitos de flujos de escombros y/o lodos.

Cerca de los polígonos de estudio se destacan trazas de las fallas San Jerónimo, Minas y Santa Isabel. Además, se observan rasgos tectónicos definidos por geformas como lomos deflectados, quebradas o corrientes asimétricas y cambios bruscos de pendientes. También aparecen zonas de cizalla, salbanda y signos de fracturación de rocas, aunque no se identifica una zona de falla propiamente dicha (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023).

Figura 3-2. Geología en la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

## Población

El riesgo sísmico puede verse exacerbado por la alta densidad poblacional del Distrito de Medellín, que cuenta con una población total de 2.700.443 personas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2018). Aproximadamente el 75% de esta población se encuentra en estratos socioeconómicos<sup>2</sup> 1, 2 y 3, es decir, con menores recursos económicos, lo que influye en la construcción, caracterizada por una alta informalidad en el crecimiento urbano (Restrepo Isaza, 2014).

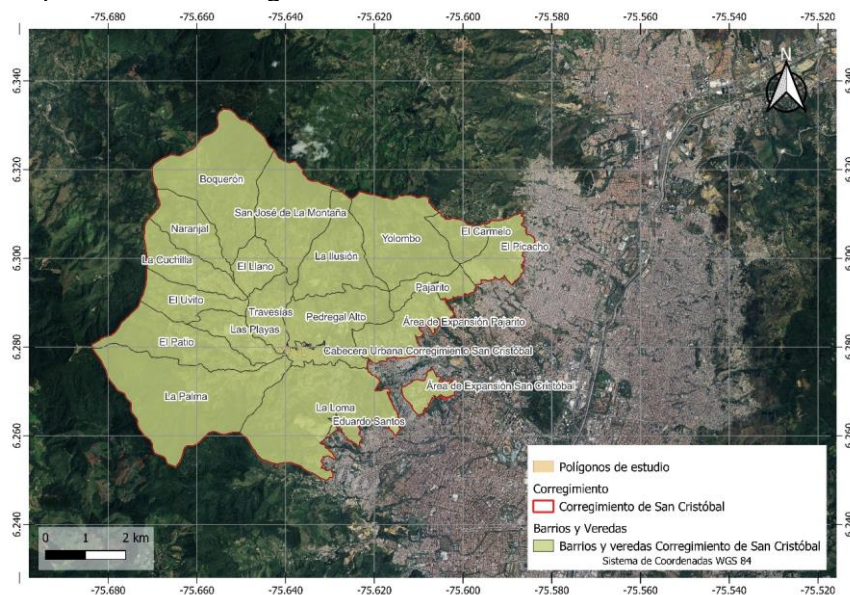
La expansión urbana en la ciudad de Medellín presiona las periferias, con un crecimiento que supera el perímetro urbano debido, entre otros factores, al alto costo del suelo urbano y la incapacidad de cubrir las demandas de vivienda, industria y espacios públicos (Zuluaga Sánchez, 2008). Las nuevas incorporaciones en los márgenes urbanos se realizan en condiciones de alta marginalidad y vulnerabilidad económica, social, política y ecológica; así como la falta de infraestructuras esenciales como electricidad, sanidad, equipamientos y accesos (Zuluaga Sánchez, 2008). Esta situación es uno de los factores que fomenta la

<sup>2</sup> La estratificación socioeconómica es la clasificación de los inmuebles residenciales de una entidad territorial, que se hace en atención al Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios en Colombia (Ley 142, 1994). Los estratos 1, 2 y 3 corresponden a estratos bajos que albergan a los usuarios con menores recursos, los cuales son beneficiarios de subsidios en los servicios públicos domiciliarios; los estratos 5 y 6 corresponden a estratos altos que albergan a los usuarios con mayores recursos económicos, los cuales deben pagar sobrecostos [contribución] sobre el valor de los servicios públicos domiciliarios. El estrato 4 no es beneficiario de subsidios, ni debe pagar sobrecostos, paga exactamente el valor que la empresa defina como costo de prestación del servicio (DANE, 2024).

informalidad en la construcción de viviendas debido a la falta de diseño, ausencia de un ingeniero residente durante la construcción, no emisión de licencias de construcción y la inexistencia de planos, así como la carencia de inspección y control de la calidad de los materiales (Espinoza Malpartida, 2019).

San Cristóbal, es un corregimiento situado en el noroccidente de Medellín, tiene una población de 160.320 habitantes, de los cuales el 51% [82.447] son mujeres y el 49% [77.873] son hombres, con un promedio de 3,4 personas por hogar (Alcaldía de Medellín, 2024b). Limita por el norte con el municipio de Bello, por el oriente con el perímetro urbano de Medellín, por el sur con los corregimientos de Altavista y San Antonio de Prado y por el occidente con el corregimiento de Palmitas. La cabecera del corregimiento se encuentra a 11 kilómetros del centro del Distrito de Medellín siendo la ruralidad más cercana a la cabecera de la ciudad (Alcaldía de Medellín, 2014). En la Figura 3-3 se muestra la superficie del corregimiento de San Cristóbal.

**Figura 3-3.** Superficie del Corregimiento de San Cristóbal.



Fuente: Elaboración propia.

### Geomorfología

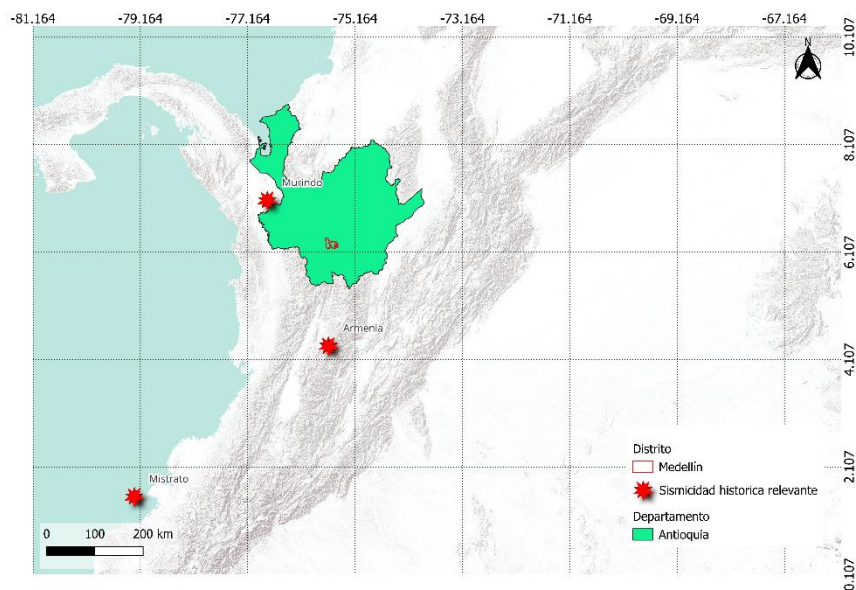
Además de su ubicación y características demográficas, San Cristóbal presenta una geomorfología diversa, con un territorio que presenta pendientes moderadas a altas, entre el 25% y el 40%. Este corregimiento se caracteriza por la abundancia de fuentes hídricas y una alta precipitación, lo que favorece la ocurrencia de fenómenos como la socavación, la erosión superficial y eventos torrenciales relacionados con la quebrada La Iguaná (Robayo & Cano Vélez, 2015). El Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (2016) identifica como fenómenos amenazantes priorizados los movimientos en masa, inundaciones, avenidas torrenciales y deterioro estructural.

## Riesgo de desastres

En un contexto más amplio, el Atlas de Riesgos de Colombia (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, 2018) señala que las principales amenazas para el departamento de Antioquia son terremotos e inundaciones. El Distrito de Medellín ha priorizados los escenarios de riesgo en función de los fenómenos amenazantes, incluyendo movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, sismos, incendios forestales, eventos por afluencia masiva de público y riesgo tecnológico. Así mismo, para el corregimiento de San Cristóbal se ha definido como el peor escenario de riesgo, un sismo de 7,4  $M_w$ , originado en el sistema de fallas Cauca - Romeral, con la posibilidad de movimientos en masa derivados del sismo, afectando a personas, infraestructura pública, líneas vitales y medios de vida (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016).

La información sobre sismicidad histórica de Medellín es bastante limitada (Caballero Acosta, 2014). El Distrito de Medellín se encuentra expuesto a una amenaza sísmica de nivel intermedio, que está principalmente asociada con las sismo-fuentes del noroccidente de Colombia, así como con las fuentes profundas y superficiales del Eje Cafetero y el sistema de fallas Cauca – Romeral. Estas sismo-fuentes han mostrado actividad con intensidades intermedias y han causado daños de importancia, como el sismo de Mistrató de 1979, los sismos de Murindó y Opogadó de 1992, y el sismo de Armenia de 1999 (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016). En la Figura 3-4 se presenta la localización de los sismos relevantes mencionados con respecto al distrito de Medellín.

**Figura 3-4.** Eventos de sismicidad histórica relevante para Medellín.



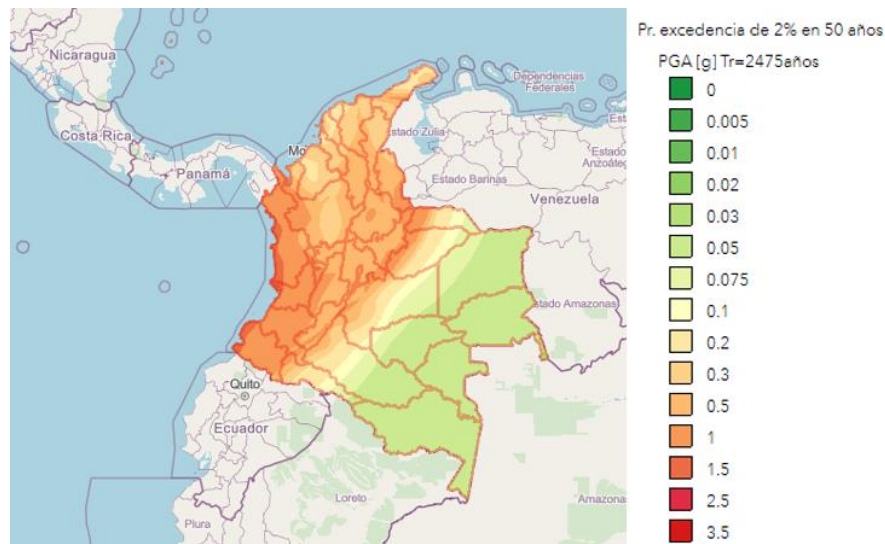
Fuente: Elaboración propia a partir de (Servicio Geológico Colombiano, 2024).

## 3.2 Amenaza sísmica

### 3.2.1 Revisión de literatura

La evaluación de la amenaza sísmica implica prever las futuras sacudidas del suelo provocadas por un sismo en una ubicación específica (García-Pelaez, 2020). El Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia (Arcila et al., 2020), define para el Distrito de Medellín una Aceleración Pico del Terreno [PGA] máxima de 0,30 g en roca, con una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años, como se observa en la Figura 3-5.

**Figura 3-5.** PGA con 2% de probabilidad de excedencia en 50 años. Modelo Nacional de Amenaza Sísmica.



Fuente: (Arcila et al., 2020).

Este modelo considera un catálogo sísmico completo, una base de datos de fallas activas y una base de datos de movimientos sísmicos fuertes, basados en los registros acelerográficos de los eventos sísmicos ocurridos en el territorio nacional. Además, incluye información sobre la preparación del modelo, las fuentes sísmicas locales, los modelos de sismicidad superficial, las GMPE, entre otros elementos (Arcila et al., 2020). Estos elementos son esenciales para comprender la sismicidad de regiones específicas, como Antioquia y el Distrito de Medellín.

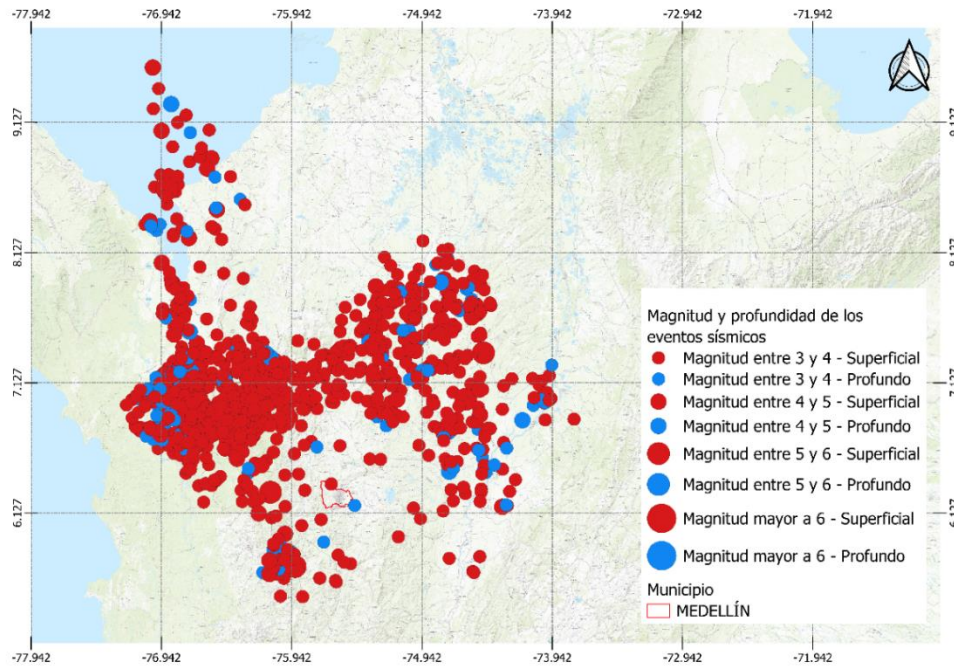
Según la macro sismicidad histórica compilada por el SGC, se han registrado eventos sísmicos en todo el departamento de Antioquia, con magnitudes máximas de 6,5 Mw. La mayoría de estos sismos son superficiales. Medellín ha experimentado eventos de subducción y de corteza, con epicentros reportados en la ciudad que han tenido magnitudes máximas de 3,5 Mw (Servicio Geológico Colombiano, 2024).

Dos terremotos principales han afectado a la región en los últimos 50 años: el terremoto cortical de Mistrató del 23 de noviembre de 1979 con una magnitud de 7,9 [ $M_0$ ], en el que

varios edificios sufrieron daños, y el terremoto de Murindó del 18 de octubre de 1992 con una magnitud de 7,3 [M<sub>s</sub>], generado por la zona sismogénica del "Eje Cafetero". En este último evento, más de 240 edificaciones resultaron fuertemente dañadas (Martínez Rodríguez et al., 1994), a pesar de la baja aceleración registrada en Medellín.

La Figura 3-6 y la Figura 3-7 muestran gráficamente los sismos ocurridos en Antioquia y Medellín, incluyendo su localización, profundidad y magnitud.

**Figura 3-6.** Sismicidad histórica del departamento de Antioquia.

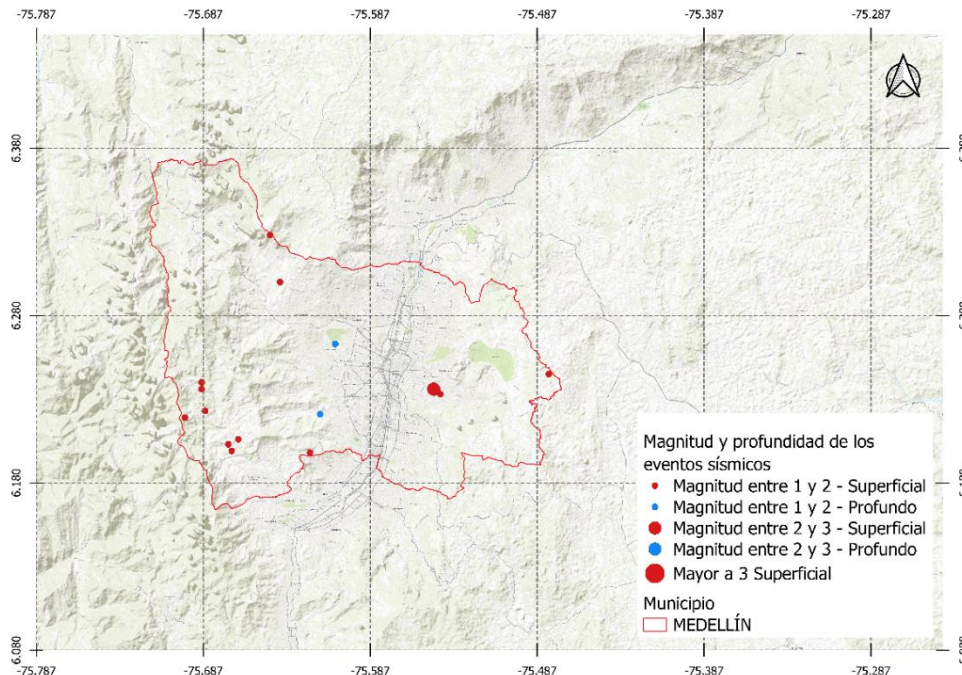


Fuente: Elaboración propia a partir de (Servicio Geológico Colombiano, 2024).

### 3.2.2 Fuentes de amenaza sísmica

En el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia de Arcila et al. (2020), se proponen cuatro componentes clave para la caracterización de los diferentes ambientes sismotectónicos identificados en Colombia:

- *Ambiente cortical:* Este componente incluye las fuentes superficiales activas, es decir, regiones de sismicidad, tectónica y geodinámica con características temporales y espaciales homogéneas. Estas zonas corresponden a áreas cercanas a la superficie en donde se generan sismos de origen cortical, caracterizadas por fallas activas y zonas de deformación cortical (Yepes-Estrada et al., 2022).

**Figura 3-7.** Sismicidad histórica del Distrito de Medellín.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Servicio Geológico Colombiano, 2024).

- *Zona de subducción del Pacífico [interplaca]:* El segundo componente integra fuentes sísmicas poco profundas relacionadas con la subducción activa de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Este modelo incluye tanto fallas activas como fuentes tipo área, y se concentra en la interacción de las placas tectónicas a lo largo de la costa pacífica y la cordillera de los Andes (Yepes-Estrada et al., 2022).
- *Zona de Benioff [intraplaca]:* El tercer componente caracteriza las fuentes sísmicas de subducción profunda, vinculadas al proceso de subducción de la placa de Nazca en el occidente de Colombia. En esta zona se generan sismos dentro de la placa subducida, en un entorno geodinámico distinto al de la subducción superficial (Yepes-Estrada et al., 2022).
- *Nido sísmico de Bucaramanga:* El cuarto componente describe la sismicidad profunda que ocurre en el Nido de Bucaramanga, un fenómeno único en Colombia y en el mundo, caracterizado por una concentración inusual de sismos profundos no relacionados con la subducción de la placa de Nazca. Esta zona de sismicidad intraplaca es independiente de los procesos de subducción y se localiza en el noreste del país (Yepes-Estrada et al., 2022).

Este modelo permite una mejor comprensión de la compleja dinámica sísmica en el territorio colombiano y mejora la evaluación de la amenaza sísmica en diferentes regiones del país. Para estimar la amenaza sísmica en la zona de estudio, se emplearon fuentes sísmicas corticales para representar el ambiente tectónico superficial y fuentes interplaca para el ambiente tectónico profundo, considerando la ubicación geográfica del corregimiento de San Cristóbal.

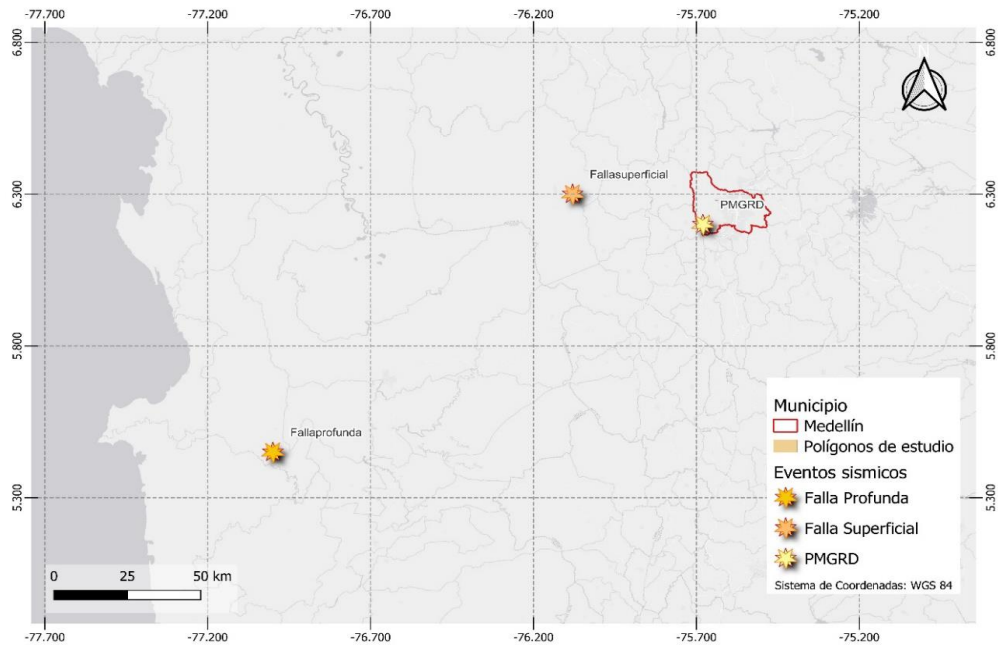
Para la evaluación de la amenaza sísmica en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, se consideraron como fuentes sísmicas las fallas localizadas en el sistema Cauca - Romeral, situado en el occidente del Distrito de Medellín. Las características detalladas de estas fallas se presentan en la Tabla 3-1. Así mismo, las ubicaciones de los eventos sísmicos modelados para el análisis de la amenaza sísmica son mostradas en la Figura 3-8.

**Tabla 3-1.** Características de los eventos hipotéticos de modelación de amenaza sísmica.

<b>Falla Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres Superficial y Profunda</b> (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016)	
Magnitud [Mw]	7,4
Profundidad [km]	7,5/50
Dirección [°]	348
Ángulo de buzamiento [°]	90
Longitud	-75,68
Latitud	6,20
<b>Falla Superficial</b> (Acevedo et al., 2020)	
Magnitud [Mw]	7,5
Profundidad [km]	7,5
Dirección [°]	348
Ángulo de buzamiento [°]	90
Longitud	-76,08
Latitud	6,3
<b>Falla Profunda</b> (Acevedo et al., 2020)	
Magnitud [Mw]	8,4
Profundidad [km]	29,1
Dirección [°]	348
Ángulo de buzamiento [°]	90
Longitud	-76,15
Latitud	5,45

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-8.** Localización de los eventos sísmicos modelados para el análisis de amenaza sísmica.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3 Modelos de movimiento del terreno

Las GMPE's tienen como objetivo estimar la intensidad de la agitación del terreno en caso de que ocurra un evento sísmico. La caracterización del movimiento del suelo en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia (Arcila et al., 2020), se basa en los registros de movimiento fuerte recopilados por el SGC en las últimas décadas. Este es el modelo más reciente para el territorio colombiano, utilizado en la evaluación del riesgo sísmico en las tres ciudades más grandes del país (Yepes-Estrada et al., 2022). Para este trabajo de investigación, se siguieron las recomendaciones del modelo mencionado, empleando las mismas GMPE's que, de acuerdo con Arcila et al. (2020), son las más adecuadas en función del ambiente tectónico: eventos corticales, interplaca [Zona de Subducción del Pacífico] e intraplaca [Zona de Benioff y Nido Sísmico de Bucaramanga].

Dada la ubicación geográfica de la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, se utilizaron las GMPE's indicadas en la Tabla 3-2, correspondientes a eventos corticales e interplaca, para la evaluación de la amenaza sísmica.

**Tabla 3-2.** Ecuaciones de Predicción de Movimiento Fuerte del Suelo [GMPE's] para los ambientes tectónicos en la zona de estudio.

Ecuación de atenuación
<b>Fuentes corticales</b>
Idriss (2014)
Cauzzi et al. (2014)
Abrahamson et al. (2014)
<b>Fuentes de sismicidad profunda – Zona de Subducción del Pacífico [Interplaca]</b>
Zhao et al. (2006)
Abrahamson et al. (2016)
Montalva et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia a partir de (Arcila et al., 2020).

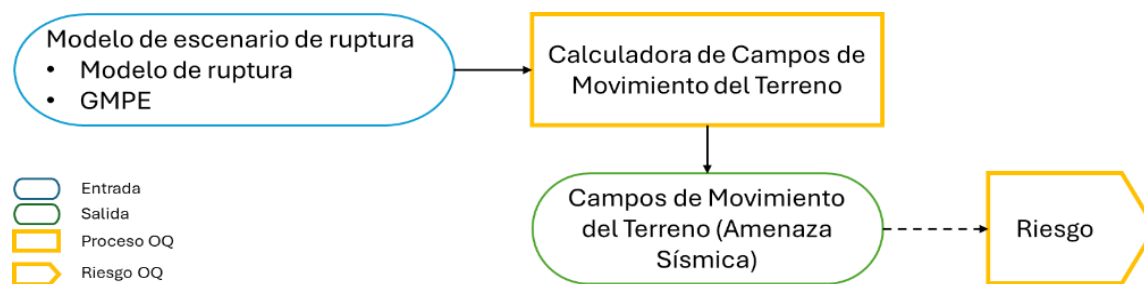
### 3.2.4 Resultados de la amenaza sísmica

Para llevar a cabo la evaluación de la amenaza sísmica para los polígonos de estudio ubicados en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, se utilizó un modelo determinista que integró la geología, la actividad tectónica y la sismología de la región.

En este contexto, el software *OpenQuake Engine* jugó un papel clave al utilizar un formato basado en XML, denominado *Natural Hazard Risk Markup Language* [NRML], para describir tanto los datos de entrada como de salida. El esquema NRML define el modelo de fuente sísmica utilizando cuatro tipologías posibles: punto, falla simple, falla compleja y área (Monelli et al., 2012), lo que facilita la representación de las fuentes sísmicas de la región.

Además, el software emplea GMPE's para estimar la amenaza sísmica, teniendo en cuenta los efectos de sitio, que son fundamentales para una evaluación más precisa. En la Figura 3-9 se presenta el flujo de trabajo para la calculadora de riesgo basada en escenarios dados empleada por *OpenQuake*, que ilustra el proceso seguido para este análisis.

**Figura 3-9.** Flujo de trabajo para la calculadora de riesgo basada en escenarios dados.



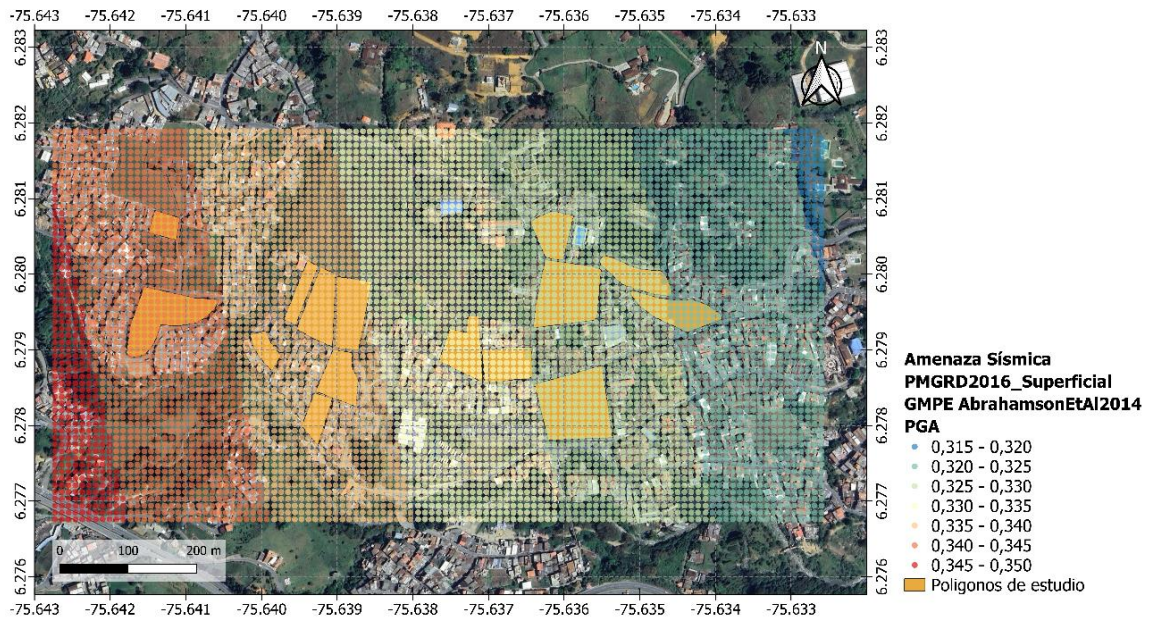
Fuente: Adaptado de (Monelli et al., 2012).

Para las condiciones del sitio, se adoptó un método que utiliza parámetros uniformes con un valor de referencia de  $V_{s30}$  de 760 m/s, inferido a partir de las condiciones geológicas de la zona de estudio. Este valor de referencia permite una representación adecuada de las condiciones del suelo. Adicionalmente, se estableció que la profundidad mínima a la que el valor de referencia de  $V_{s30}$  es igual o superior a 1 km/s es de 100 metros, y la profundidad mínima a la que el valor de referencia de  $V_{s30}$  es igual o superior a 2,5 km/s es de 2 metros, aportando una mayor precisión en la modelación del comportamiento del suelo (Eraso & Montejo, 2019).

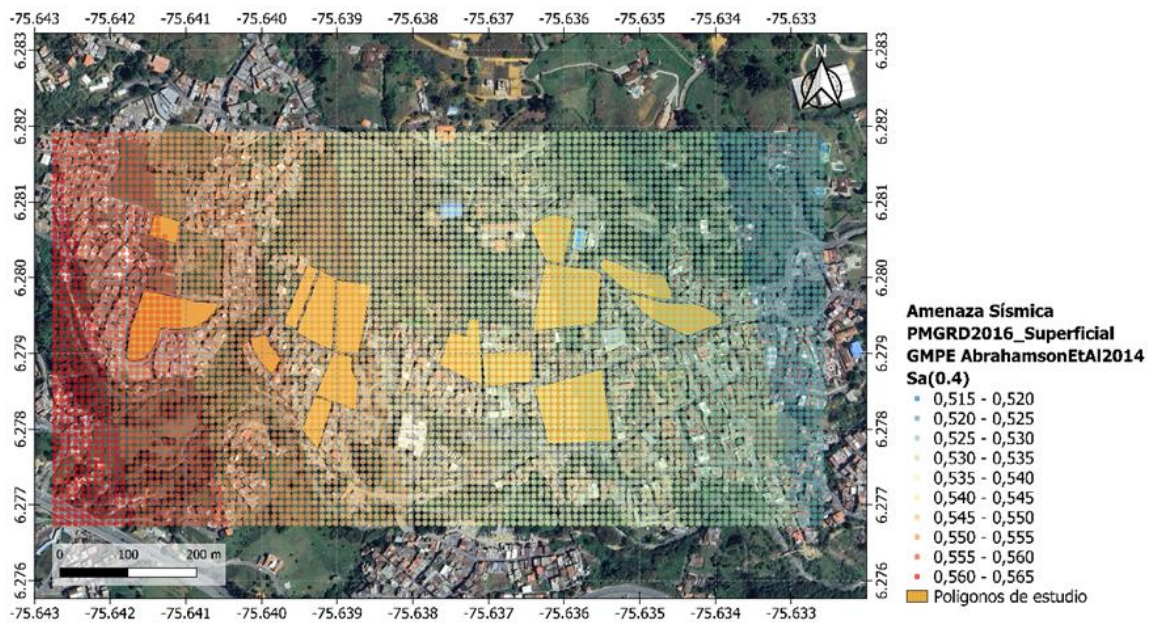
Por otra parte, conociendo detalles específicos del evento sísmico, como el tipo de falla, la magnitud y la geometría generada, es posible calcular la intensidad de la agitación del terreno durante el sismo. Esta intensidad, distribuida espacialmente, se denomina campos de movimiento del terreno (GEM Global Earthquake Model, 2020), los cuales permiten evaluar el impacto del sismo en diferentes áreas.

Finalmente, los resultados de la amenaza sísmica, expresados como campos de movimientos del terreno, en términos de PGA y la aceleración espectral a los 0.4 segundos [SA (0.4)], se obtuvieron para una retícula que abarca los polígonos de estudio, evaluándose para cada uno de los escenarios sísmicos definidos. Los resultados se presentan en la Figura 3-10, Figura 3-11, Figura 3-12, Figura 3-13, Figura 3-14, Figura 3-15, Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18, Figura 3-19, Figura 3-20 y Figura 3-21, donde se pueden visualizar los efectos proyectados para cada caso.

**Figura 3-10.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico PMGRD2015 Superficial y las GMPE's AbrahamsonEtAl2014. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



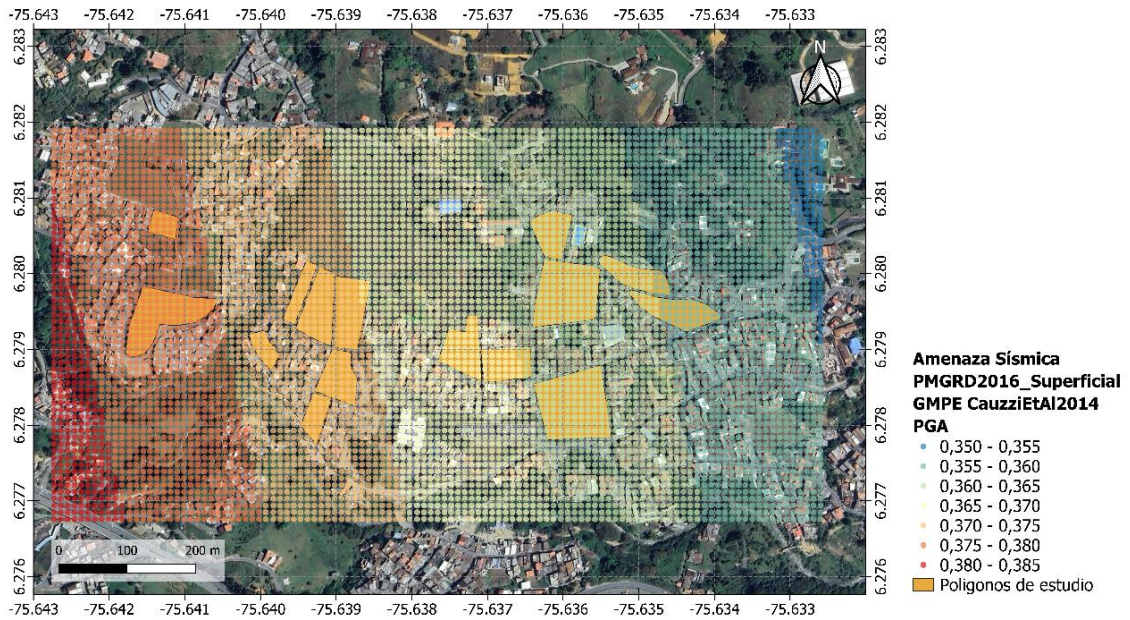
a)



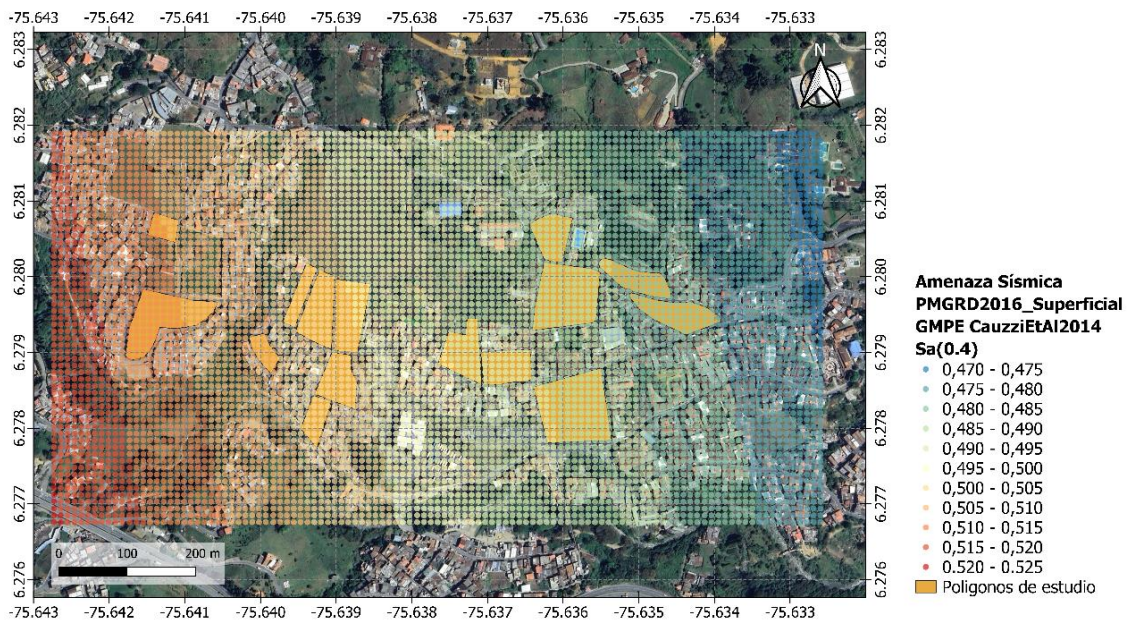
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-11.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico PMGRD2015 Superficial y las GMPE's CauzziEtAl2014. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



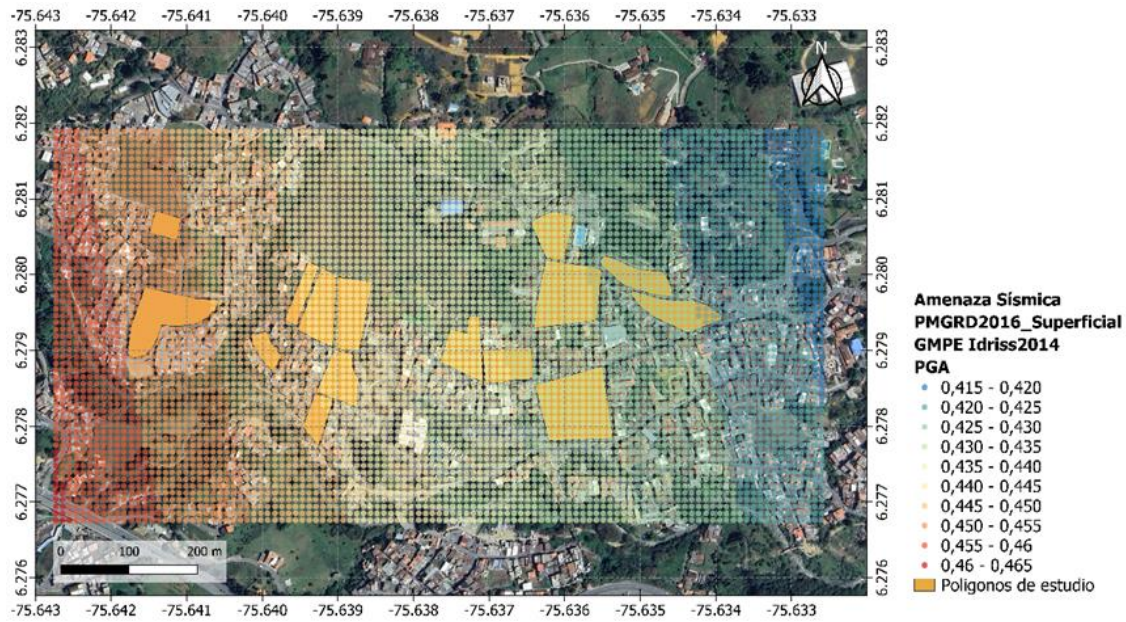
a)



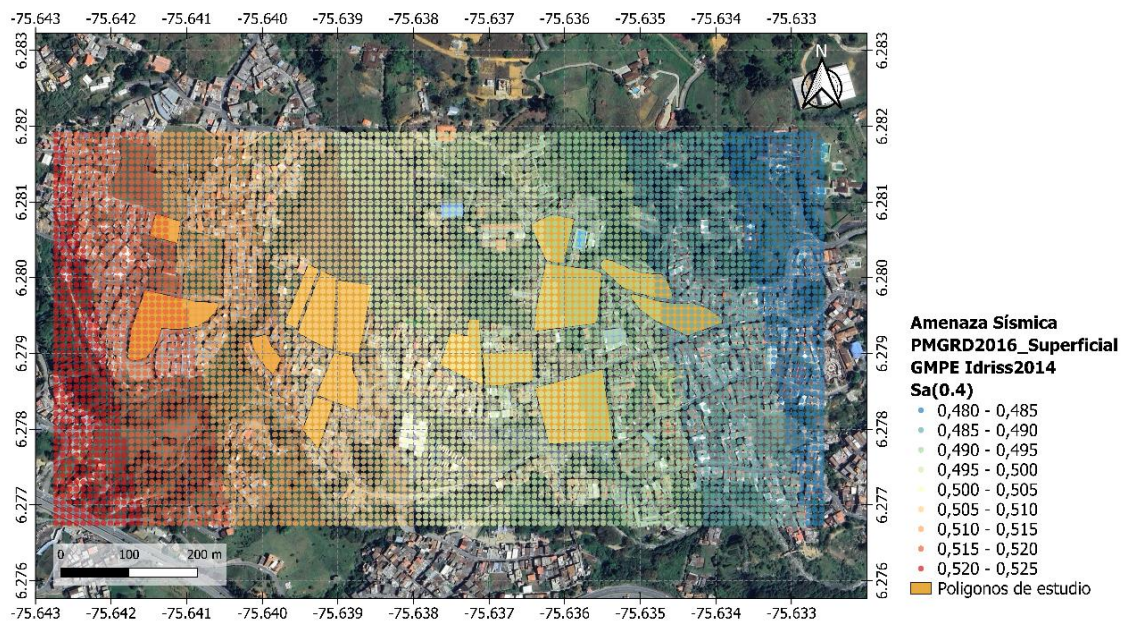
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-12.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico PMGRD2015 Superficial y las GMPE's Idriss2014. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



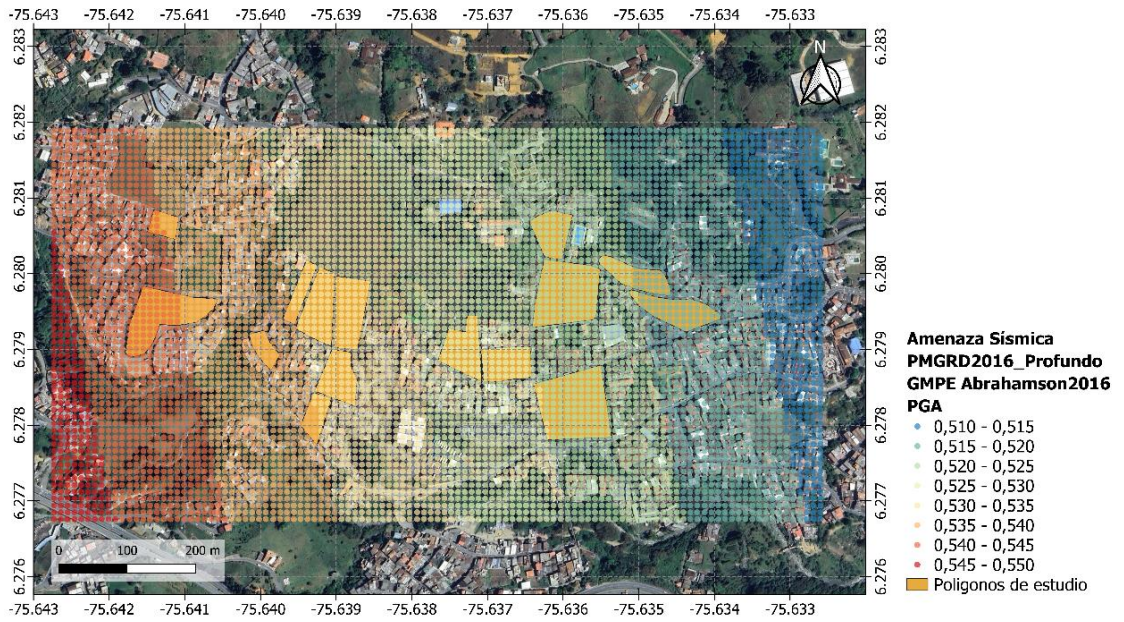
a)



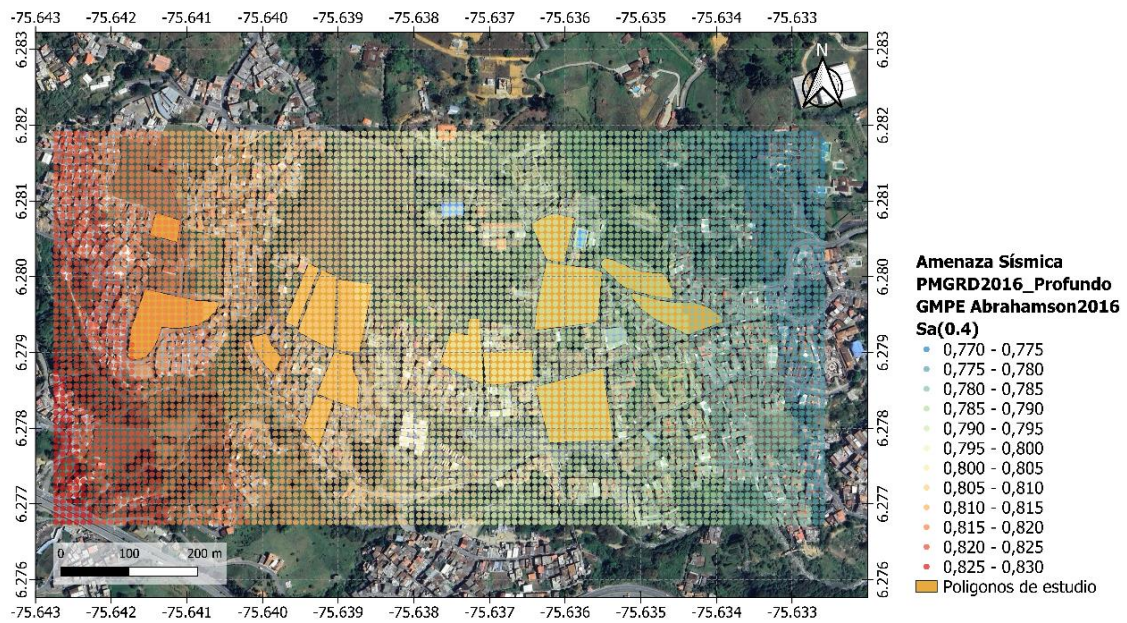
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-13.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico PMGRD2015 Profundo y las GMPE's Abrahamson2016. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



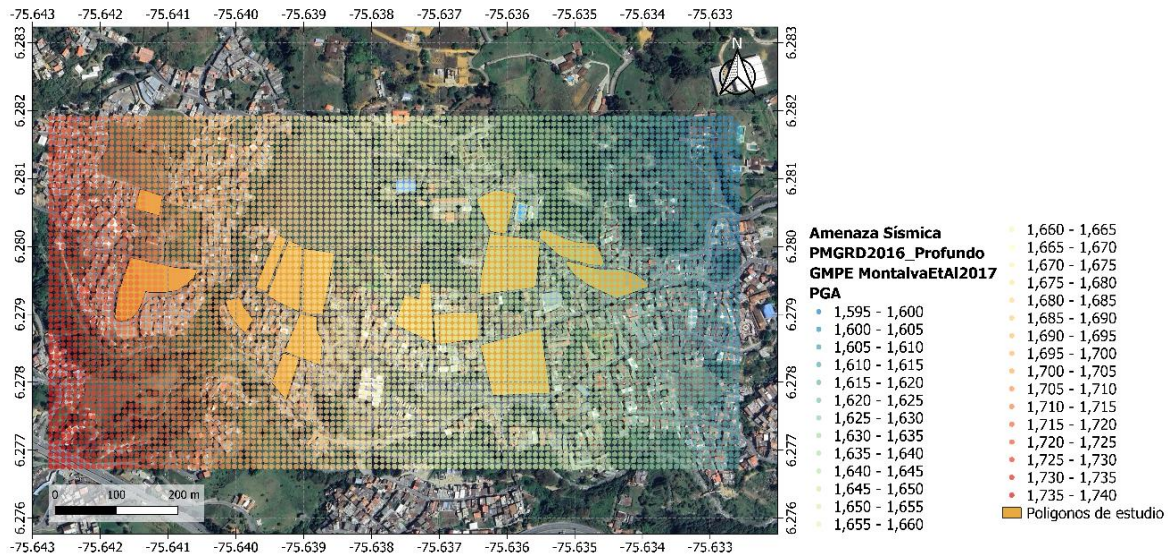
a)



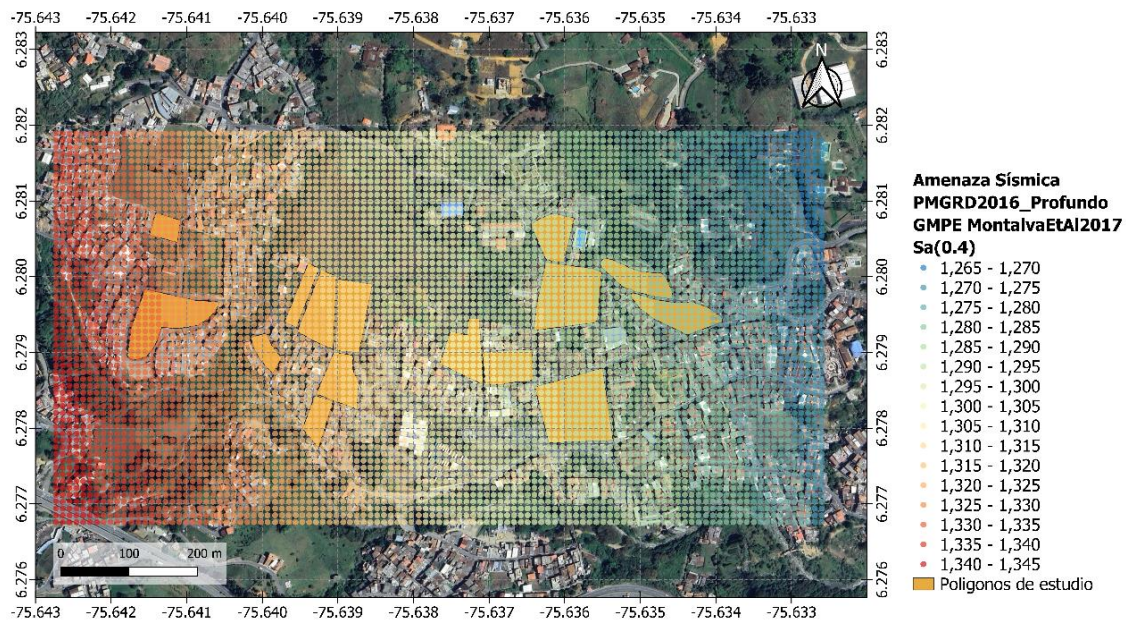
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-14.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico PMGRD2015 Profundo y las GMPE's MontalvaEtAl2017. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



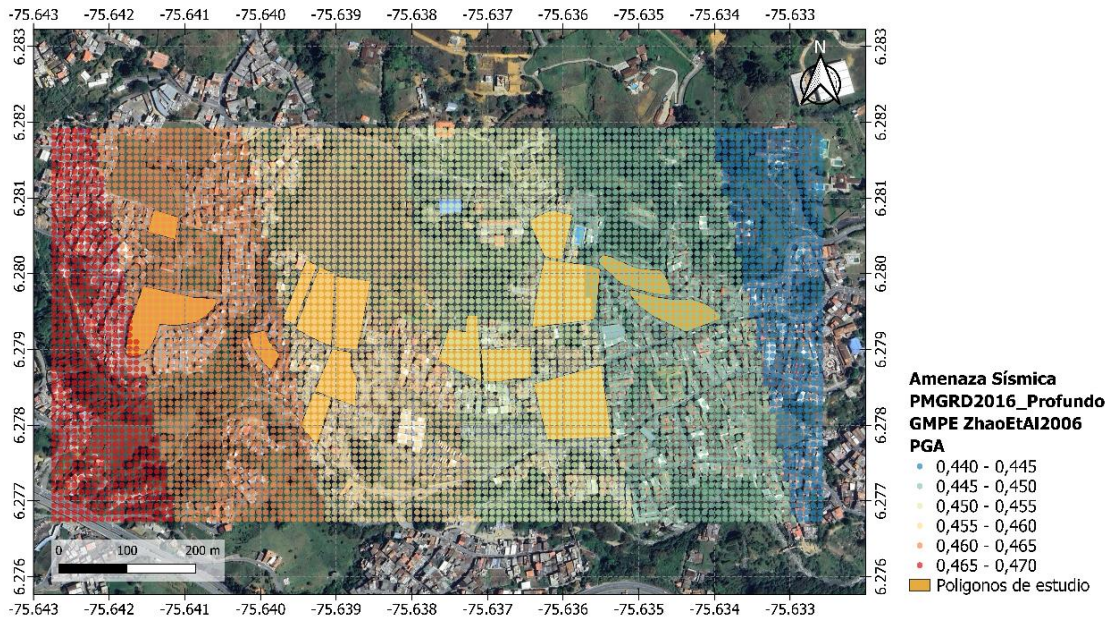
a)



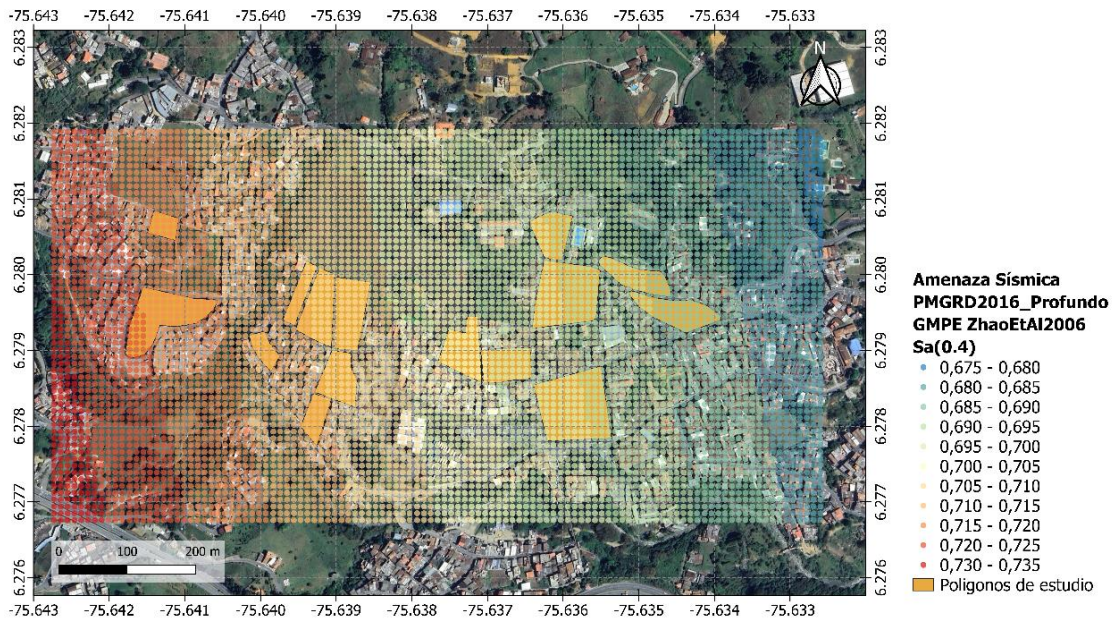
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-15.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico PMGRD2015 Profundo y las GMPE's ZhaoEtAl2006 a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



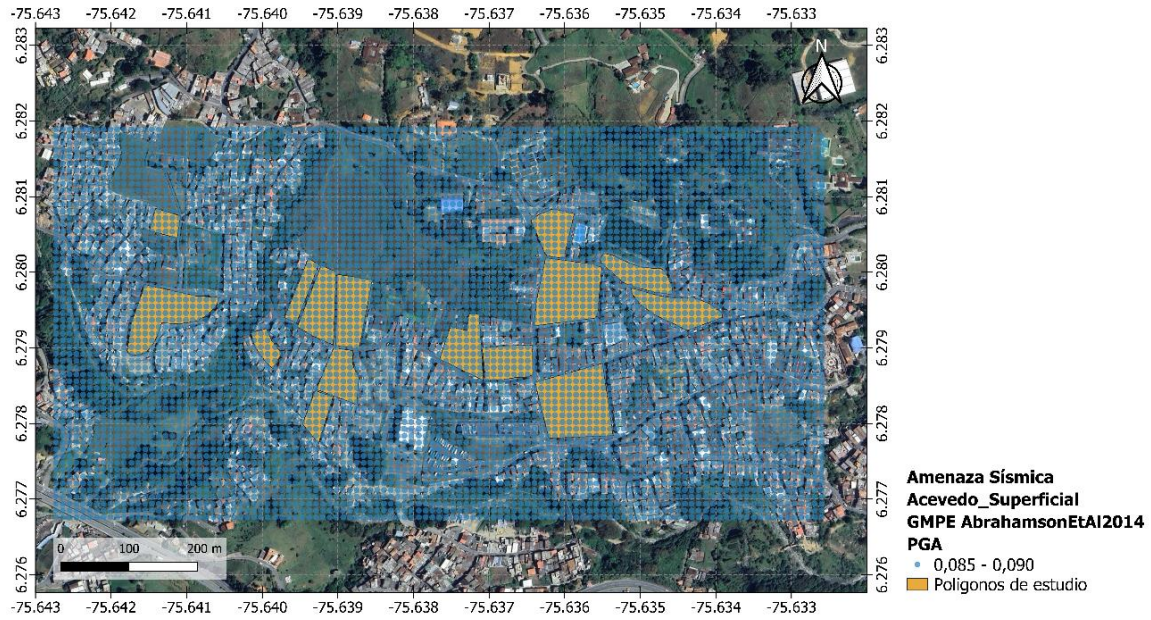
a)



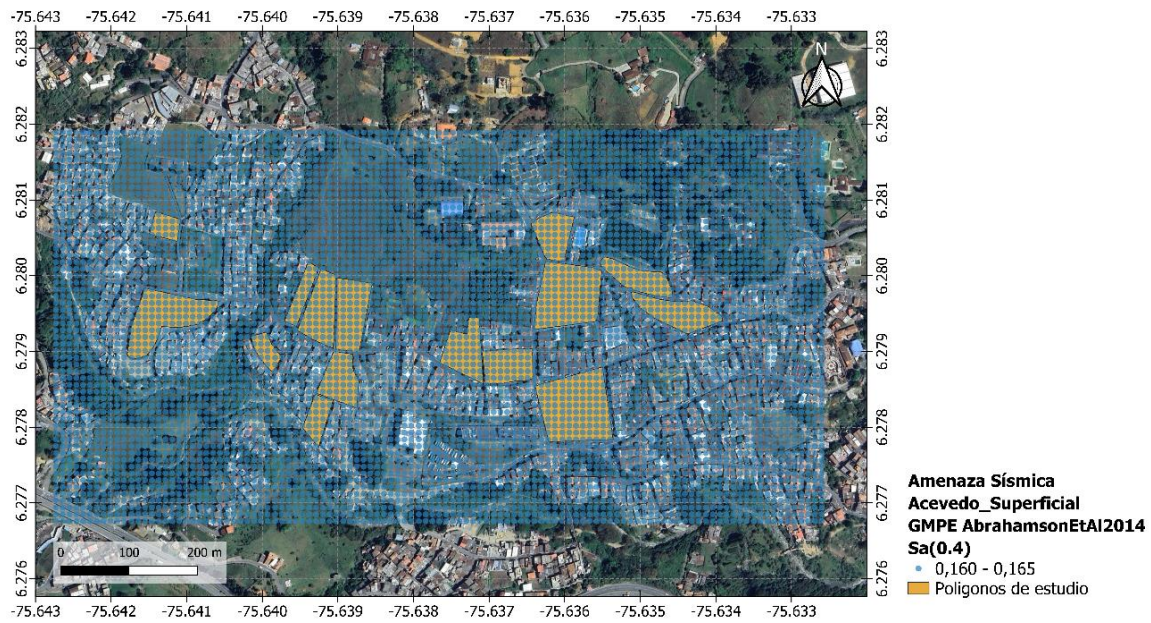
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-16.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico Acevedo2020 Superficial y las GMPE's AbrahamsonEtAl2014. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



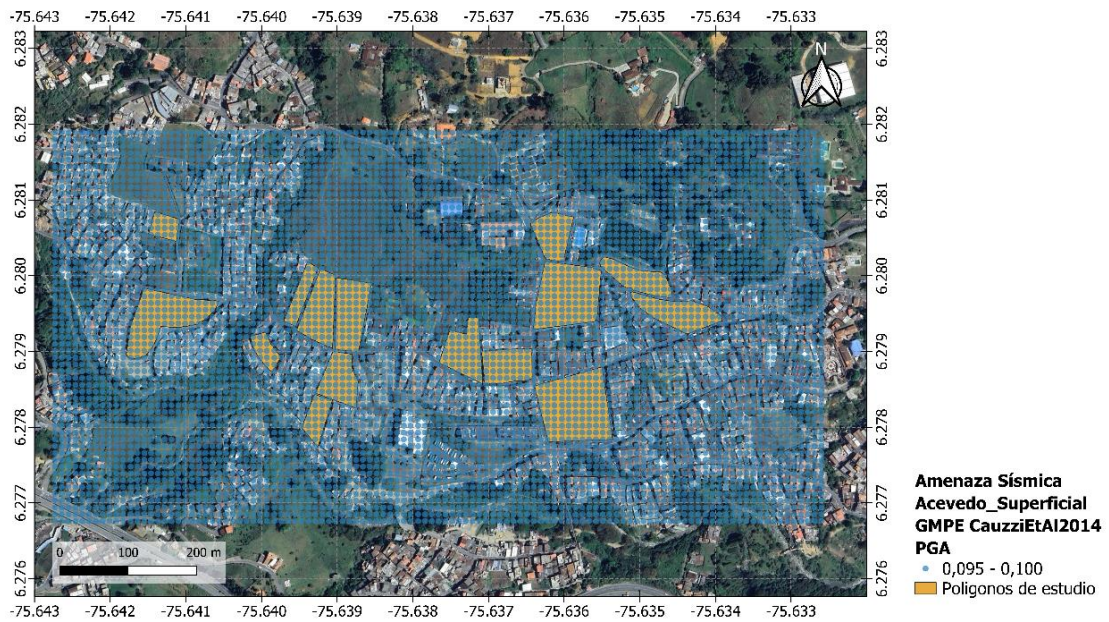
a)



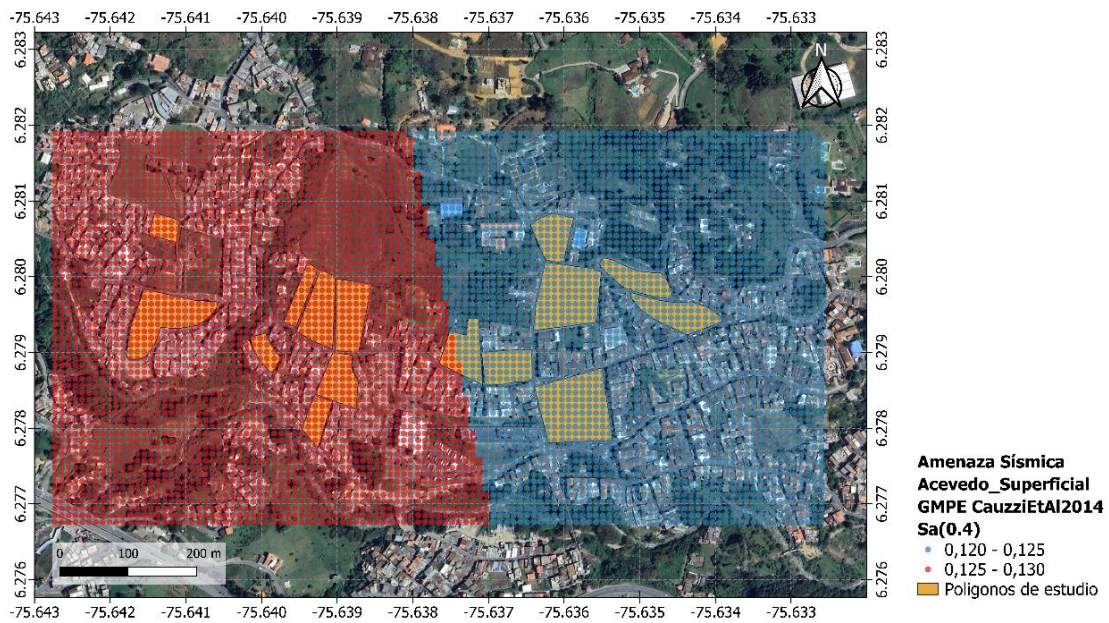
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-17.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico Acevedo2020 Superficial y las GMPE's CauzziEtAl2014. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



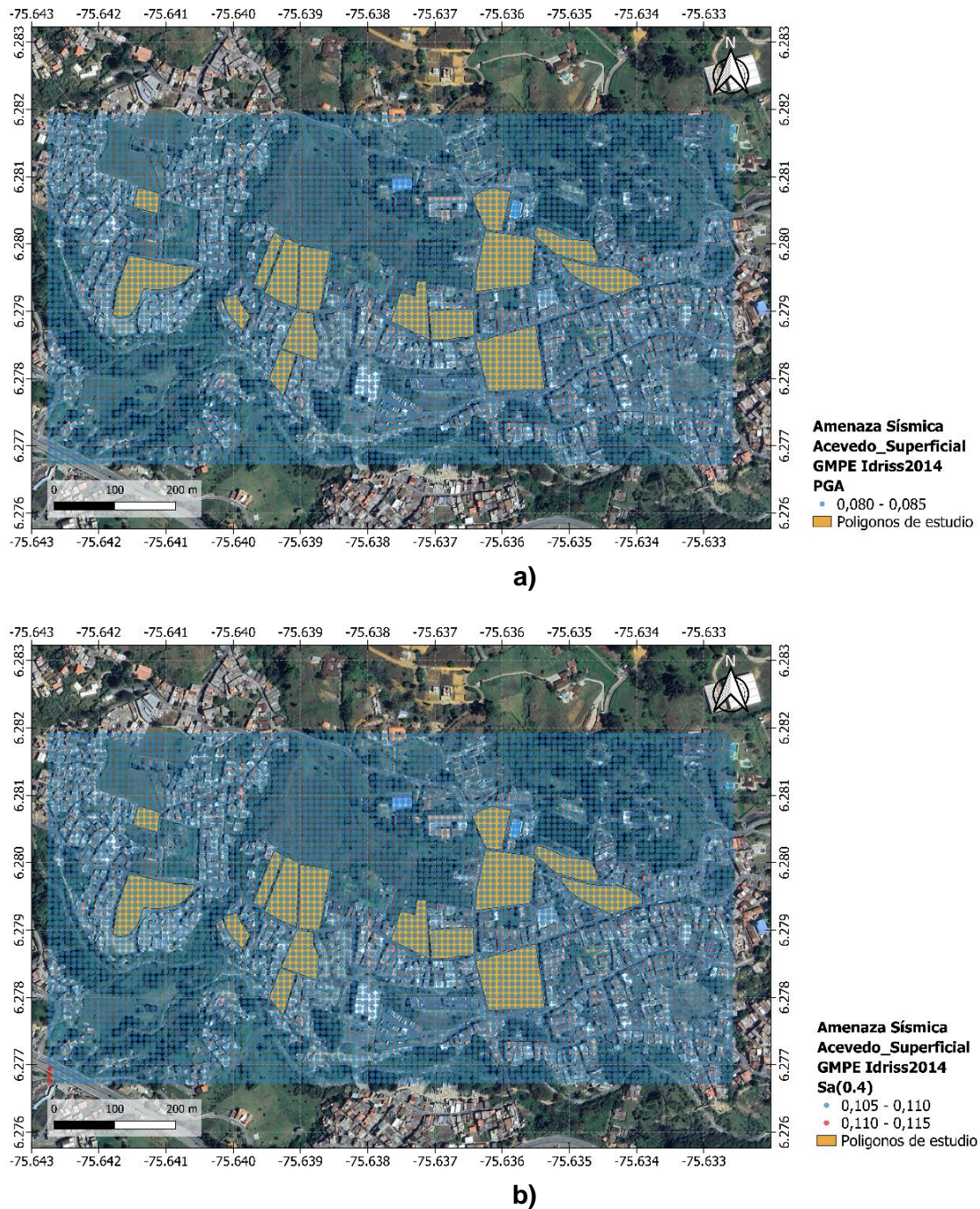
a)



b)

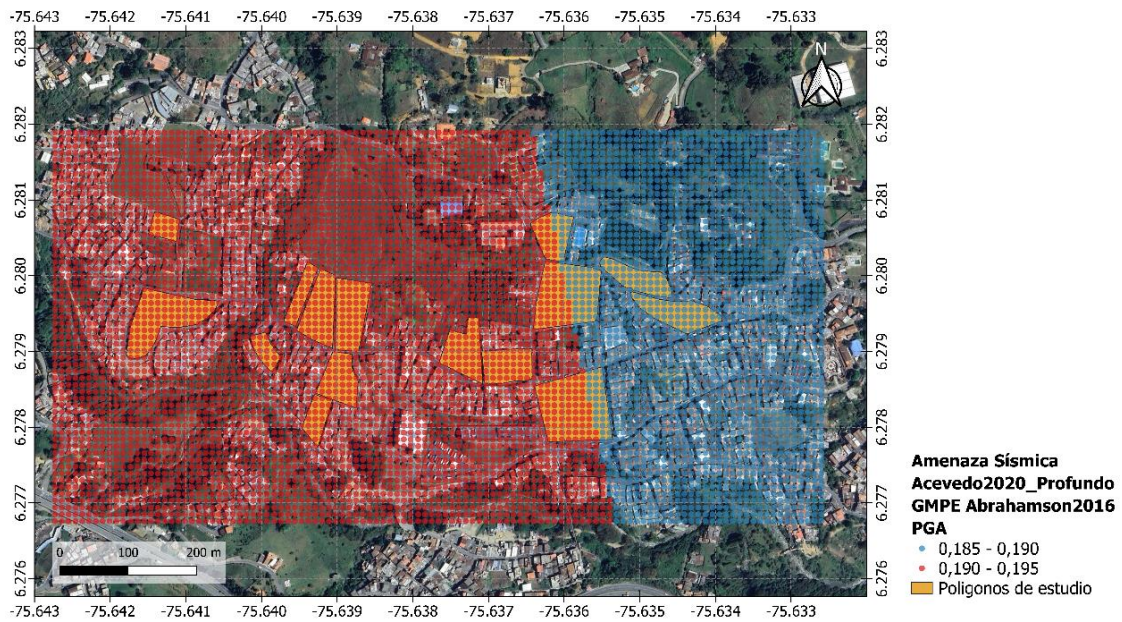
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-18.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico Acevedo2020 Superficial y las GMPE's Idriss2014. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].

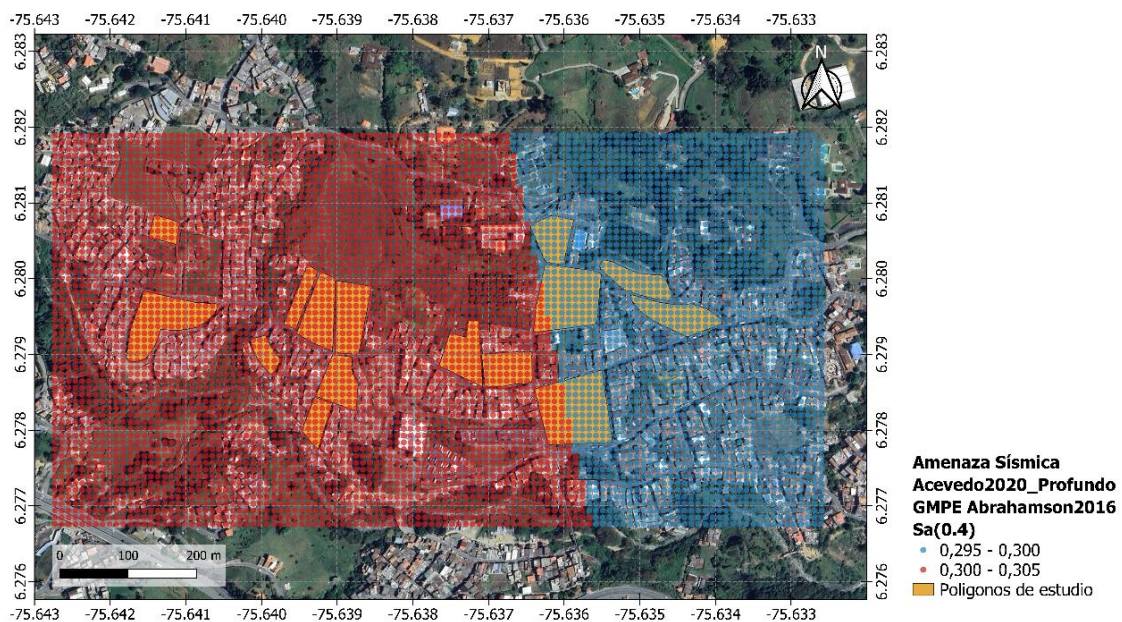


Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-19.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico Acevedo2020 Profundo y las GMPE's Abrahamson2016. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



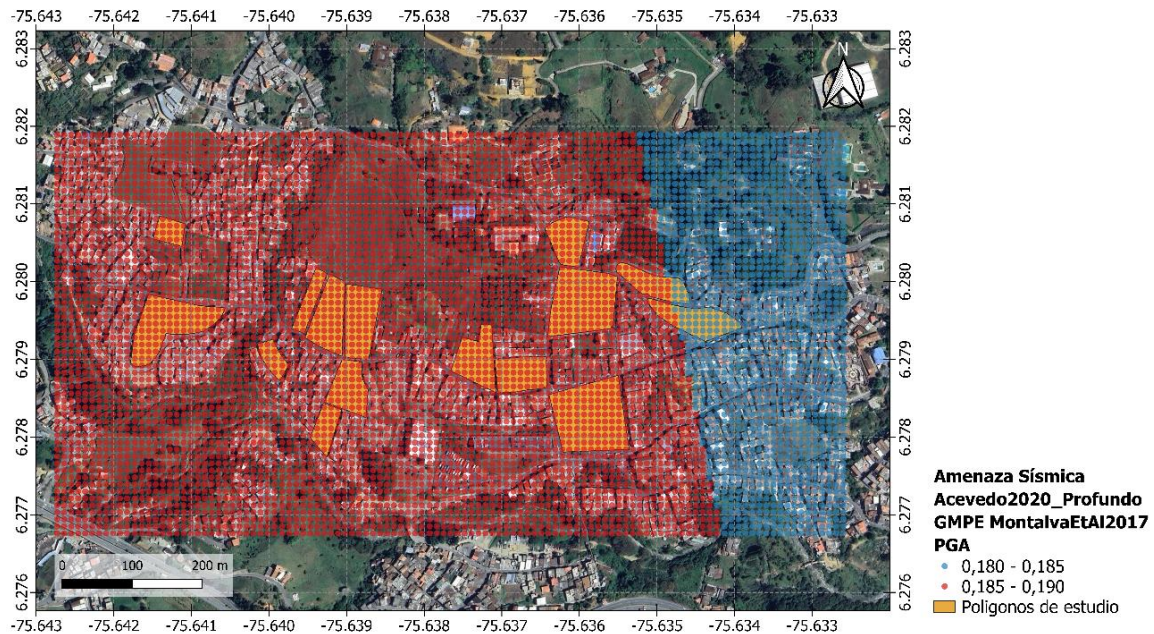
a)



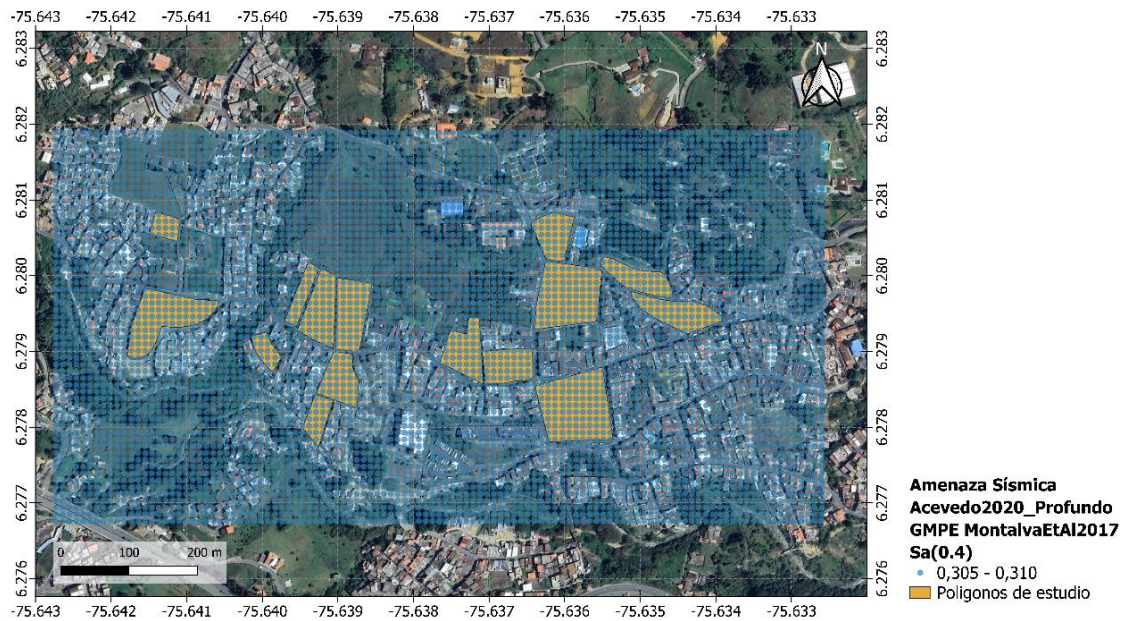
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-20.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico Acevedo2020 Profundo y las GMPE's MontalvaEtAl2017. a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



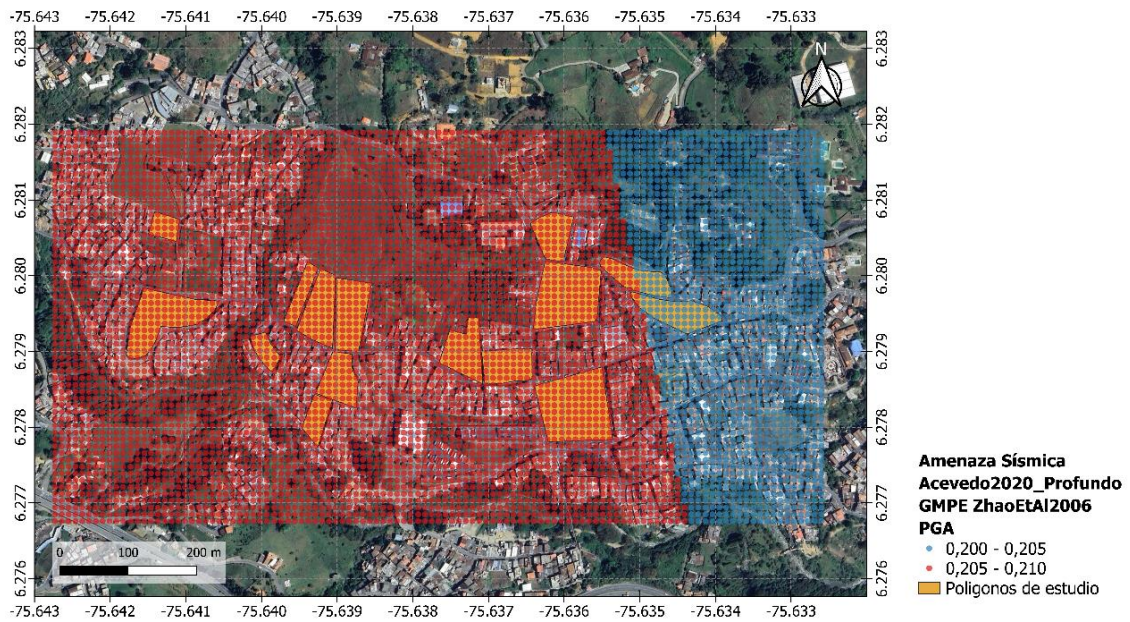
a)



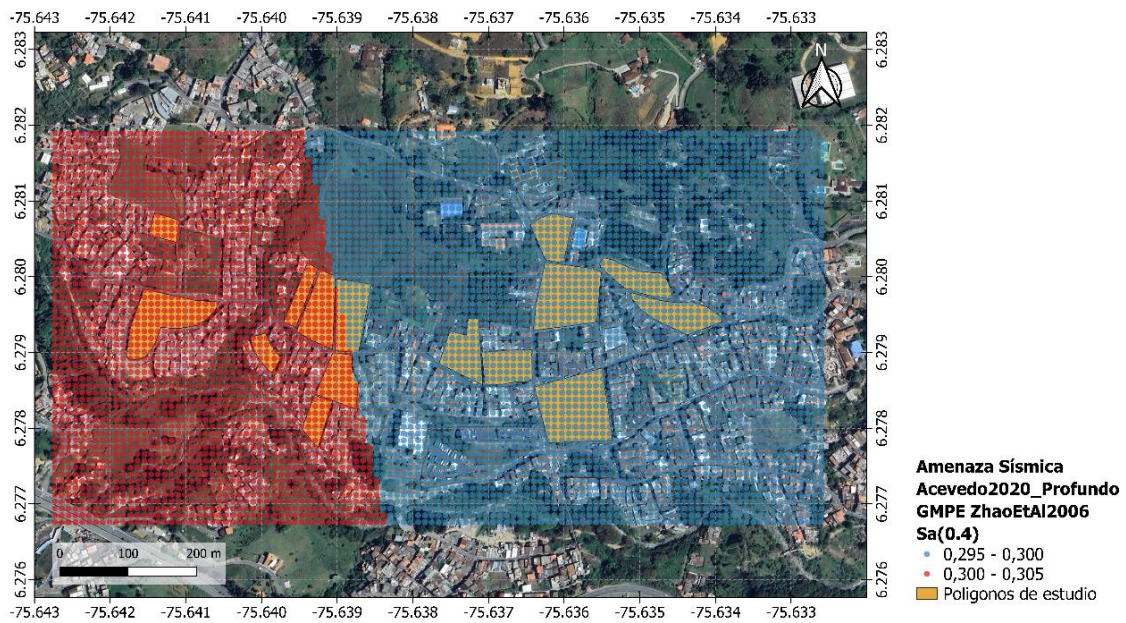
b)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-21.** Resultados de la amenaza sísmica en términos del evento sísmico Acevedo2020 Profundo y las GMPE's ZhaoEtAl2006 a) PGA [g] b) SA (0,4) [g].



a)



b)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de amenaza sísmica se obtuvieron en términos de dos tipos de medidas de intensidad: PGA, uno de los parámetros más utilizados para estimar la fuerza de inercia que ofrece una estructura al movimiento (Benito & Cabañas, 1999), para los edificios rígidos [de una a tres plantas]; y la aceleración espectral [SA] a 0,4 segundos para los edificios de cuatro o más plantas, basándose en el periodo alargado, a fin de tener en cuenta el efecto de los daños estructurales en las propiedades dinámicas del inventario de edificaciones contenidas en el modelo de exposición (Acevedo et al., 2017).

En cuanto a los resultados de amenaza sísmica en la zona de estudio, se observan máximas aceleraciones en el occidente y menores aceleraciones en el oriente. Esto es coherente con el origen de las fuentes sísmicas, la atenuación de las ondas sísmica y los efectos de sitio, definidos por las GMPE's.

En la Tabla 3-3 se presentan los resultados de aceleración para los escenarios sísmicos de ambientes tectónicos superficiales y profundos. En el escenario superficial, definido por el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016), se registran mayores aceleraciones [PGA y SA (0.4s)] según la GMPE de Idriss (2014). De igual manera, en el ambiente profundo se observaron mayores aceleraciones con la GMPE de Montalva et al. (2017).

Al comparar ambos ambientes tectónicos en el corregimiento de San Cristóbal, Medellín, el escenario sísmico profundo, según el PMGRD (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) y la GMPE de Montalva et al. (2017), mostró las aceleraciones más altas, convirtiéndose en el peor escenario sísmico modelado en este trabajo de investigación.

Finalmente, para los eventos sísmicos definidos por (Acevedo et al., 2020), en el ambiente tectónico superficial las máximas aceleraciones [PGA y SA (0.4s)] se observan utilizando las GMPE de Abrahamson et al. (2016) y Cauzzi et al. (2014) y para el ambiente profundo se tienen mayores aceleraciones empleando las GMPE de Montalva et al. (2017) y (Zhao et al., 2006).

Este análisis permite realizar una comparación con los resultados obtenidos en el Estudio del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Universidad de los Andes, 2019), el cual evaluó la amenaza sísmica tanto para el ambiente cortical como para el profundo. En dicho estudio, se llevó a cabo un análisis probabilístico de la amenaza sísmica, arrojando valores máximos aproximados de entre 1,5 g y 2,0 g para el ambiente profundo, y entre 0,6 g y 0,7 g para el ambiente superficial. De este modo, se puede concluir que los hallazgos de este trabajo de investigación son consistentes con los estudios previos de microzonificación sísmica realizados por el Distrito de Medellín y el Valle de Aburrá.

**Tabla 3-3.** Resultados de aceleración para los escenarios sísmicos superficiales y profundos definidos.

ESCENARIO SÍSMICO	GMPE	PGA		Sa (0.4)	
		Mínima [g]	Máxima [g]	Mínima [g]	Máxima [g]
PMGRD2015 Superficial	AbrahamsonEtAl2014	0,3190	0,3476	0,5199	0,5646
	CauzziEtAl2014	0,3536	0,3826	0,4725	0,5205
	<b>Idriss2014</b>	<b>0,4173</b>	<b>0,4608</b>	<b>0,4802</b>	<b>0,5249</b>
Acevedo2020 Superficial	<b>AbrahamsonEtAl2014</b>	0,0871	0,0892	<b>0,1612</b>	<b>0,1645</b>
	<b>CauzziEtAl2014</b>	<b>0,0957</b>	<b>0,0980</b>	0,1237	0,1265
	Idriss2014	0,0816	0,0841	0,1070	0,1100
PMGRD2015 Profundo	Abrahamson2016	0,5110	0,5478	0,7746	0,8275
	<b>MontalvaEtAl2017</b>	<b>1,5996</b>	<b>1,7397</b>	<b>1,2670</b>	<b>1,3446</b>
	ZhaoEtAl2006	0,4417	0,4691	0,6786	0,7282
Acevedo2020 Profundo	Abrahamson2016	0,1890	0,1920	0,2981	0,3033
	<b>MontalvaEtAl2017</b>	0,1842	0,1877	<b>0,3051</b>	<b>0,3096</b>
	<b>ZhaoEtAl2006</b>	<b>0,2042</b>	<b>0,2075</b>	0,2971	0,3019

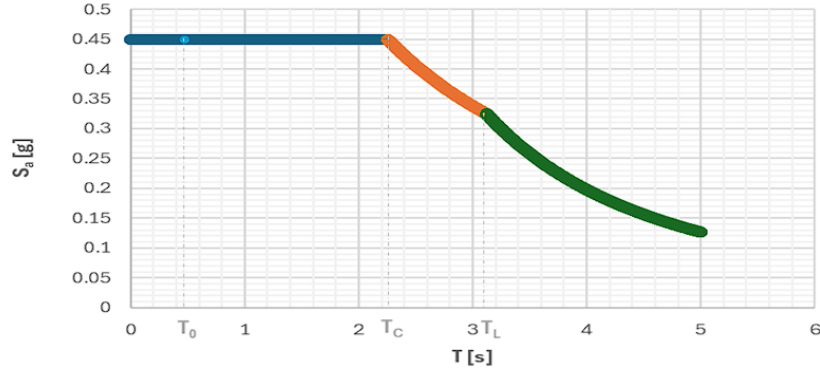
Fuente: Elaboración propia.

El Título A de la NSR-10 (Ministerio de Ambiente, 2010) establece los valores de PGA para las diferentes ciudades de Colombia, señalando un rango entre 0,12 y 0,32 g para Medellín [considerando los efectos del suelo]. De manera similar, el SGC determinó valores de intensidad sísmica esperada para Medellín, con valores de PGA que oscilan entre 0,18 y 0,35 g. Estos valores se obtuvieron utilizando el promedio de velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros del suelo [ $V_{s30}$ ], lo que permite obtener valores de Sa antes de 1 segundo en el espectro elástico de aceleraciones. Esto confirma que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son consistentes con los valores definidos por la NSR-10 y el SGC. En la Figura 3-22 se tiene la representación gráfica del espectro elástico de aceleraciones para los valores de PGA de 0,15 y 0,35 g.

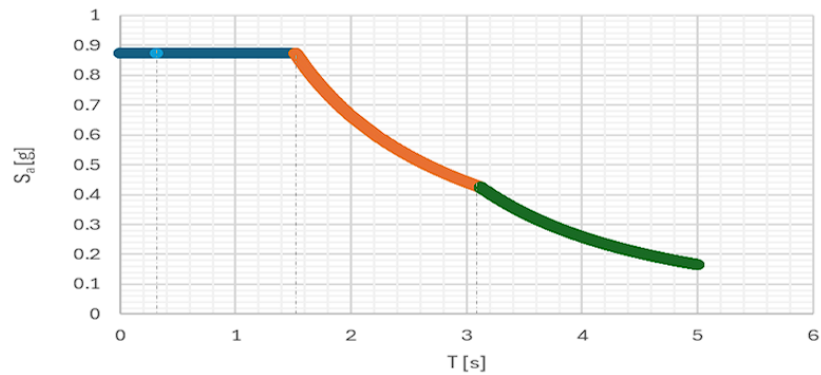
Para el análisis del riesgo sísmico, se utilizaron los resultados de la amenaza sísmica definida en el ambiente profundo por el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) con la GMPE de Montalva et al. (2017). Este enfoque es seleccionado porque representa el peor escenario de riesgo sísmico simulado en este trabajo de investigación y podría generar mayores impactos en las edificaciones.

**Figura 3-22.** Espectro elástico de aceleraciones para el rango de valores de PGA entre 0,15g y 0,35 g.

Aa	0.15
Fa	1.20
Av	0.65
Fv	1.30
I	1.00
T0	0.47
Tc	2.25
TL	3.12



Aa	0.35
Fa	1.00
Av	0.85
Fv	1.30
I	1.00
T0	0.32
Tc	1.52
TL	3.12



Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Ambiente (2010).

### 3.3 Modelo de exposición

Un modelo de exposición es fundamental para la evaluación del impacto debido a la amenaza sísmica, ya que contiene, pero no se limita a, información sobre la ubicación geográfica, las características físicas y el valor económico de las edificaciones expuestas (Yepes-Estrada et al., 2022).

Para la construcción del modelo de exposición en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, se realizó la recolección de información de las edificaciones localizadas en los polígonos de estudio, a través de recorridos virtuales con la herramienta *Google Street View*<sup>3</sup>, la incorporación de la información catastral del corregimiento de San Cristóbal, la medición de longitudes a través del software *QGIS* y la plataforma *MapGis9*<sup>4</sup> de la Alcaldía de Medellín. Al definir las variables para el levantamiento de información, se tuvieron en

<sup>3</sup> [Google Street View](#)

<sup>4</sup> [MapGis9](#)

cuenta los criterios definidos por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400 (2023). Así, la información levantada da cuenta de los siguientes datos:

- **Dirección:** obtenida a partir de la información catastral del corregimiento de San Cristóbal.
- **Código CBML:** código catastral que combina Comuna – Barrio – Manzana – Lote, obtenido a partir de la información catastral.
- **Coordenadas:** aproximadas, en formato decimal, en el sistema de coordenadas WGS 84.
- **Uso:** residencial, comercial/servicios y complementario, obtenido a partir de la información catastral.
- **Altura total de la vivienda [m]:** aproximada, a partir de la observación en la herramienta *Google Street View*.
- **Número de pisos:** a partir de la observación en la herramienta *Google Street View*.
- **Longitud de la fachada de acceso [m]:** a partir de herramienta de medición de software *QGIS*.
- **Longitud en dirección perpendicular a la fachada de acceso [m]:** a partir de herramienta de medición de software *QGIS*.
- **Área en planta [m<sup>2</sup>]:** calculada con la información de longitudes de fachada de acceso y en dirección perpendicular.
- **Descripción de las irregularidades en planta:** irrupciones geométricas y físicas de una estructura, debido a la configuración de sus elementos y su distribución en planta (Vásquez, 2022), observadas a través del software *QGIS* y la plataforma *MapGis9*.
- **Descripción de las irregularidades en altura:** irrupciones geométricas y físicas de una estructura, debido a la configuración de sus elementos y su distribución en los diferentes niveles de altura de la edificación (Vásquez, 2022), observadas a través de la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de muros:** se tienen en cuenta los muros perimetrales de la edificación.
- **Descripción de viga de amarre:** en caso de ser observable desde el exterior de la edificación a partir de los recorridos a través de la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de voladizos:** ocupados [la placa de entrepiso soporta muros de carga de fachada y hace parte del área útil de la vivienda] y no ocupados [la placa de entrepiso cuyo uso es balcón o área de circulación y soporta en su extremo muros de altura parcial no estructurales como antepechos o barandas] (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023). La descripción de los voladizos se realizó a partir de lo observado en el exterior de las edificaciones a través de la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de columnas de confinamiento:** en caso de ser observables en el perímetro de la edificación durante la observación en la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de aberturas en muros:** aberturas usadas para puertas, ventanas y otros, vistas en el exterior de las edificaciones durante la observación con la herramienta *Google Street View*.

- **Descripción de aberturas en los sistemas de losas:** considerando vacíos en los entresijos utilizados para patios, claraboyas o escaleras, que sean observables en los recorridos con la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de columnas aisladas:** columnas separadas de cualquier otro elemento vertical de la vivienda que tienen como única función brindar soporte a la placa de entresijo y/o a la cubierta. La información descriptiva sobre columnas aisladas se obtiene a partir de lo observable a través de la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción del sistema de losas:** es posible considerar losas macizas, losas aligeradas, sistemas de losa con bloquelón y perfiles metálicos y losa con lámina colaborante. Esta información se obtiene a partir de lo observable en los recorridos con la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción del sistema de cubierta:** se considera sistema de techo liviano o sistema de techo pesado, siendo este último cualquier sistema de losa utilizado como cubierta (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023). La descripción del sistema de cubierta se realiza a través de la observación de la fotografía satelital de la plataforma *MapGis9* (Alcaldía de Medellín, 2024a) y lo observable durante el recorrido a través de la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de escaleras y descansos:** verificando la conformidad de los materiales y el estado de funcionamiento a través de las observaciones en la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de parapetos:** muros de mampostería de baja altura observables a través de la herramienta *Google Street View* en el perímetro de la edificación.
- **Descripción de unidades de mampostería:** correspondiente a bloques o ladrillos de arcilla o de concreto, información obtenida a partir de lo observable en los recorridos con la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción del mortero de pega:** teniendo en cuenta sus condiciones de sanidad e integridad a partir de lo observado en los recorridos de la herramienta *Google Street View*.
- **Descripción de revoques [pañetes] sobre muros:** evidenciando eventuales discontinuidades y presencia de fisuras y/o grietas observadas en los muros exteriores de la edificación en los recorridos virtuales en la herramienta *Google Street View*.
- **Área total [m<sup>2</sup>]:** considerada como la suma total del área en planta, en los diferentes niveles de la edificación, utilizando la herramienta de medición de la plataforma *MapGis9* (Alcaldía de Medellín, 2024a) y la herramienta *Google Street View*.
- **Costo estimado de reemplazo:** para las edificaciones, a partir de los valores de costo por m<sup>2</sup> definidos por Osorio Vergara (2015), convertidos a Valor Presente Neto [VPN] y el área total de la edificación.

### 3.3.1 Taxonomía de edificaciones

El objetivo de definir la taxonomía de las edificaciones es proporcionar una descripción y clasificación uniforme, lo que constituye un paso clave para evaluar el riesgo sísmico. Esta taxonomía se organiza en una serie de tablas ampliables, que contienen información sobre diversos atributos de las edificaciones. Cada atributo describe una característica específica

de un edificio individual o de una clase de edificios que podría influir en su comportamiento sísmico (Brzev et al., 2013).

Para definir las tipologías constructivas del modelo de exposición, se incorporó la Taxonomía de Edificaciones para el Modelo Sísmico Global, propuesta por la Fundación GEM (Brzev et al., 2013), tomando en cuenta información de las edificaciones como el sistema estructural y el número de pisos, cómo se explica en la Tabla 3-4.

**Tabla 3-4.** Taxonomía de Edificios utilizada en el modelo de exposición para la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal.

<b>Taxonomía GEM</b>	<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
<b>CR/HEX:2</b>	Concreto reforzado, de dos niveles	Hormigón reforzado con metal, generalmente varillas o barras de acero moldeadas en el hormigón, o con otros refuerzos como fibras de vidrio o metálicas o materiales naturales resistentes a la tensión.
<b>CR/HEX:3</b>	Concreto reforzado, de tres niveles	
<b>MCF/HEX:2</b>	Mampostería confinada, de dos niveles	
<b>MCF/HEX:3</b>	Mampostería confinada, de tres niveles	Construcción de mampostería en la que primero se colocan muros de mampostería y luego se vierten elementos de confinamiento horizontales y verticales de hormigón armado. En este tipo de construcción, el hormigón se adhiere a la mampostería y los pilares y vigas de pequeño tamaño confinan los paneles de muros de mampostería.
<b>MCF/HEX:4</b>	Mampostería confinada, de cuatro niveles	
<b>MCF/HEX:5</b>	Mampostería confinada, de cinco niveles	
<b>MR/HEX:2</b>	Mampostería reforzada, de dos niveles	
<b>MUR/HEX:1</b>	Mampostería no reforzada, de un nivel	
<b>MUR/HEX:2</b>	Mampostería no reforzada, de dos niveles	Mampostería sin ningún tipo de refuerzo.
<b>MUR/HEX:3</b>	Mampostería no reforzada, de tres niveles	
<b>MUR/HEX:4</b>	Mampostería no reforzada, de cuatro niveles	
<b>MUR/HEX:5</b>	Mampostería no reforzada, de cinco niveles	

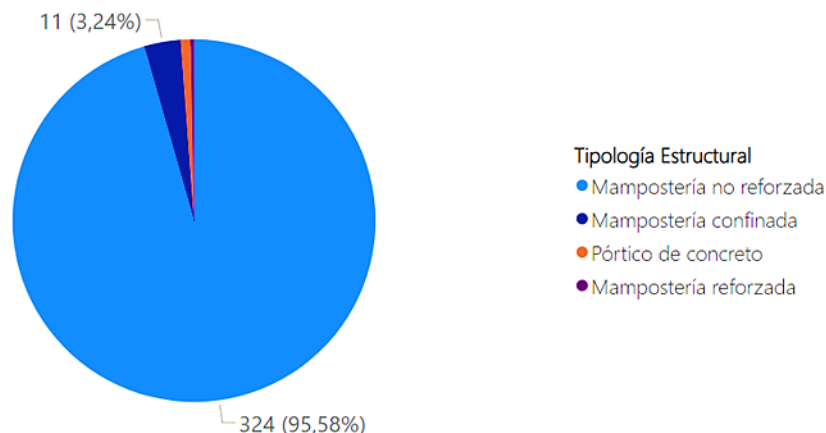
Fuente: Adaptado de Brzev et al. (2013).

### 3.3.2 Tipologías o clases constructivas predominantes

Para la generación del modelo de exposición sísmica en este trabajo de investigación se censaron 341 edificaciones distribuidas en 15 polígonos seleccionados en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, Medellín. La información recolectada incluyó datos catastrales como la dirección, el código CBML y el uso, además de las coordenadas geodésicas. A partir de la observación con herramientas como *Google Street View*, *QGIS* y *MapGis9*, se recopilaban características estructurales y geométricas de las edificaciones, tales como la altura total, el número de pisos, dimensiones de la fachada y el área en planta. Así mismo, se describieron las irregularidades tanto en planta como en altura, los tipos de muros, voladizos, columnas de confinamiento, aberturas de muros y losas y otros elementos estructurales observables. La metodología también incluyó el costo de reemplazo de cada edificación. Este enfoque permitió obtener una caracterización detallada de las edificaciones, esencial para el análisis del riesgo sísmico en la zona estudiada.

En la zona de estudio, la mampostería no reforzada es el sistema constructivo predominante, lo que la convierte en un factor fundamental en la exposición del corregimiento frente a sismos. Aproximadamente el 96% de las edificaciones en los polígonos analizados cuentan con muros de mampostería no reforzada, mientras que el 3% corresponde a mampostería confinada y solo el 1% está compuesto por edificaciones con sistemas estructurales de pórtico de concreto, tal como se muestra en la Figura 3-23.

**Figura 3-23.** Distribución de las edificaciones por tipo de sistema estructural.



Fuente: Elaboración propia.

En el modelo de exposición, se encuentran configuraciones que abarcan diferentes calidades y alturas. La Figura 3-24 muestra algunas de las edificaciones presentes en la zona de estudio, evidenciando la predominancia de la mampostería sin recubrimiento exterior, lo que indica que muchas de ellas son de mampostería no reforzada. Las construcciones varían en altura, desde uno hasta seis niveles, y presentan elementos arquitectónicos como balcones y escaleras externas.

Las fachadas están equipadas con ventanas y puertas de distintos tamaños, algunas con rejas de protección. En general, se observan cubiertas inclinadas, con tejas mayormente de barro y metálicas. Aunque el uso principal de las edificaciones es residencial, algunas de ellas albergan locales comerciales en los niveles inferiores.

Estas edificaciones representan un tipo de construcción común en áreas periurbanas, probablemente de carácter informal, donde predominan los materiales locales y los métodos de construcción convencionales.

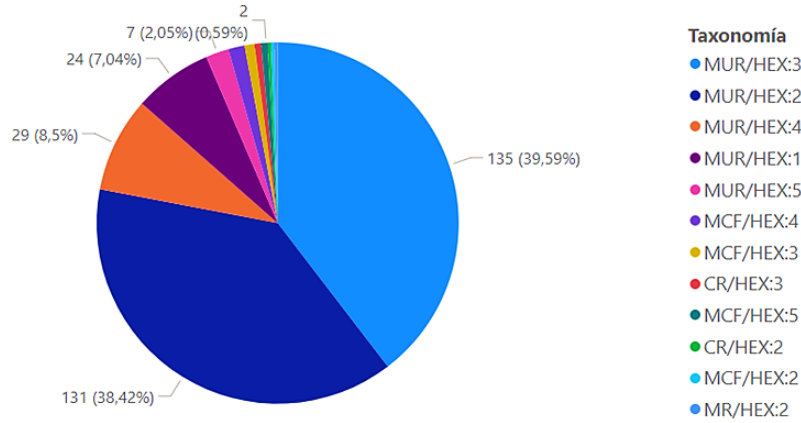
**Figura 3-24.** Edificaciones presentes en la zona de estudio.



Fuente: Tomado de los recorridos virtuales en la herramienta (Google Streetview, 2023).

En la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal predomina la presencia de edificaciones de mampostería no reforzada, principalmente de dos y tres niveles [aproximadamente el 78%], seguidas por construcciones de mampostería no reforzada de cuatro y un nivel [aproximadamente el 15.5%]. La Figura 3-25 se muestra la distribución de las edificaciones de la zona de estudio en el corregimiento de San Cristóbal, de acuerdo con la taxonomía de edificaciones de GEM.

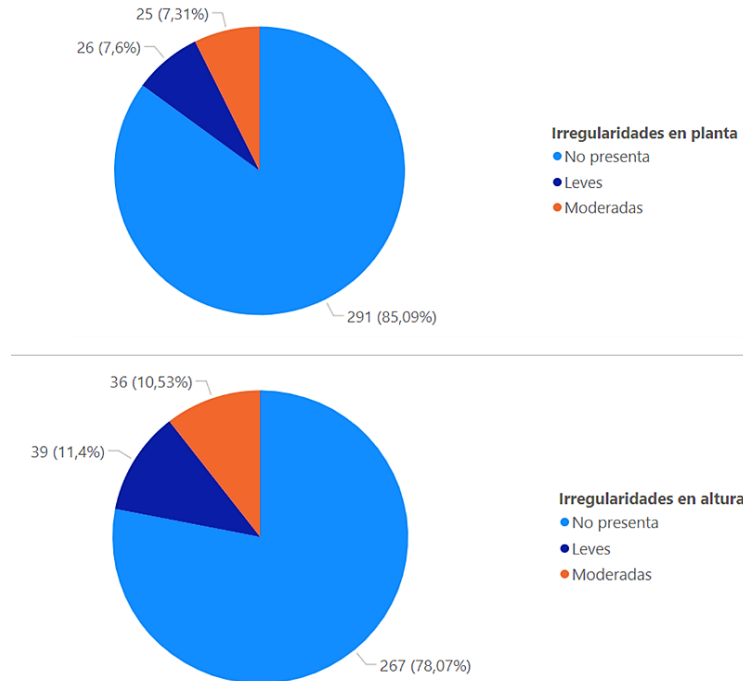
**Figura 3-25.** Distribución de tipologías constructivas según la taxonomía de edificaciones de GEM en la zona de estudio.



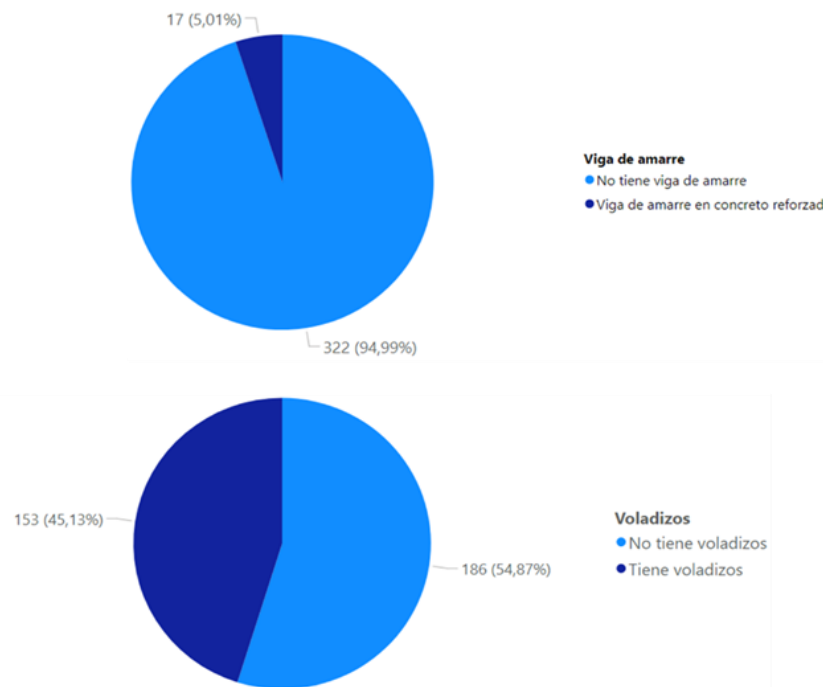
Fuente: Elaboración propia.

El 85% de las edificaciones no presentan irregularidades en planta y el 78% no muestra irregularidades en altura, como se observa en la Figura 3-26. Además, el 95% de las edificaciones carecen de vigas de amarre en concreto reforzado, y un 45% del total de edificaciones posee voladizos tipo balcón, como se puede ver en la Figura 3-27.

**Figura 3-26.** Distribución de irregularidades de planta y altura en las edificaciones.



Fuente: Elaboración propia.

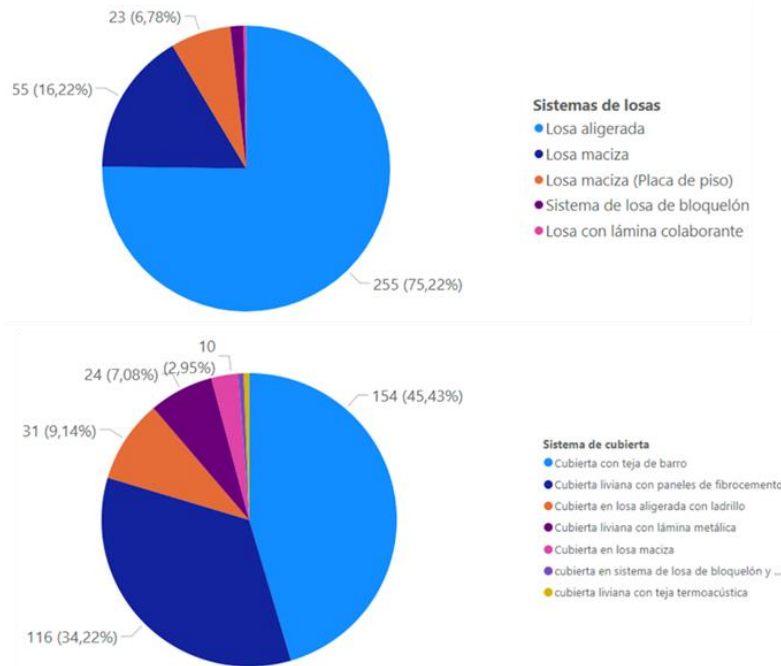
**Figura 3-27.** Distribución de presencia de vigas de amarre y voladizos en las edificaciones.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-28 se muestra que el 75,44% de los sistemas de losas de entrepiso son aligeradas, y las cubiertas están conformadas principalmente por tejas de barro y paneles de fibrocemento [aproximadamente el 79,53%]. Las áreas construidas de las edificaciones son predominantemente entre 138 y 288 m<sup>2</sup>, como se muestra en la Figura 3-29.

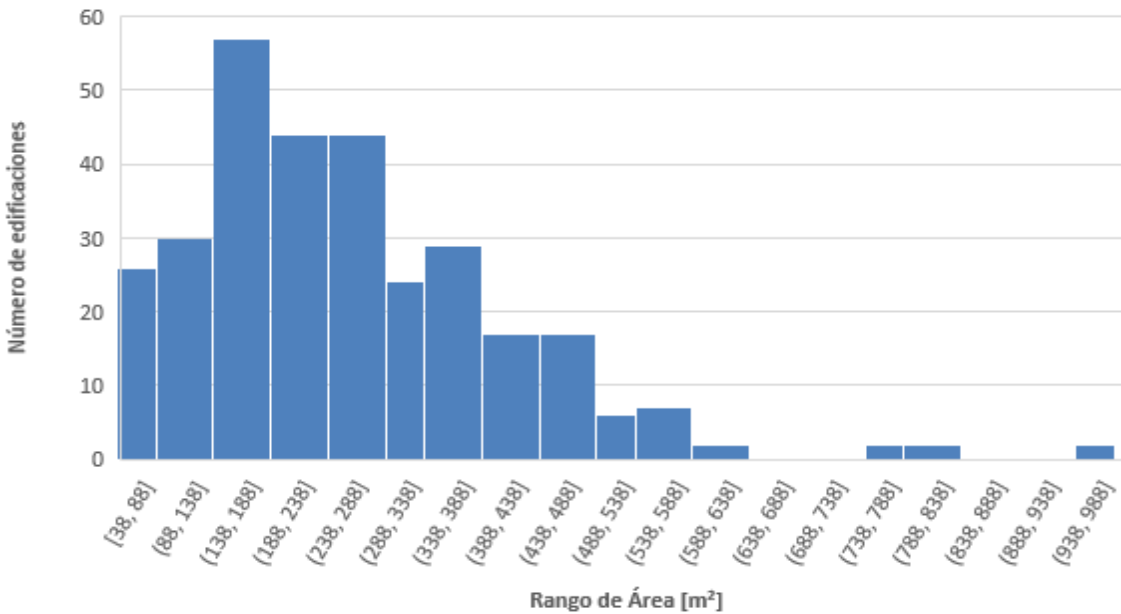
Los costos de reposición de las edificaciones se encuentran entre los 33 y los 634 millones de pesos colombianos y son mostrados en la Figura 3-30. Así mismo, en la Figura 3-31 se muestra la distribución espacial del costo de reposición de las edificaciones, de esta manera el costo estimado total de reposición para las edificaciones evaluadas es aproximadamente de 78 mil millones de pesos colombianos.

**Figura 3-28.** Distribución de sistemas de losas y de cubierta en las edificaciones.



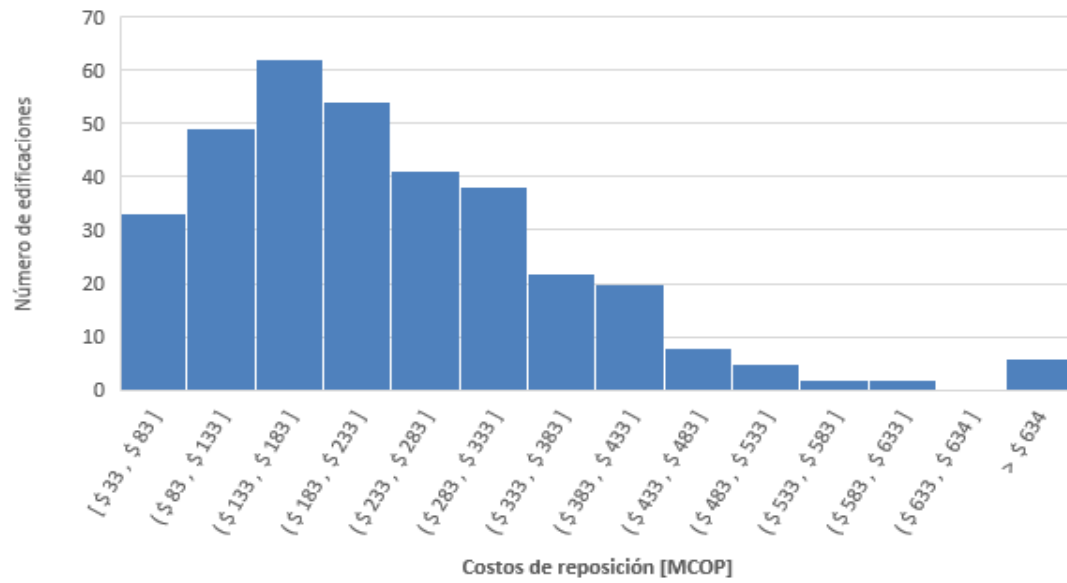
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-29.** Distribución de áreas totales de las edificaciones.



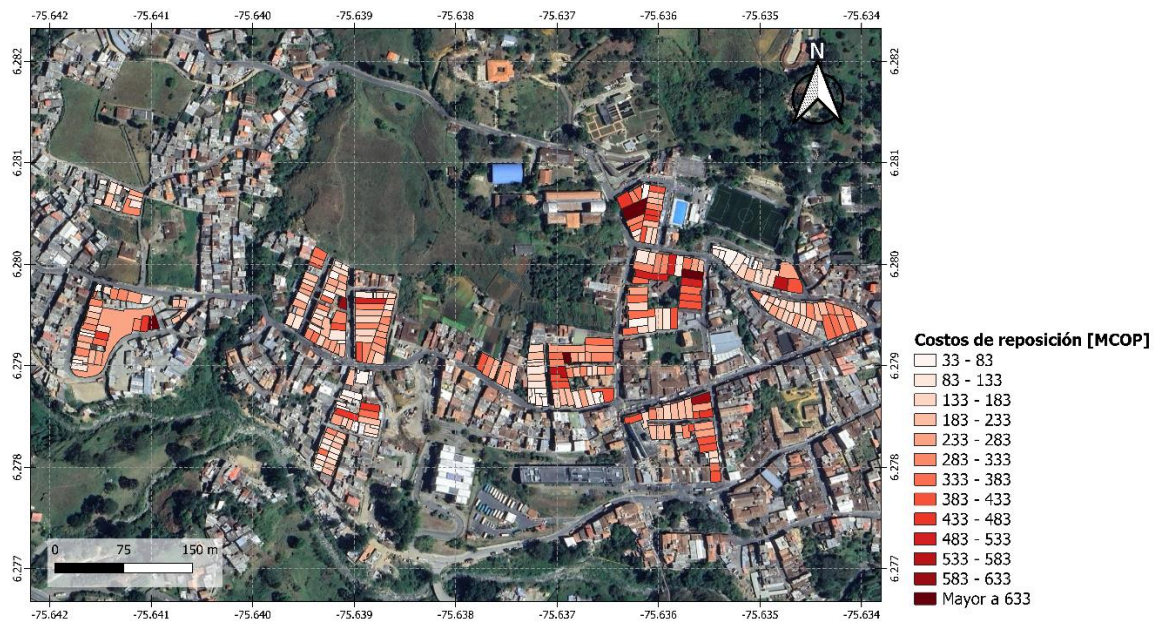
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-30.** Distribución de costos estimados de reposición de las edificaciones.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-31.** Distribución del costo estimado de reposición.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Modelo de vulnerabilidad

La afectación o daño en las edificaciones está determinado tanto por la acción sísmica como por la capacidad de la estructura para resistir sismos. Por lo tanto, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica está estrechamente relacionada con la forma en que se definen la acción y el daño sísmico (Safina Melone, 2003).

En este sentido, las técnicas para cuantificar la vulnerabilidad sísmica incluyen la elaboración de matrices de probabilidad de daño, funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad (Safina Melone, 2003).

Por un lado, las matrices de probabilidad de daño expresan la probabilidad discreta de la distribución del daño para un tipo de estructura y una intensidad sísmica dada (Yépez et al., 1995). Así mismo, las funciones de vulnerabilidad son relaciones matemáticas que expresan el daño global que experimenta una estructura específica cuando es sometida a un movimiento sísmico y no tienen una forma estándar reconocida (Safina Melone, 2003; Yépez et al., 1994). Finalmente, las curvas de fragilidad representan la probabilidad de excedencia de un estado límite de daño en función de un parámetro que refleja la severidad del sismo asociado a la respuesta estructural. Estas curvas describen la relación entre el movimiento sísmico y el nivel de daño para diferentes tipos de edificaciones (Safina Melone, 2003).

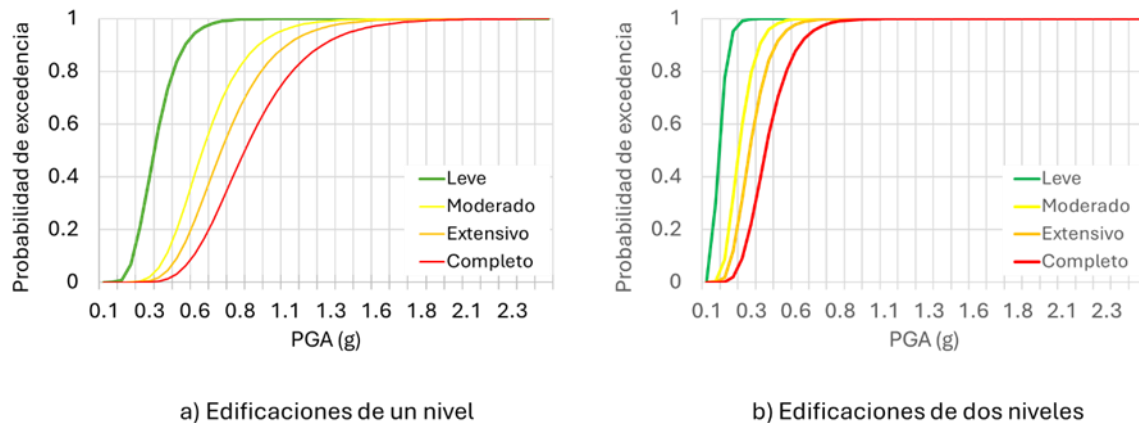
Por todo lo anterior, la evaluación de daños, pérdidas económicas y muertes requiere el uso de modelos de fragilidad y vulnerabilidad específicos para las clases de edificaciones identificadas al modelar la exposición (Yepes-Estrada et al., 2022). En el caso específico de la evaluación del riesgo sísmico en la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, se utilizaron las curvas de fragilidad como una técnica de cuantificación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones localizadas en los polígonos de estudio.

Para este trabajo de investigación se utilizaron diferentes curvas de fragilidad, obtenidas por diversos autores. Dado que estas fuentes emplean metodologías y criterios distintos, es posible que existan variaciones en la definición de los estados de daño o estados límite, lo que podría influir en la interpretación de los resultados y en la comparación entre estudios. A continuación, se describen las curvas de fragilidad empleadas .

Osorio Vergara (2024), desarrolló curvas de fragilidad para edificaciones de mampostería no reforzada de uno y dos niveles en el Valle de Aburrá, basándose en datos obtenidos a partir de la caracterización experimental de las propiedades mecánicas de muretes, piezas, mortero y muros de mampostería no reforzada a escala real. Además, utilizó la calibración del macroelemento de los modelos *TREMURI Ricerca* (Lagomarsino et al., 2013), basados en edificaciones reales cuya información estructural fue recopilada mediante visitas de campo. Los modelos de estas edificaciones fueron sometidos a aceleraciones sísmicas, tanto escaladas como sin escalar, empleando parte de los registros sísmicos usados para la generación del modelo de riesgo sísmico de Suramérica en el Proyecto *SARA* (GEM Secretariat, 2015). A partir de ello, se calcularon los desplazamientos generados en las edificaciones por las acciones sísmicas y se determinaron los estados de daño. Se formularon funciones de fragilidad tanto generales para edificaciones de mampostería no reforzada de uno y dos niveles como específicas para grupos de edificaciones según su

geometría en planta. En este trabajo de investigación, se utilizaron las funciones de fragilidad generales de las edificaciones de mampostería no reforzada de uno y dos niveles. En la Figura 3-32 se presentan las curvas de fragilidad de edificaciones de mampostería no reforzada de uno y dos pisos del Valle de Aburrá sin agrupar, obtenidas por Osorio Vergara (2024).

**Figura 3-32.** Curvas de fragilidad de edificaciones de mampostería no reforzada de uno y dos pisos del Valle de Aburrá sin agrupar obtenidas por Osorio Vergara (2024).



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Osorio Vergara (2024).

Para las edificaciones de mampostería no reforzada de tres, cuatro y cinco niveles, se usaron en este trabajo de investigación las curvas de fragilidad obtenidas por Acevedo et al. (2017). Estas funciones de fragilidad se obtuvieron a partir análisis no lineales de la historia temporal en osciladores de un solo grado de libertad [SDOF], que representaron las estructuras de mampostería no reforzada del departamento de Antioquia. La demanda fue considerada mediante registros de movimiento del terreno seleccionados de la base de datos de *Pacific Earthquake Engineering Research*<sup>5</sup>, asegurando su compatibilidad con las características tectónicas y la sismicidad locales. Se supuso un tipo de suelo rocoso para todos los registros y no consideraron los efectos de proximidad a la falla durante su selección.

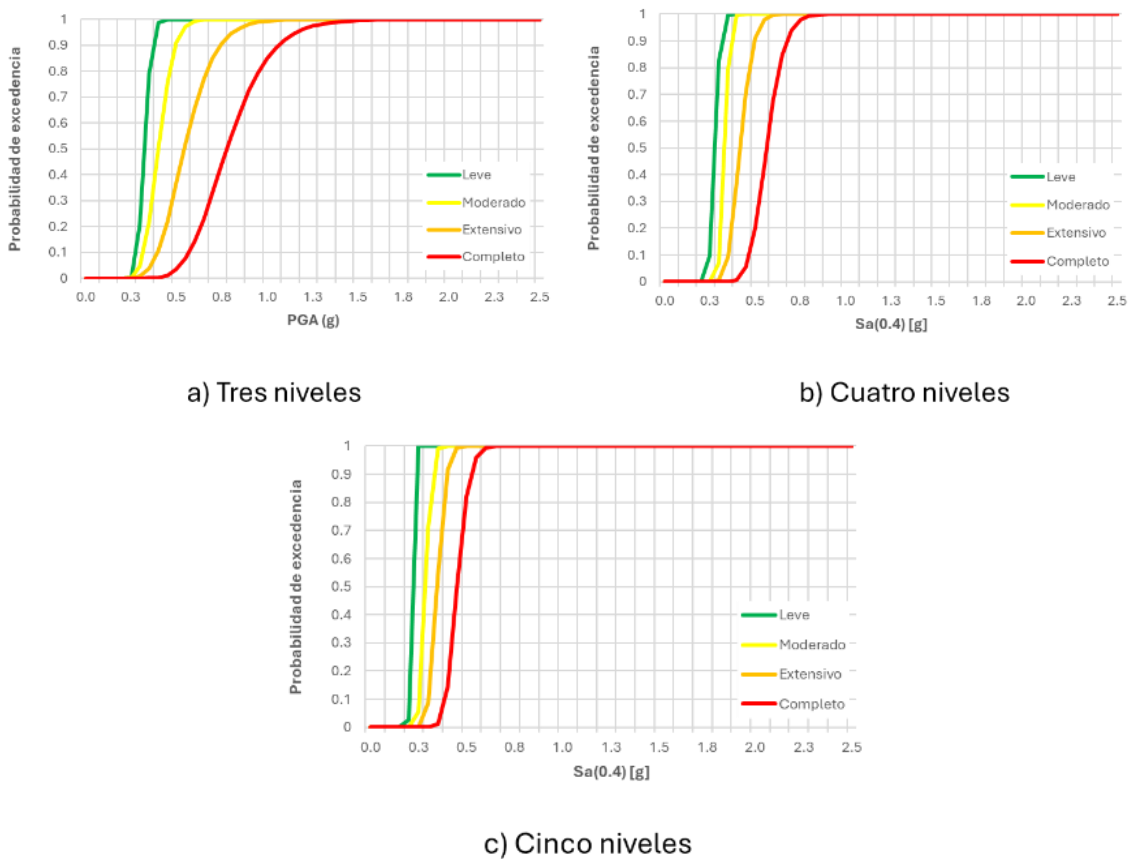
Se definieron dos medidas de intensidad sísmica, representativas de las características dinámicas las edificaciones. Para edificaciones rígidas [tres niveles], se utilizó PGA, mientras que, para edificaciones de cuatro o más niveles, se empleó  $S_a$  (0.4s), considerando el periodo alargado para reflejar los efectos de daños estructurales en el comportamiento dinámico de las edificaciones.

Para cada SDOF, se estimó el desplazamiento espectral máximo causado por cada registro y se comparó con los desplazamientos del límite inferior de cada estado de daño, lo que permitió clasificar la estructura dentro de un estado de daño específico. Este proceso resultó en una matriz de daños que contiene el número de SDOF en cada estado de daño.

<sup>5</sup> [Pacific Earthquake Engineering Research Strong Ground Motion Databases](#)

Finalmente, cada función de fragilidad se obtuvo ajustando los datos de la matriz de daño a una función de distribución lognormal acumulativa, cuyos parámetros [media logarítmica y desviación estándar logarítmica] se obtuvieron mediante una regresión estadística utilizando el método de los mínimos cuadrados. En la Figura 3-33 se muestran las curvas de fragilidad desarrolladas por Acevedo et al. (2017) para el mecanismo de falla en el plano de edificaciones de mampostería no reforzada de tres, cuatro y cinco niveles.

**Figura 3-33.** Curvas de fragilidad para el mecanismo de falla en el plano para edificaciones de mampostería no reforzada. a) 3 niveles, b) 4 niveles, c) 5 niveles, obtenidas por Acevedo et al. (2017).

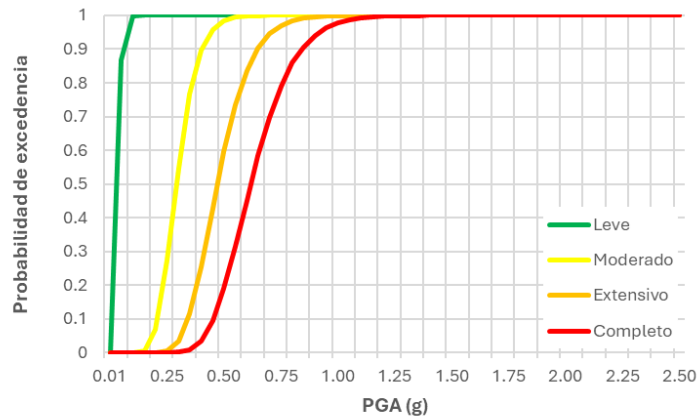


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Acevedo et al. (2017).

Para las edificaciones de mampostería reforzada de dos niveles, se utilizaron las curvas de fragilidad obtenidas por Alonzo Hernández & Martínez Díaz (2018) en El Salvador, donde se tienen técnicas constructivas similares a las de Suramérica (Villar-Vega et al., 2017). Estos autores siguieron las recomendaciones establecidas en el documento *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, GEM Technical Report 2015-08 v1.0.0* (D 'Ayala et al., 2015). A partir de la selección de edificaciones de mampostería reforzada de bloques de concreto de dos niveles, se consideraron exclusivamente los componentes estructurales. Se empleó un modelo de

múltiples grados de libertad, que incorporó elementos correspondientes a cada componente de resistencia lateral. Los autores realizaron un análisis dinámico no lineal incremental utilizando un conjunto de registros de movimiento del suelo, generados a partir de la sismicidad histórica. Finalmente, con los datos obtenidos, se construyeron las curvas de fragilidad. En la Figura 3-34 se presentan las curvas de fragilidad para las edificaciones de mampostería reforzada de dos niveles con parámetros de amenaza expresados en términos de PGA.

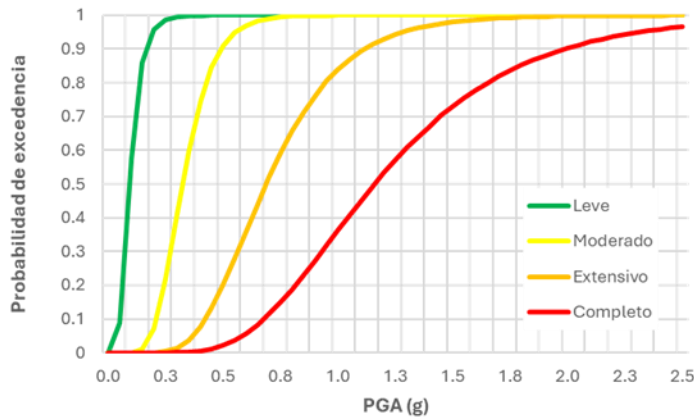
**Figura 3-34.** Curvas de fragilidad para edificaciones de mampostería reforzada de dos niveles obtenidas por Alonzo Hernández & Martínez Díaz (2018).



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Alonzo Hernández & Martínez Díaz (2018).

Para las edificaciones de mampostería confinada se usaron las curvas de fragilidad obtenidas por Galán Galdámez & Samayoa Escalante (2020) en El Salvador, quienes también utilizaron las recomendaciones establecidas en el documento *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, GEM Technical Report 2015-08 v1.0.0* (D 'Ayala et al., 2015). Definieron las edificaciones de referencia como la mampostería confinada de ladrillo de barro cocido de uno y dos niveles, tomando en cuenta los componentes estructurales, utilizando un modelo de múltiples grados de libertad y ejecutando un análisis dinámico no lineal incremental. En la Figura 3-35 se presentan las curvas de fragilidad para edificaciones de mampostería confinada de uno y dos niveles en términos de PGA.

**Figura 3-35.** Curvas de fragilidad para edificaciones de mampostería confinada de uno y dos niveles obtenidas por Galán Galdámez & Samayoa Escalante (2020).

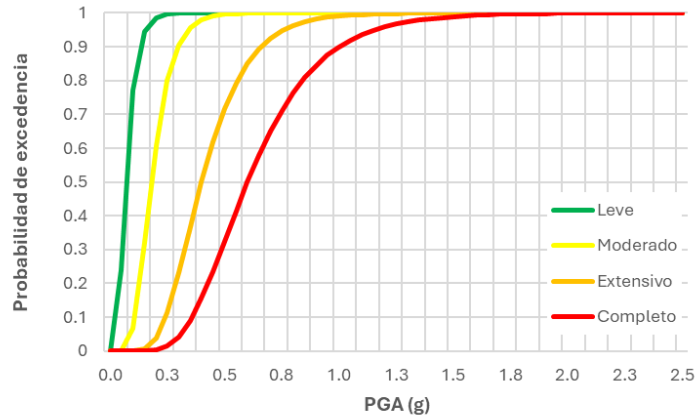


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Galán Galdámez & Samayoa Escalante (2020).

Para las edificaciones de concreto reforzado, presentes en la zona de estudio, se usaron las curvas de fragilidad obtenidas por Fikri & Ingham (2022) en Nueva Zelanda. Esto se fundamenta en las similitudes entre las prácticas constructivas de pórticos de concreto reforzado en Nueva Zelanda y Colombia, como el uso de normativas sismo-resistentes que garantizan la seguridad estructural en zonas sísmicas, y la utilización de concreto reforzado con acero, asegurando la resistencia y durabilidad de las estructuras. Ambas normativas tienen en común un enfoque de seguridad, incluyen materiales reforzados, emplean métodos de análisis sísmico, como el análisis modal espectral y el análisis dinámico no lineal; contemplan requisitos de confinamiento para los elementos estructurales y son objeto de actualizaciones periódicas (Cevallos-Velásquez et al., 2024; New Zealand Standards Executive, 2006).

En su estudio, Fikri & Ingham (2022) realizaron un análisis dinámico incremental para evaluar el comportamiento sísmico de edificaciones de concreto reforzado no dúctiles, con mampostería de relleno de mediana altura. A partir de este análisis, generaron un conjunto de curvas de fragilidad que representan diversos estados de daño tras la sacudida principal en términos de la aceleración espectral en el primer modo de vibración con un 5% de amortiguación viscosa. En la Figura 3-36 se presentan las curvas de fragilidad para edificaciones de pórticos de concreto reforzado con mampostería de relleno de mediana altura.

**Figura 3-36.** Curvas de fragilidad para edificaciones de concreto reforzado con mampostería de relleno de mediana altura obtenidas por Fikri & Ingham (2022).



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Fikri & Ingham (2022).

En la Tabla 3-5 se muestran los parámetros de las curvas de fragilidad utilizadas para las tipologías estructurales identificadas en la zona periurbana de San Cristóbal, teniendo en cuenta el modelo de exposición sísmica.

**Tabla 3-5.** Parámetros de curvas de fragilidad utilizados para el modelo de vulnerabilidad.

Número de pisos	Tipo de medida de intensidad	Leve (g)		Moderado (g)		Extensivo (g)		Daño completo (g)	
		Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD
<b>Mampostería no reforzada</b>									
1	PGA	0,326	0,327	0,593	0,327	0,696	0,327	0,826	0,327
2	PGA	0,118	0,316	0,231	0,316	0,291	0,316	0,381	0,316
3	PGA	0,324	0,095	0,450	0,150	0,594	0,224	0,778	0,243
4	Sa (0,4 s)	0,278	0,081	0,331	0,067	0,418	0,134	0,563	0,141
5	Sa (0,4 s)	0,215	0,037	0,286	0,085	0,346	0,105	0,451	0,113
<b>Mampostería reforzada</b>									
2	PGA	0,0351	0,315	0,291	0,252	0,471	0,248	0,618	0,241
<b>Mampostería confinada</b>									
2, 3, 4, 5	PGA	0,092	0,454	0,323	0,328	0,687	0,378	1,160	0,419
<b>Concreto Reforzado</b>									
2, 3	PGA	0,070	0,480	0,180	0,390	0,400	0,390	0,600	0,400

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 Riesgo sísmico

Con los componentes descritos anteriormente, es posible realizar una estimación del riesgo sísmico para la zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, es decir, una estimación del daño debido al impacto de uno o más eventos sísmicos con potencial

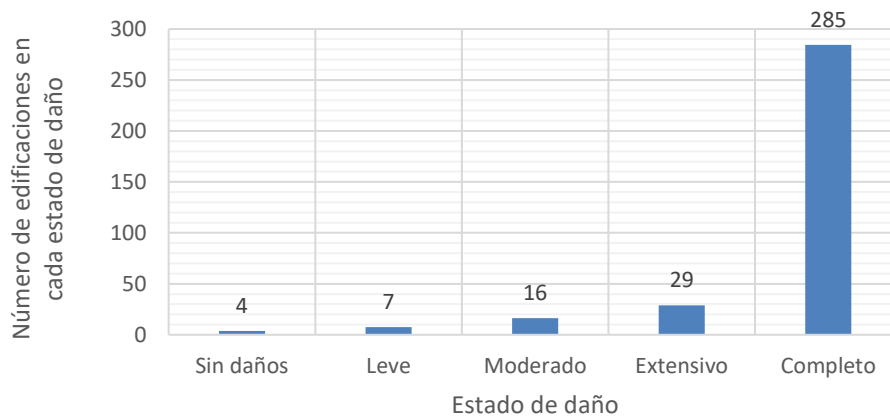
destruictivo. Para la evaluación del riesgo sísmico se utilizó el método determinístico, usando eventos sísmicos hipotéticos definidos en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) y los planteados por Acevedo et al. (2020).

### 3.5.1 Resultados del análisis de escenarios sísmicos

La evaluación de riesgo sísmico para la zona de estudio se llevó a cabo utilizando la calculadora de escenarios DSHA del motor de cálculo *OpenQuake*. Este programa emplea el modelo de fuentes sísmicas correspondiente a la zona de estudio, descrito en la *sección 3.2*, junto con la información obtenida para el modelo de exposición sísmica detallado en la *sección 3.3* y las curvas de fragilidad seleccionadas para las edificaciones presentes en la zona de estudio, descritas en la *sección 3.4*. Se presentan los resultados correspondientes al peor escenario sísmico modelado en este trabajo de investigación, que considera un evento sísmico de un ambiente tectónico profundo, según lo planteado por el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016), utilizando la GMPE de Montalva et al. (2017).

Se tiene que, para el peor escenario de amenaza sísmica modelado en este trabajo de investigación, una estimación de aproximadamente 285 edificaciones [83%] sufrirían colapsos totales, 29 edificaciones [8%] presentarían daño extensivo, 16 edificaciones [5%] tendrían daños moderados, 7 edificaciones [2%] experimentarían daños leves y 4 edificaciones [1%] no resultarían afectadas. En la Figura 3-37 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para el peor escenario sísmico.

**Figura 3-37.** Distribución de daño en edificaciones para el peor escenario de riesgo sísmico.

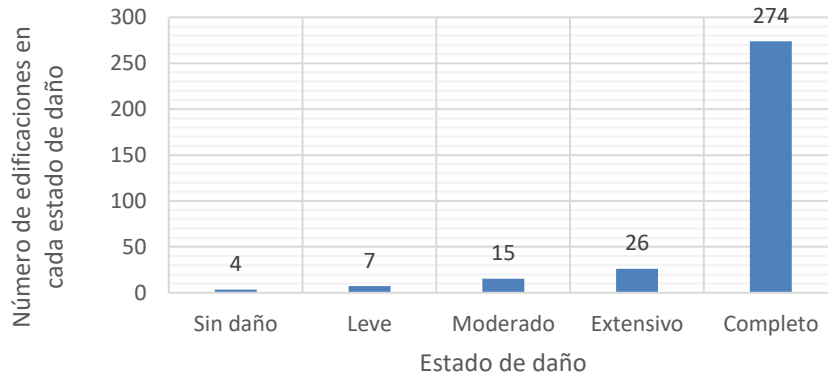


Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 274 edificaciones [84%] colapsarían por completo, 26 edificaciones [8%]

sufrirían daños extensivos, 15 edificaciones [5%] presentarían daños moderados, 7 edificaciones [2%] tendrían daños leves y 4 edificaciones [1%] no sufrirían daños. En la Figura 3-38 se presenta la distribución de edificaciones de mampostería no reforzada para el peor escenario de riesgo sísmico.

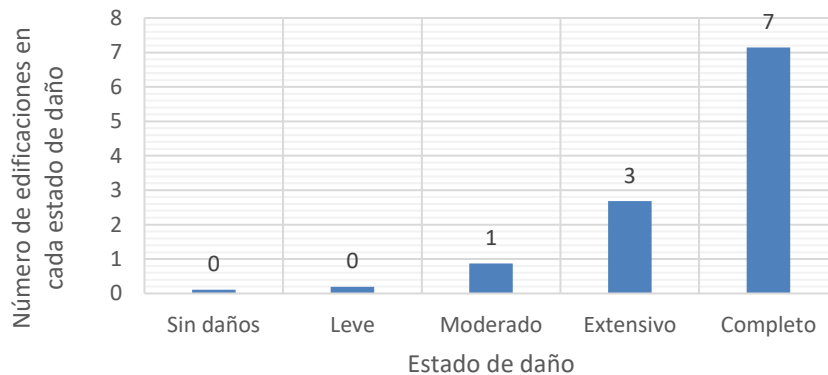
**Figura 3-38.** Distribución de daño en edificaciones de mampostería no reforzada para el peor escenario de riesgo sísmico.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que 7 edificaciones [65%] colapsarían completamente, 3 edificaciones [24%] sufrirían daños extensivos, 1 edificación [8%] presentaría daños moderados, y ninguna edificación experimentaría daños leves o quedaría sin daños. En la Figura 3-39 se presenta la distribución de daño en edificaciones de mampostería confinada para el peor escenario de riesgo sísmico.

**Figura 3-39.** Distribución de daño en edificaciones de mampostería confinada para el peor escenario de riesgo sísmico.



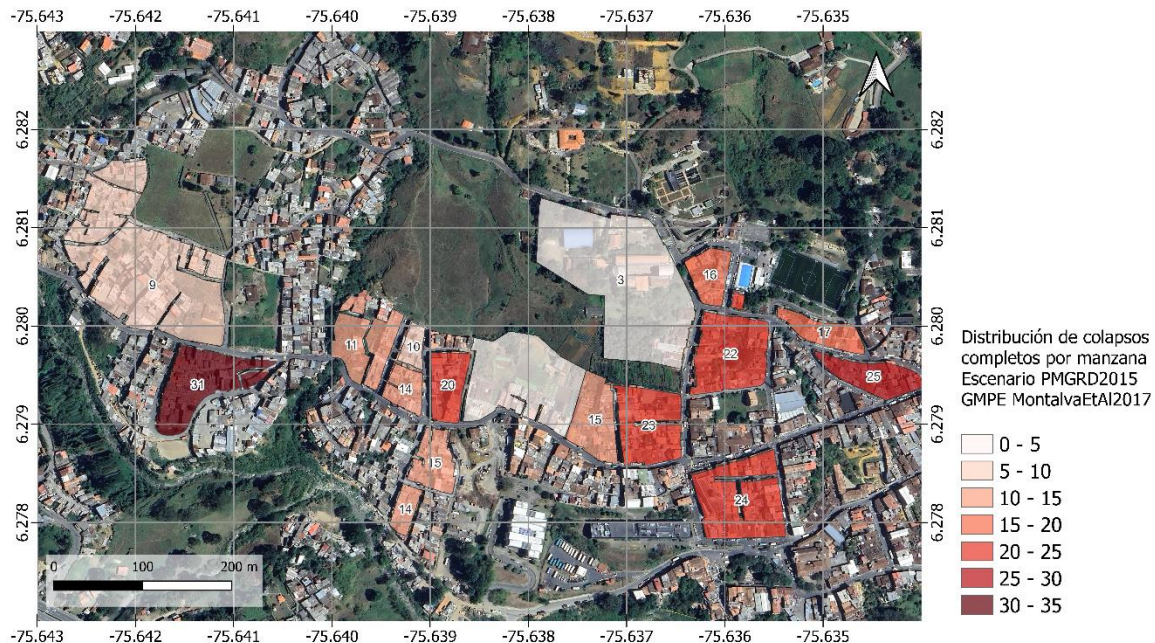
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual colapsaría por completo en el peor escenario

de riesgo sísmico. Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que colapsarían en el peor escenario de riesgo sísmico.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que colapsarían en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura 3-40 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos totales por manzana considerando el peor escenario sísmico.

**Figura 3-40.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el peor escenario de riesgo sísmico.



Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación con estudios previos, se observan similitudes significativas. El Estudio de Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Universidad de los Andes, 2019) señala que, en un escenario de sismo cortical, hasta un 75,7% de las edificaciones podrían sufrir daños severos, con la generación de hasta 21 millones de m<sup>3</sup> de escombros. Por su parte, para un escenario de sismo profundo, el mismo estudio proyecta daños severos en el 60,2% de edificaciones y la acumulación de hasta 19,2 millones de m<sup>3</sup> de escombros. En la presente investigación se tiene un porcentaje superior de edificaciones con daños severos, alcanzando el 83,6%. Además, el análisis de riesgo sísmico del Valle de Aburrá concluye que las tipologías constructivas con mayor riesgo relativo son, en orden de prioridad, edificaciones en tapia, muros de mampostería simple con placa o viga en primeros niveles y mampostería no reforzada en el último nivel y muros de mampostería simple.

Por otro lado, los resultados obtenidos por Acevedo et al. (2017) sugieren que alrededor del 20% del total de las estructuras de mampostería no reforzada en el departamento de Antioquia sufrirían daños graves con riesgo de colapso. Cabe destacar la diferencia de

escala entre ambos estudios: mientras que Acevedo et al. (2017) evalúan el riesgo a nivel departamental, este trabajo de investigación se centra en unas manzanas específicas del Corregimiento de San Cristóbal en Medellín. Por esta razón, el estudio de Acevedo et al. (2017), presenta una amenaza sísmica variable para todo el territorio, mientras que en este trabajo se tienen resultados homogéneos para el área de estudio. A pesar de estas diferencias, ambos coinciden en señalar la alta vulnerabilidad de las edificaciones de mampostería no reforzada en Antioquia.

La mampostería no reforzada constituye el sistema constructivo predominante en el modelo de exposición en los polígonos de estudio, representando el 95% del total. De estas edificaciones, cerca del 83% tendrían colapsos totales, representando un número elevado de edificaciones colapsadas. Aunque las edificaciones de mampostería confinada, mampostería reforzada y concreto reforzado también sufrirían daños severos que podrían derivar en colapsos completos, estas tipologías constructivas no son representativas en el área de estudio. Por lo tanto, no es posible generalizar estos resultados para estas. Este comportamiento podría estar relacionado con deficiencias constructivas, como incumplimientos de la norma sismo-resistente, baja calidad de los materiales y prácticas constructivas inadecuadas.

Las curvas de fragilidad representan como aumenta la probabilidad de alcanzar estados de daño conforme varían las aceleraciones. Los estados de daño menos severos tienen mayores probabilidades a bajas aceleraciones, mientras que los estados de daño más graves requieren aceleraciones más altas para alcanzar probabilidades significativas. Según las aceleraciones obtenidas en el modelo de amenaza sísmica, definido en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) en el ambiente tectónico profundo, y empleando la GMPE de Montalva et al. (2017), con valores entre 1,6 g y 1,7 g, se observa que estas aceleraciones, en la mayoría de los casos, superan la probabilidad de excedencia establecida en las curvas de fragilidad. Esto resulta consistente con los colapsos totales observados, evidenciando la relación entre la aceleración y los estados de daño definidos.

Para las edificaciones de mampostería no reforzada de un nivel, la probabilidad de colapso completo es baja hasta aproximadamente 0,6 g, pero comienza a incrementarse de manera notable a partir de este punto, alcanzando valores cercanos al 100% alrededor de 1,8 g. En edificaciones de dos niveles, la probabilidad alcanza el 100% a partir de 0,9 g; en tres niveles, a partir de 1,2 g; en cuatro niveles, desde 0,8 g; y en cinco niveles, desde 0,6 g.

De la misma manera, para las edificaciones de mampostería confinada, mampostería reforzada y concreto reforzado presentes en el modelo de exposición, que presentan mayor ductilidad, se observa que, para la mampostería reforzada, la probabilidad de excedencia del 100% para colapsos completos es a partir de 1,2 g; en mampostería confinada, a partir de 2,5 g; y en concreto reforzado, desde 1,5 g. Esto indica que las probabilidades de excedencia de daño completo para los niveles de aceleración obtenidos en el modelo de amenaza son altas para todas las tipologías estructurales, lo que resulta consistente con los colapsos totales que podría presentarse en la mayoría del inventario de edificaciones de acuerdo con el modelo de riesgo sísmico presentado en este trabajo.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación permiten resaltar la alta vulnerabilidad de las edificaciones presentes en los polígonos de estudio frente al escenario de amenaza sísmica definida por el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016), especialmente aquellas construidas con mampostería no reforzada. La elevada probabilidad de presentar colapsos totales que pueden derivar en afectaciones graves a las personas pone en manifiesto la urgencia de actuar para la reducción del riesgo.

Por ello, es crucial implementar medidas de mitigación del riesgo que incluyan estrategias de reforzamiento estructural, diseñadas para mejorar la resistencia de las edificaciones frente a sismos. Estas medidas deben adaptarse a las características de vulnerabilidad social y económica de las comunidades afectadas, garantizando que sean prácticas, accesibles y replicables. Además, el reforzamiento debe realizarse minimizando la necesidad de demoler elementos estructurales existentes, preservando la funcionalidad y accesibilidad de las edificaciones para sus habitantes.

La integración de estas estrategias puede contribuir a reducir significativamente la probabilidad de sufrir daños en las edificaciones, permitiendo a la vez, fortalecer la resistencia de las comunidades, promoviendo su capacidad de recuperarse rápidamente ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

Los resultados de los demás escenarios de riesgos planteados se encuentran en el **Anexo A**.

## **4. Diseño de medidas de mitigación del riesgo sísmico**

Entre las medidas para la reducción del riesgo sísmico destacan varias estrategias. Las estrategias de prevención del riesgo incluyen acciones y mecanismos implementados antes de la ocurrencia de un evento sísmico, con el objetivo de identificar la amenaza sísmica, evaluar los riesgos asociados y eliminarlos o reducirlos. Las estrategias de previsión del riesgo se enfocan en generar conciencia en la población acerca de los posibles daños causados por un sismo y la importancia de estar preparados para enfrentarlo. Por otro lado, las estrategias de mitigación del riesgo abarcan las intervenciones estructurales y no estructurales orientadas a disminuir el impacto de un evento sísmico. Finalmente, las estrategias de preparación contemplan las actividades y medidas anticipadas para garantizar una respuesta eficaz ante la materialización de un sismo (CENAPRED México & CONACYT, 2018).

El presente capítulo aborda las medidas de mitigación del riesgo sísmico aplicables a edificaciones de mampostería no reforzada, que constituyen una parte significativa del modelo de exposición sísmica, cerca del 96% de las edificaciones de los polígonos de estudio. Estas edificaciones, debido a sus características constructivas, presentan una alta vulnerabilidad ante eventos sísmicos, lo que aumenta considerablemente el riesgo de daños severos o colapso durante un terremoto. En este contexto, se plantean estrategias de refuerzo estructural y otras intervenciones que buscan mejorar la capacidad sismorresistente de estas construcciones y reducir su vulnerabilidad, minimizando el impacto de futuros sismos sobre la integridad de las edificaciones y la seguridad de las personas. Así mismo, se analizan las técnicas que ofrecen una mayor viabilidad en términos de replicabilidad y accesibilidad para comunidades con recursos limitados.

### **4.1 Diseño de intervenciones estructurales**

Los problemas estructurales comunes en las edificaciones informales son la discontinuidad de los elementos, hormiguesos en el concreto, mezcla de diferentes tipos de unidades de mampostería, golpeteo entre edificaciones, falta de elementos de confinamiento, excesiva esbeltez de los muros y el uso de un mortero de pega insuficiente (Hénder Puerto, 2013). De igual manera, los mecanismos de falla más frecuentes en las construcciones de mampostería no reforzada incluyen la separación de los muros en las esquinas, la aparición de grietas diagonales, la desconexión entre los muros y el sistema de cubierta, la formación de grietas verticales y las fallas fuera del plano del muro (Bhattacharya et al., 2014).

Las medidas estructurales se refieren a cualquier tipo de construcción física diseñada para reducir o prevenir los posibles impactos de las amenazas, así como el uso de técnicas de ingeniería orientadas a fortalecer la resistencia y la resiliencia de las estructuras o sistemas frente a dichas amenazas (UNISDR, 2009). En este trabajo de investigación, se analizaron las medidas estructurales enfocadas en la reducción de la vulnerabilidad sísmica, contribuyendo directamente a la resiliencia estructural.

Para determinar la necesidad de aplicar medidas de intervención en una edificación es necesario realizar una evaluación de su vulnerabilidad sísmica y verificar si existen daños asociados a cargas gravitacionales. A partir de esta evaluación, es posible recomendar intervenciones para reparar los daños presentes y reducir el nivel de riesgo sísmico (Gómez Zuluaga et al., 2017), como se muestra en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1.** Recomendaciones de intervención de reducción del riesgo sísmico.

Vulnerabilidad	Daños		
	Severos	Moderados	Leves
<b>Alta</b>	Evacuación y reconstrucción	Evacuación, reforzamiento o reconstrucción	Reforzamiento
<b>Media</b>	Evacuación, reforzamiento o reconstrucción	Reparación del daño o reforzamiento	Reparación del daño
<b>Baja</b>	Evacuación, reforzamiento o reconstrucción	Reforzamiento	Reparación cosmética

Fuente: Adaptado de (Gómez Zuluaga et al., 2017).

De esta manera, resulta razonable adoptar para las edificaciones de mampostería no reforzada, las soluciones propuestas en el *Título D Mampostería estructural y el Título E Casas de uno y dos pisos* del Reglamento NSR-10 (Ministerio de Ambiente, 2010). Estas intervenciones son aplicables para la construcción de nuevas edificaciones, sin embargo, para las existentes, resultan de difícil cumplimiento, pues por su naturaleza informal, por lo general no responden a criterios de configuración y resistencia mínima de los materiales exigidos por estos títulos; por esta razón, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400 (2023) plantearon una guía para la evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería de origen informal en Colombia.

El diseño de medidas estructurales tiene como objetivo reducir la vulnerabilidad física de las edificaciones a través del reforzamiento estructural, antes de la ocurrencia de un evento sísmico con el fin de mejorar su desempeño y reducir la probabilidad de víctimas fatales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023). En este sentido, el reforzamiento estructural corresponde a las obras realizadas en una edificación con el fin de darle una mayor capacidad de carga a la misma, sin que necesariamente ésta presente daños causados por terremotos u otros efectos (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

Se espera que las edificaciones intervenidas mejoren su desempeño estructural y no estructural, entendiendo el desempeño estructural como el comportamiento de los

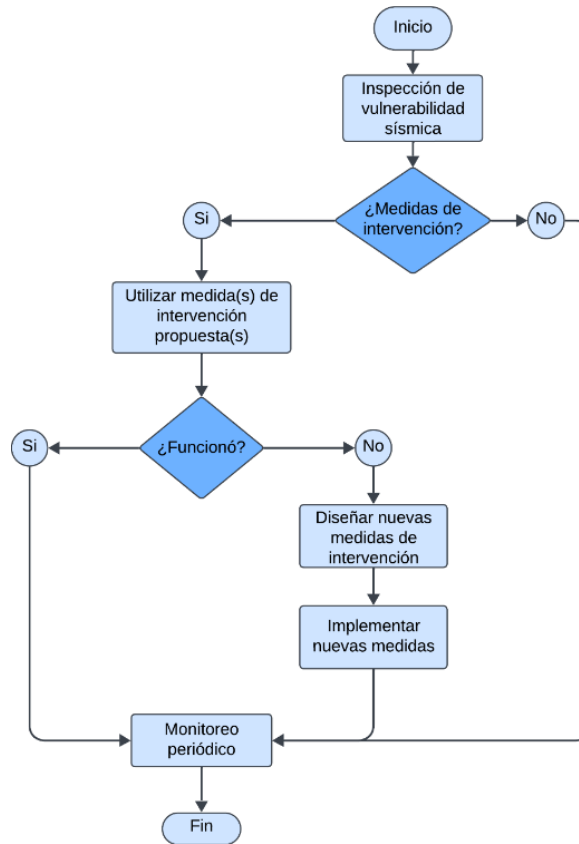
componentes estructurales durante un sismo, sufriendo daños, pero quedando algún margen de tiempo antes del colapso parcial o total, asegurando la evacuación oportuna y reduciendo las lesiones fatales a las personas resultantes de un daño estructural. El desempeño no estructural corresponde al comportamiento de los elementos no estructurales, que pueden presentar daños ante la ocurrencia de un evento sísmico generando amenaza para la vida de las personas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

Es importante anotar, que para la intervención estructural de cualquier edificación es necesario completar un análisis individual de su vulnerabilidad física y adelantar los procesos de licenciamiento requeridos para la ejecución de reforzamientos estructurales. Además, toda intervención estructural debe estar acompañada y asesorada por personal técnico idóneo y contar con la supervisión durante la ejecución de las actividades de reforzamiento (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023; Build Change & Swisscontact, 2015).

El proceso de implementación de medidas para mitigar la vulnerabilidad sísmica de una edificación inicia con una evaluación para determinar si es necesario aplicar medidas de intervención. Si no se requieren, se procede con un monitoreo periódico de la edificación. En caso de que se identifique la necesidad de intervención, se implementan algunas medidas propuestas en este trabajo de investigación y luego se evalúa su efectividad. Si las medidas son efectivas, se continúa con el monitoreo periódico; de lo contrario, se diseñan e implementan nuevas medidas, volviendo a evaluar su efectividad en un ciclo continuo hasta lograr la reducción deseada de la vulnerabilidad, ajustándose a los recursos disponibles en cada caso particular. En la Figura 4-1, se ilustra el proceso de implementación de medidas para mitigar la vulnerabilidad sísmica.

Las medidas de intervención pueden clasificarse en convencionales y no convencionales, de acuerdo con los materiales y las técnicas de construcción empleados. Es importante señalar que la norma sismorresistente no incluye los métodos no convencionales dentro de las posibles intervenciones para la reducción de la vulnerabilidad sísmica (Ministerio de Ambiente, 2010). Sin embargo, investigaciones a nivel global, regional y local han demostrado ampliamente la efectividad de estas intervenciones, contribuyendo a la reducción del riesgo y ofreciendo una ventaja en términos de costo-beneficio sobre las medidas convencionales.

Figura 4-1. Proceso de implementación de medidas para mitigar la vulnerabilidad sísmica.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1 Alternativas convencionales de intervención estructural

Las medidas convencionales para la reducción del riesgo sísmico corresponden a soluciones aceptadas y estandarizadas en normativas de construcción sismorresistente. Estas intervenciones se basan en métodos probados y en el uso de materiales tradicionales como el concreto, el acero y la mampostería, los cuales cumplen con los requisitos de diseño estructural establecidos para mejorar la resistencia de las edificaciones frente a sismos (Cevallos-Velásquez et al., 2024).

Para definir las alternativas de intervención convencionales, se consideran las edificaciones incluidas en el modelo de exposición, el cual brinda información detallada para identificar las deficiencias de cada edificación y consolidar las necesidades de intervención. Las propuestas de alternativas de intervención convencionales son planteadas a partir de la guía de “Evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

Es de anotar que las intervenciones estructurales deben fundamentarse en una evaluación técnica previa de cada edificación para identificar sus deficiencias constructivas. Las

intervenciones estructurales propuestas se basan en los resultados de una evaluación técnica de vulnerabilidad sísmica, con el objetivo de corregir las deficiencias detectadas y reducir las vulnerabilidades. Estas acciones se enfocan únicamente en la reducción de la vulnerabilidad sísmica y no abordan la mitigación de riesgos asociados a otras amenazas por fenómenos de origen natural o socio-natural, además de estar planteadas para edificaciones individuales sin considerar construcciones y predios colindantes (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

En casos en donde no sea posible implementar un proyecto de intervención completo que mitigue todas las deficiencias identificadas en una edificación, se establece una priorización de condiciones a subsanar. Estas intervenciones deben garantizar una mejora estructural y una reducción de vulnerabilidad en comparación con la situación actual de la edificación, sin generar nuevas deficiencias (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023) En la Figura 4-2 se representa el orden de la priorización de las condiciones a subsanar.

**Figura 4-2.** Priorización de condiciones a subsanar en una edificación.



Fuente: Elaboración propia, a partir de Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400 (2023).

La condición estructural abarca elementos gravemente dañados o desgastados que pueden poner en riesgo la estabilidad de la edificación, como muros con grietas o en estado de deterioro, y elementos de concreto reforzado con fisuras o acero expuesto y corroído. Las intervenciones incluyen la demolición y reconstrucción de muros y elementos de concreto deteriorados, la reparación de concreto reforzado y la sustitución de componentes en sistemas de cubiertas livianas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

Las configuraciones estructurales inadecuadas pueden ser fachadas con exceso de aberturas, ausencia de muros perimetrales [en casos de muros compartidos] y muros sin amarre. Para corregir estas deficiencias, se pueden realizar intervenciones como el relleno o ajuste de aberturas en fachadas para incrementar el área sólida del muro, la construcción de muros perimetrales independientes y de muros perpendiculares para soporte fuera del plano, así como la sustitución de las culatas existentes por mampostería confinada. Otras

intervenciones incluyen el soporte de losas en voladizo, el refuerzo de escaleras o construcción de nuevas en concreto reforzado, la incorporación de juntas sísmicas para lograr configuraciones regulares y, de ser necesario, la demolición de uno o más niveles (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

La falta de transferencia adecuada de cargas puede llevar a colapsos parciales o totales de la edificación debido a problemas como la falta de muros transversales, muros delgados, ausencia de vigas de amarre y deficiencias en la conexión con el diafragma. Las intervenciones propuestas incluyen la construcción de nuevos muros para mantener la distancia adecuada entre muros paralelos, el incremento del espesor de los muros mediante revoques, complementar muros de altura incompleta, asegurar la conexión de muros con vigas superiores, y construir columnetas y nuevas vigas en losas prefabricadas. También se recomienda el refuerzo de estructuras de contención, el confinamiento de parapetos y la sustitución o construcción de cimentaciones en caso de bajo desempeño (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

Mejorar la resistencia y la ductilidad permite a la edificación soportar cargas laterales durante eventos sísmicos de mayor intensidad. Las deficiencias de resistencia suelen incluir mampostería de baja capacidad y la ausencia de muros, mientras que las deficiencias de ductilidad están asociadas a muros y aberturas sin confinamiento. Las intervenciones contemplan el revestimiento de muros con malla electrosoldada o sin ella, la conversión del sistema estructural a mampostería confinada, el confinamiento de aberturas y la construcción de nuevos muros (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

Este trabajo de investigación se centra en medidas de reducción del riesgo sísmico en casos de irregularidades en planta, muros con altura libre, ausencia de vigas de amarre, carencia de columnas de confinamiento y la falta de vigas dintel en las aberturas de los muros. Las medidas de reducción se presentan describiendo la condición actual y las deficiencias a corregir, el problema que genera cada una, y la medida de intervención propuesta, acompañada de una ilustración que muestra el detalle constructivo.

- **Construcción de juntas sísmicas**

Esta medida de reducción busca mitigar la condición inadecuada de configuración estructural mediante la construcción de juntas sísmicas que buscan reducir las deficiencias generadas por las irregularidades en planta de la edificación.

La geometría de una edificación debe ser simple tanto en planta y como en elevación. Las formas complejas, irregulares o asimétricas afectan negativamente el comportamiento de una estructura ante la acción sísmica, favoreciendo que esta experimente torsión. La falta de uniformidad facilita la aparición de intensas concentraciones de fuerza en las esquinas, que en general son difíciles de resistir para las edificaciones de mampostería no reforzada (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

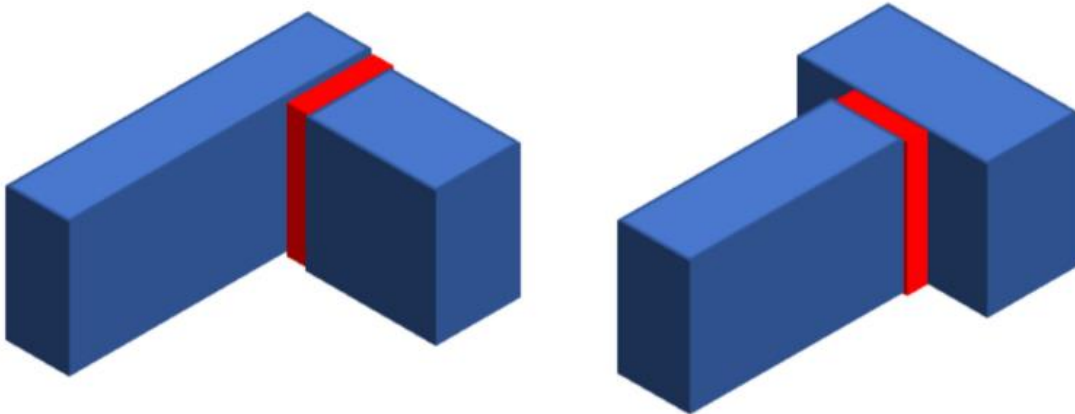
Las edificaciones que no cuentan con juntas sísmicas se encuentran vulnerables a sufrir daños en la estructura o colapso de esta, luego de ser sometidas a movimientos sísmicos (Meza Fajardo et al., 2022).

Las formas irregulares podrán convertirse por descomposición, en varias formas regulares, cumpliendo con las especificaciones de juntas sísmicas (Ministerio de Ambiente, 2010). Una junta sísmica se refiere a la separación en una edificación para dividirla en unidades, evitando su colisión al generarse movimientos laterales debido a la acción sísmica (Contreras Condori & Pérez Laos, 2021). Las juntas sísmicas deben estar posicionadas para separar la estructura existente en varios módulos que cumplan con los criterios de regularidad. Las juntas deben tener las siguientes dimensiones, en función de la altura de las edificaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023):

- Un nivel = 30 mm
- Dos niveles = 60 mm
- Tres niveles = 90 mm
- Para niveles superiores se debe considerar el diseño de elementos de confinamiento en concreto reforzado o la demolición de estos niveles, con el fin de dar cumplimiento a la normativa sismorresistente.

Se espera que esta intervención optimice la condición irregular de las edificaciones, reduciendo su peso y, en consecuencia, la fuerza cortante generada por eventos sísmicos (Juárez Tejada, 2024). En la Figura 4-3 se presenta un ejemplo de localización de juntas sísmicas.

**Figura 4-3.** Ejemplo de localización de juntas sísmicas en la planta de una edificación.



Fuente: (Furtado et al., 2021).

#### ▪ Revoque con malla electrosoldada

Esta medida de reducción busca mitigar la condición inadecuada de configuración estructural mediante la aplicación de revoque con malla electrosoldada que busca reducir las deficiencias generadas por altura libre en los muros de mampostería no reforzada.

La altura libre de los muros de mampostería no reforzada puede afectar la vulnerabilidad sísmica de una edificación, debido a que los muros más altos suelen ser más flexibles, lo

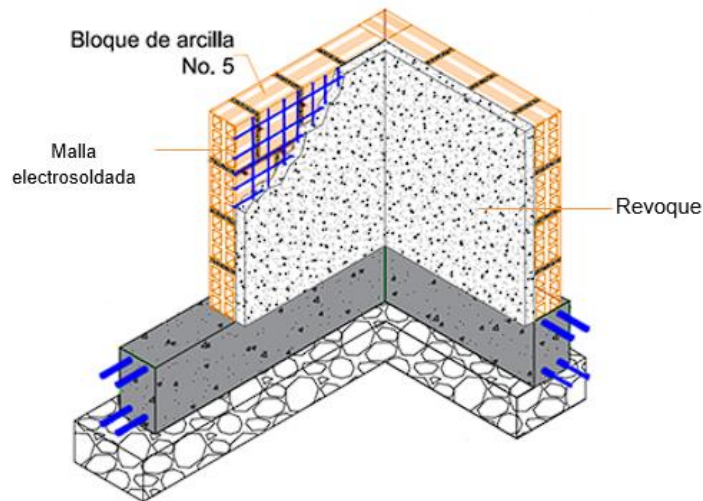
que puede generar mayores desplazamientos laterales durante un sismo. Esta flexibilidad puede reducir la rigidez estructural, aumentando así la probabilidad de sufrir daños (Meza Fajardo et al., 2022).

Además, los muros altos son más propensos a pandeo bajo cargas laterales fuera del plano, lo que puede comprometer la integridad estructural del muro y, por extensión, de toda la edificación. Así mismo, en estos muros pueden concentrarse esfuerzos en áreas específicas, como la base del muro, lo que puede ocasionar fallas localizadas en estas zonas (Garzón Andrade, 2020).

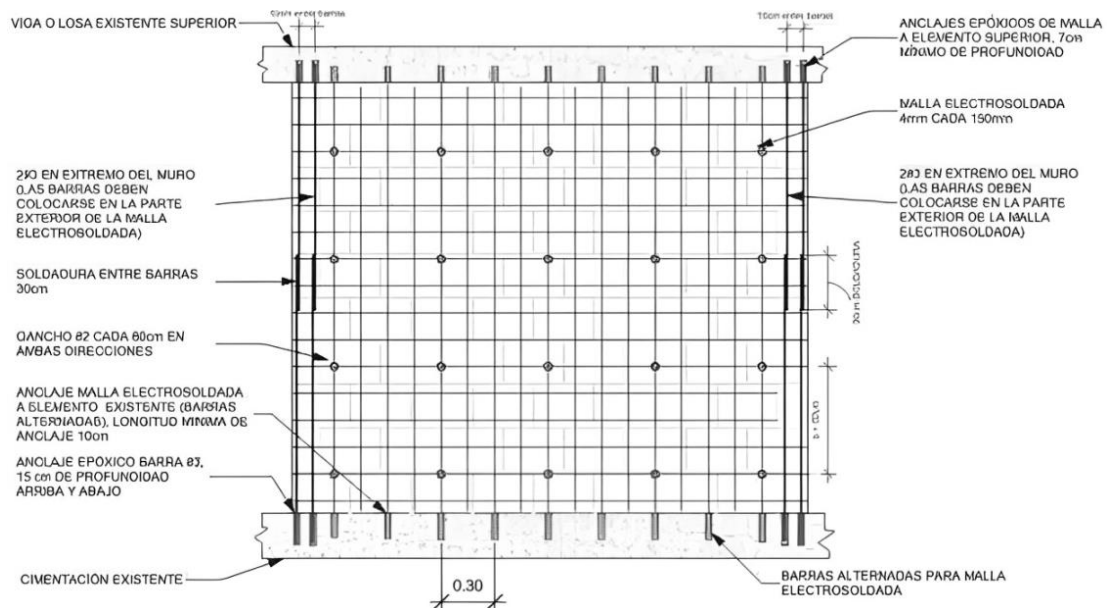
Para esta intervención se colocan mallas electrosoldadas en ambas caras de la mampostería, unidas mediante conectores transversales pasantes; posteriormente, el muro se recubre con mortero (Gamba Tiusaba, 2019). La aplicación de malla electrosoldada y revoque mejora el desempeño de los muros frente a cargas sísmicas y favorece la integridad estructural del muro, aumentando su resistencia y reduciendo la posibilidad de una falla por corte y flexión (San Bartolomé et al., 2007).

Gamba Tiusaba (2019) evaluó el comportamiento de un muro de mampostería reforzado con malla electrosoldada, encontrando que en el ensayo de compresión los muros reforzados presentaron mayor rigidez en comparación con los muros no reforzados. En los ensayos de tensión diagonal, tanto la resistencia como las deformaciones de los muros reforzados también fueron superiores a las de los muros sin reforzamiento.

Las mallas electrosoldadas están formadas por alambres de 4 mm de diámetro con espaciado cada 190 mm, deben contar con una resistencia a la compresión de 485 MPa. Para su acabado y protección del medio ambiente, se recubren con mortero de cemento (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023). En la Figura 4-4 y Figura 4-5 se presenta un ejemplo de reforzamiento con malla electrosoldada y revoque y el detalle constructivo de la malla electrosoldada.

**Figura 4-4.** Ejemplo reforzamiento de muro con malla electrosoldada y revoque.

Fuente: (Gamba Tiusaba, 2019).

**Figura 4-5.** Refuerzo de muro existente con revoque con malla.

Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023).

- **Construcción de viga de amarre sobre todos los muros**

Esta medida de reducción busca mitigar la condición inadecuada de transferencia de cargas, reduciendo las deficiencias generadas por la ausencia de viga de amarre en la parte superior de los muros.

Las vigas de amarre desempeñan un papel crucial en la estabilidad de las edificaciones, debido a que conectan y mantienen unidos los diferentes elementos estructurales, generando un diafragma rígido que evita desplazamientos relativos entre ellos, lo cual disminuye significativamente la probabilidad de daños durante un sismo (Meza Fajardo et al., 2022). Estas vigas no solo distribuyen las cargas sísmicas de manera uniforme en los muros, evitando concentraciones de carga que puedan causar fallas localizadas, sino que también proporcionan resistencia adicional contra las fuerzas horizontales generadas por los sismos; sin esta resistencia, los muros de mampostería, particularmente frágiles ante fuerzas laterales, son más propensos a agrietarse o colapsar (Villa García, 2009).

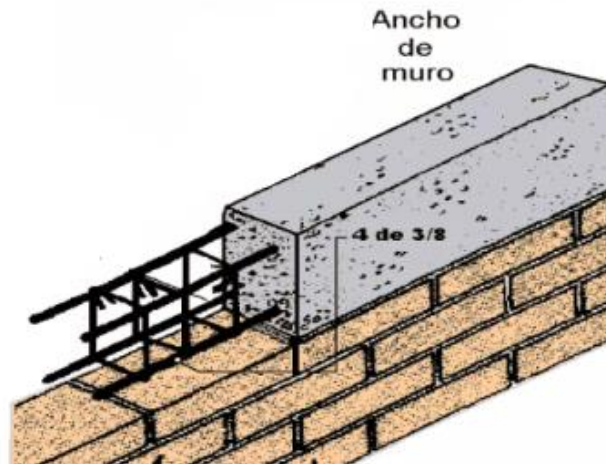
Así mismo, las vigas de amarre aseguran una conexión más efectiva entre los muros y otros elementos estructurales, lo que mejora la capacidad de la edificación para actuar como una unidad cohesiva durante un sismo (Yamín Lacouture et al., 2007).

Teniendo en cuenta las especificaciones de la guía “Evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería” de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400 (2023), las vigas de amarre sobre los muros deben tener las siguientes especificaciones:

- Tener como mínimo un ancho igual al del muro sobre el que se apoya y una altura tal que el área de su sección transversal sea mínima de 200 cm<sup>2</sup>.
- Ser de concreto reforzado con una resistencia mínima de  $f'_c=17.5$  MPa.
- Su refuerzo longitudinal debe ser mínimo 4 barras de acero corrugado No. 3 (3/8”) o 10 M (10 mm), con resistencia mínima a la tracción  $f_y= 420$  MPa.
- Su refuerzo transversal debe estar constituido por estribos cerrados rectangulares en barras no. 2 (1/4”) o 6 M (6 MM), con superficie corrugada, posicionados a máximo 150 mm entre sí.

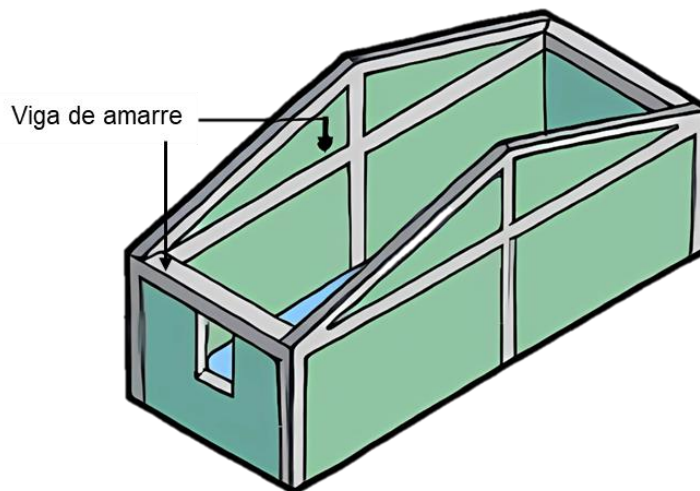
En la Figura 4-6 y Figura 4-7 se presenta un ejemplo de construcción de viga de amarre sobre un muro de mampostería y sobre toda la edificación.

**Figura 4-6.** Ejemplo de construcción de viga de confinamiento sobre muro de mampostería.



Fuente: (Vilchez Conde & Munuera Montero, 2010).

**Figura 4-7.** Ejemplo de construcción de vigas de amarre sobre toda la edificación.



Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

- **Construcción de columnas de confinamiento**

Esta medida de reducción busca mitigar la condición inadecuada de transferencia de cargas, reduciendo las deficiencias generadas por la ausencia de columnas de confinamiento en los extremos laterales de los muros de mampostería no reforzada.

La falta de columnas de confinamiento en las edificaciones de mampostería no reforzada reduce significativamente su resistencia y ductilidad, impidiendo la disipación adecuada de la energía sísmica y la hace más susceptible a agrietarse y colapsar bajo cargas sísmicas (Build Change & Swisscontact, 2015). Estos elementos estructurales no solo aumentan la capacidad de carga de los muros, disminuyendo el riesgo de colapso (Meza Fajardo et al.,

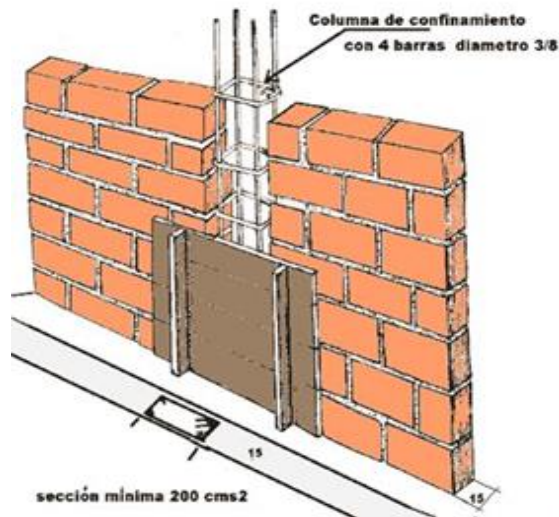
2022), sino que también refuerzan la resistencia al corte, proporcionando mayor estabilidad frente a los esfuerzos generados por movimientos sísmicos. Sin columnas de confinamiento, los muros de mampostería no reforzada presentan una vulnerabilidad notable frente a los esfuerzos de corte, lo que incrementa el peligro de fallas estructurales en escenarios sísmicos severos.

Teniendo en cuenta las especificaciones de la guía “Evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería” de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400 (2023), se debe asegurar la presencia de columnas de confinamiento en todas las intersecciones de los muros, todos los extremos de los muros y todos los ejes de abertura en muros, como puertas y ventanas, así mismo las columnas deben incluir las siguientes especificaciones:

- Tener como mínimo un ancho igual al muro que confina
- Tener el área de su sección transversal de mínimo  $200 \text{ cm}^2$ .
- Ser de concreto reforzado con una resistencia mínima de  $f'_c=17.5 \text{ MPa}$ .
- Su refuerzo longitudinal debe ser como mínimo 4 barras de acero corrugado No. 3 (3/8") o 10 M (10 mm), con resistencia mínima a la tracción  $f_y= 420 \text{ MPa}$ .
- Su refuerzo transversal debe estar constituido por estribos cerrados rectangulares en barras No. 2 (1/4") o 6 M (6 MM), con superficie corrugada, posicionados a máximo 150 mm entre sí.

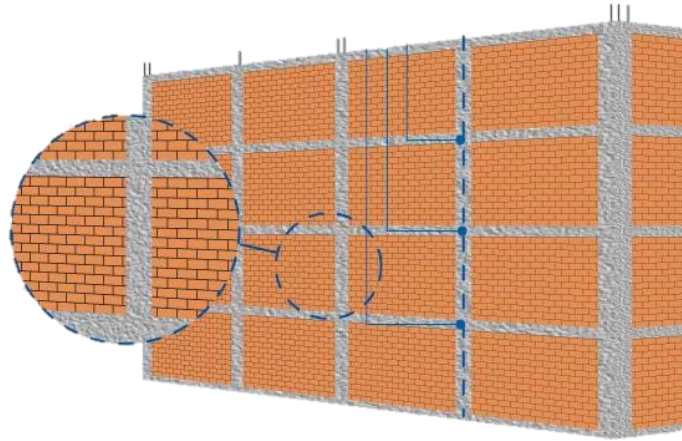
En la Figura 4-8 y Figura 4-9 se presenta el ejemplo de construcción de columnas de confinamiento en un muro de mampostería y su localización en una edificación.

**Figura 4-8.** Ejemplo de construcción de columna de confinamiento en muro de mampostería.



Fuente: (Vilchez Conde & Munuera Montero, 2010).

**Figura 4-9.** Ejemplo de localización de columnas de confinamiento en una edificación.



Fuente: (Construyendo Seguro, 2024b).

- **Construcción de dintel en concreto reforzado**

Esta medida de reducción busca mitigar la condición inadecuada de resistencia y ductilidad, reduciendo las deficiencias generadas por las aberturas sobredimensionadas en los muros de mampostería no reforzada.

Las aberturas en los muros de mampostería no reforzada, como ventanas y puertas, pueden incrementar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, debido a que reducen la rigidez estructural. Esto se debe a que las aberturas interrumpen la continuidad de los muros, disminuyendo la capacidad de resistir a fuerzas sísmicas. Esto puede llevar a una mayor deformación y daño en las áreas circundantes a las aberturas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002). Así mismo, estas aberturas generan puntos de concentración de esfuerzos donde se acumulan tensiones provocando grietas y fallas en el muro (Meza Fajardo et al., 2022).

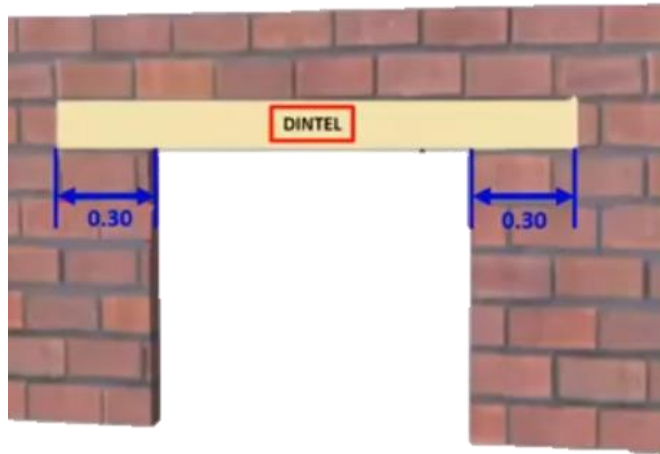
Es recomendable que las aberturas en los muros sean pequeñas, estén bien espaciadas y ubicadas lejos de las esquinas, mínimo 50 cm (Pontificia Universidad Javeriana, 2013). El área total de los vacíos no debe superar el 35% del área total del muro (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

Teniendo en cuenta las especificaciones de la guía “Evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería” de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400 (2023), se debe demoler localmente el muro y construir un dintel en concreto reforzado, extendido como mínimo 20 cm dentro de la mampostería, contemplando el reforzamiento en acero descrito en la medida de intervención de construcción de vigas de confinamiento.

Una viga dintel permite distribuir las cargas verticales de la parte superior del muro hacia los lados de la abertura, reduciendo la concentración de esfuerzos alrededor de la abertura

y disminuyendo el riesgo de grietas y fallas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002). En la Figura 4-10, se presenta el ejemplo de la construcción de una viga dintel sobre una abertura de un muro de mampostería no reforzada.

**Figura 4-10.** Ejemplo de ubicación de una viga dintel sobre una abertura de un muro.



Fuente: (Construyendo Seguro, 2024a).

- **Análisis de las mejoras estructurales en edificaciones de mampostería no reforzada implementando medidas de intervención convencionales**

La implementación de las medidas de intervención descritas permite transformar edificaciones de mampostería no reforzada en estructuras con comportamientos similares a las de mampostería confinada, lo que mejora significativamente su comportamiento ante solicitaciones sísmicas. Según las aceleraciones obtenidas en el modelo de amenaza sísmica, que oscilan entre 1,6 g y 1,7 g, y la curva de fragilidad empleada para edificaciones de mampostería confinada, la probabilidad de excedencia en el estado de daño completo se reduce a un 70%, lo que representa una disminución del 30% en las probabilidades de colapso total.

Estas medidas corrigen deficiencias críticas, como irregularidades en planta, muros con altura libre, y la ausencia de vigas de confinamiento, aumentando la resistencia de las edificaciones y su capacidad para disipar la energía generada por movimientos sísmicos. Con esto, no solo se minimiza el riesgo de daños materiales y colapsos, sino que también se protege la vida de sus ocupantes, promoviendo entornos más seguros.

Además, estas intervenciones extienden la vida útil de las edificaciones y reducen los costos asociados a reparaciones mayores o reconstrucciones tras la ocurrencia de un evento sísmico. Para ampliar el detalle constructivo de estas intervenciones, se recomienda consultar el anexo técnico del Decreto 1401 de 2023 (Asociación Colombiana

de Ingeniería Sísmica & Comité AIS 400, 2023), el cual proporciona directrices específicas para la implementación de estas medidas convencionales.

En conjunto, estas acciones garantizan estructuras más resistentes, contribuyen a la resiliencia de las comunidades y fomentan el desarrollo sostenible. Estas medidas permiten mejorar la seguridad estructural de las edificaciones y contribuyen a la preservación de los bienes y la protección de la vida, siendo una inversión clave para fortalecer la infraestructura y reducir la vulnerabilidad frente a la ocurrencia de eventos sísmicos que deriven en desastres.

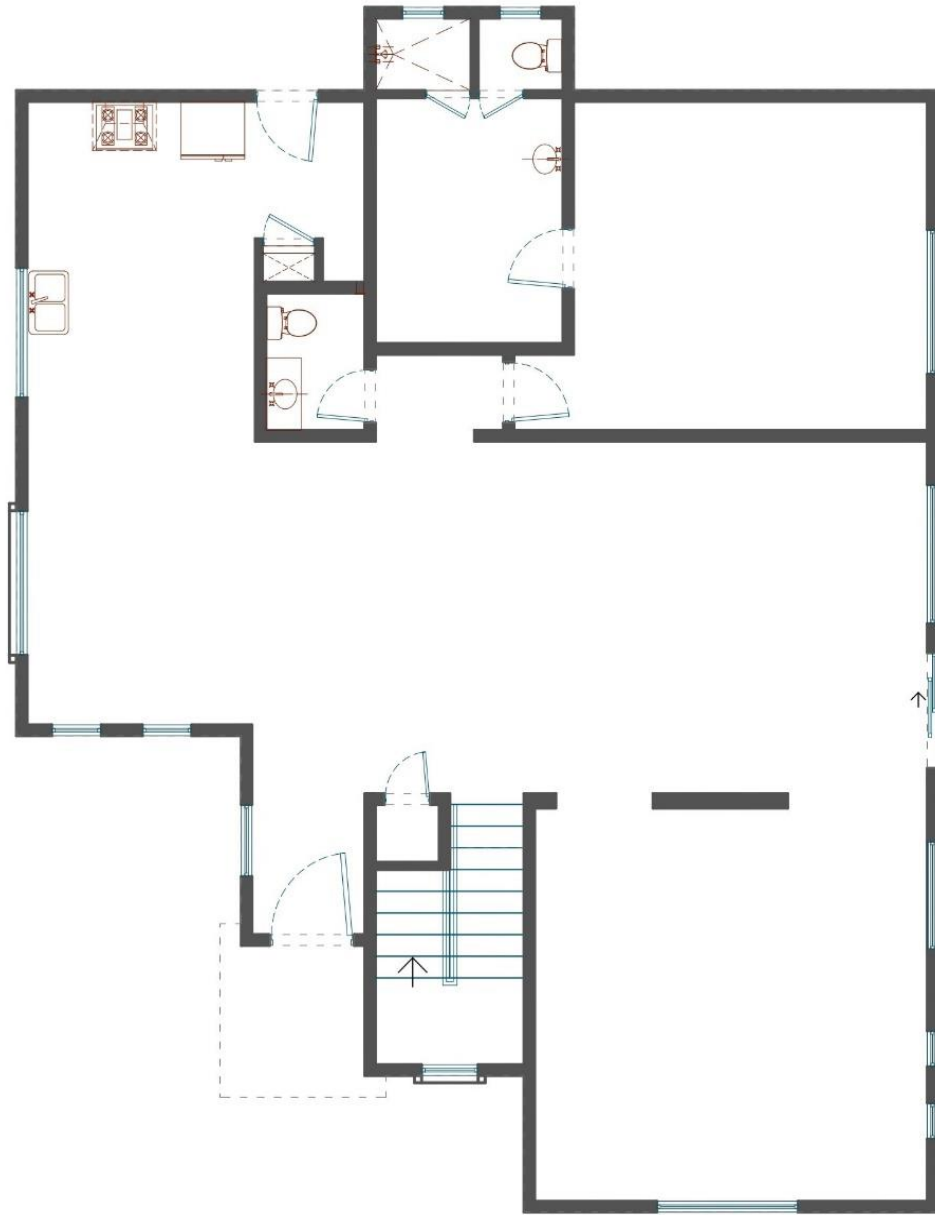
#### **4.1.2 Alternativas no convencionales de intervención estructural**

Las medidas de intervención no convencionales para mitigar el riesgo sísmico incluyen técnicas y tecnologías innovadoras que van más allá de los métodos tradicionales de construcción y reforzamiento. Aunque estas técnicas aún no están integradas en la normativa sismorresistente en Colombia, su aplicación ha demostrado ser eficaz en la reducción del riesgo sísmico (Hernández Carvajal, 2022; Neuta-Neuta, 2024; Salvatierra Vega, 2019).

Entre estas alternativas, se destaca el uso de materiales compuestos, como polímeros y morteros reforzados con fibra, que han demostrado su efectividad para mejorar la resistencia sísmica de las edificaciones (Neuta-Neuta, 2024; X. Zhao et al., 2022). Estos materiales, además de ser ligeros y flexibles, pueden aplicarse en estructuras existentes sin añadir peso significativo (Laverde et al., 2022; Ranjan et al., 2023). Así mismo, se ha implementado el uso de elementos estructurales prefabricados, como columnas y vigas, construidos mediante impresión en 3D con concreto (Kloft et al., 2020).

Para definir las alternativas de intervención no convencionales, se considera el modelo de exposición, que proporciona información detallada para identificar las deficiencias de las edificaciones para consolidar las necesidades de intervención. Como caso de estudio, se toma una planta arquitectónica típica de una vivienda de mampostería no reforzada del Distrito de Medellín, si bien no corresponde a una vivienda de la zona de estudio, se ajusta a las costumbres de construcción de mampostería no reforzada en el Corregimiento de San Cristóbal. En la Figura 4-11 se observa la planta típica a la que se hace referencia.

**Figura 4-11.** Planta típica de una vivienda de mampostería no reforzada localizada en la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Para la intervención de esta vivienda a través de alternativas no convencionales, se plantea el reforzamiento de esquinas con bambú, reforzamiento de muros con bandas de polipropileno y el uso de mortero lanzado con fibra vegetal en los muros.

En primer lugar, el uso de bambú en el reforzamiento de edificaciones mejora la resistencia de los elementos estructurales y su desempeño frente a cargas sísmicas. Los análisis estático y dinámico modal espectral indican que las edificaciones reforzadas con bambú resisten mayores cargas y presentan derivas máximas menores en comparación con

aquellas reforzadas con barras de acero, con una reducción de hasta el 10%, debido a su menor peso (Salvatierra Vega, 2019).

Por otra parte, los muros reforzados con bandas de polipropileno mostraron mejoras significativas en ensayos de tensión diagonal con respecto a los muros no reforzados, convirtiéndose en una alternativa viable para aumentar la resistencia sísmica de las edificaciones de mampostería no reforzada (Sathiparan, 2020). Este método de refuerzo ayuda a mejorar la respuesta del muro ante fallas súbitas, retrasando el tiempo de la falla y posible colapso y proporcionando mayor tiempo de evacuación de las personas y salvaguardando su integridad. Además, las bandas de polipropileno son accesibles, ampliamente disponibles en el mercado y presentan un costo económico bajo en relación con los materiales tradicionales de refuerzo (Banerjee et al., 2019). Su aplicación es sencilla y no requiere mano de obra calificada. Las bandas de polipropileno también pueden ser fabricadas con materiales reciclados, lo que las convierte en una opción sostenible (Hernández Carvajal, 2022).

En el caso de los muros reforzados con mortero y fibra vegetal, se encontró que la fibra de algodón es adecuada para este tipo de intervención. Los ensayos realizados evidenciaron una mejora en la capacidad de tracción diagonal, con respecto a los muros de mampostería no reforzada, con incrementos entre el 100% y 150%, permitiendo mayor absorción de energía, mayores deformaciones y una distribución más uniforme de los esfuerzos que actúan en la superficie, mitigando la rotura frágil (Neuta-Neuta, 2024).

El uso de materiales naturales, como el algodón, representa una opción efectiva para reducir la vulnerabilidad de las estructuras de mampostería no reforzada, aplicándose tanto en elementos estructurales como no estructurales (Neuta-Neuta, 2024). Al facilitar mayores deformaciones en el rango inelástico antes de la falla, estos refuerzos aumentan la ductilidad del material, lo que resulta fundamental en el diseño sismo-resistente. Este comportamiento mejora la capacidad de las estructuras para absorber y disipar energía durante un evento sísmico, reduciendo el riesgo de un colapso súbito.

Basándose la planta típica mostrada en la Figura 4-11, se seleccionan puntos estratégicos para la intervención, considerando la implementación de medidas estructurales no convencionales en los muros estructurales y en las esquinas formadas en los ejes principales de la estructura. La Figura 4-12 muestra, dentro de la planta arquitectónica típica de una vivienda de mampostería no reforzada en la zona de estudio, los muros y esquinas donde se plantea la ejecución de intervenciones propuestas.

**Figura 4-12.** Localización de medidas de intervención no convencionales en esquinas y muros de una planta típica.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las medidas estructurales para la reducción del riesgo sísmico que proponen el uso de técnicas y materiales no convencionales.

- **Reforzamiento de esquinas con bambú y revoque**

Esta medida de reducción busca mitigar la condición inadecuada de transferencia de cargas, reduciendo las deficiencias generadas por la inadecuada conexión de los muros en las esquinas.

La inadecuada conexión entre las esquinas de las edificaciones de mampostería no reforzada puede impedir la transferencia de cargas laterales, resultando en una distribución desigual de tensiones y permitiendo la falla por fuera del plano de los muros conectados, de igual manera, es posible que se generen separaciones de los muros generando grietas verticales a lo largo de la conexión (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

La falta de una conexión efectiva en las esquinas reduce la rigidez de la estructura, permitiendo que los muros se deformen excesivamente frente a cargas laterales fuera del plano, esta carencia de rigidez implica que, tras un evento sísmico, la estructura tenga menos capacidad de recuperar su forma original. Además, la inadecuada conexión de esquinas permite que los muros se comporten de manera independiente, aumentando la inestabilidad global de la edificación (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

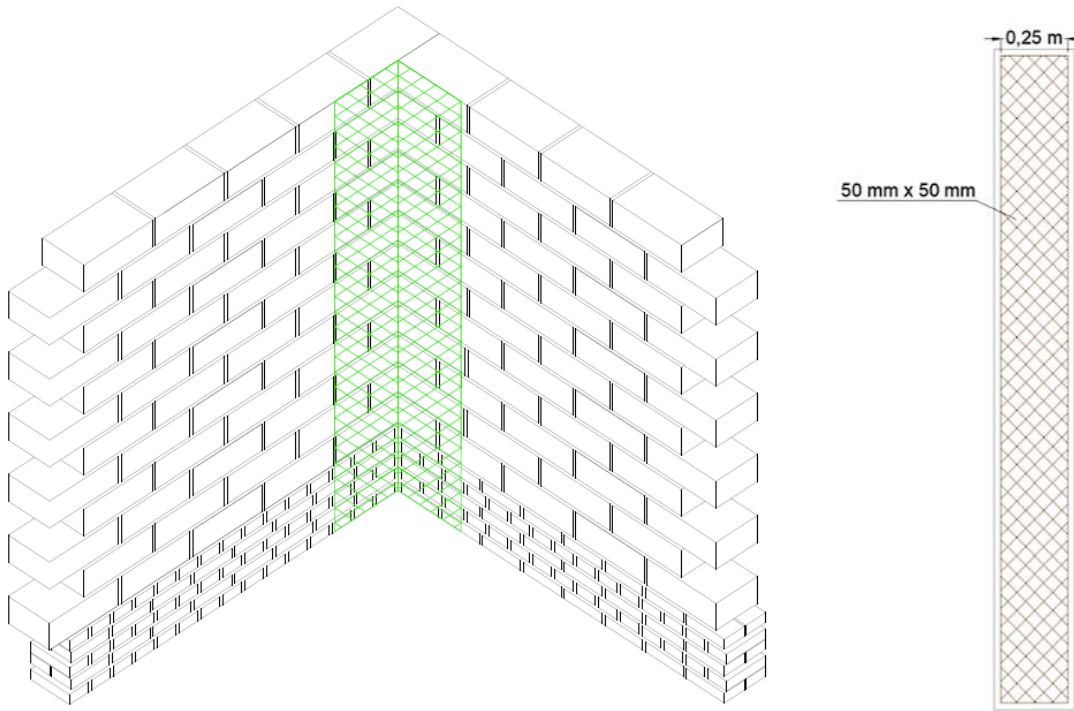
Para construir una conexión de bambú en las esquinas, se propone fabricar una malla compuesta por tiras de bambú, utilizando las secciones de menor diámetro, conocidas como varillones. Estos deben cortarse cuando el bambú tiene entre 4 y 6 años, edad en la que alcanza la madurez adecuada para el uso en construcción (Stamm et al., n.d.).

Las tiras de bambú son segmentos longitudinales obtenidos de las cañas mediante cortes paralelos a las fibras. Actualmente, existen diversas formas para obtener estas tiras, que van desde el uso de herramientas manuales como el machete, hasta maquinaria industrial específica para el corte de bambú. Una vez cortadas las tiras debe retirarse el nudo del lado interno (Hidalgo López, 1981). Con estas tiras de 14 a 16 mm de ancho y un grosor de 3 a 5 mm, se construye una malla como pieza única para la unión entre las esquinas de los muros, formando un ángulo entre las tiras de 115°, dejando un espacio de 50 mm entre tiras y fijándolas al muro con clavos de 1 ½", en una dimensión de 50 cm en cada muro (Pérez Huaman & Saona Rojas, 2023; Á. San Bartolomé & Quiun, 2015). Luego de instalar la malla, se debe recubrir con mortero para su protección. Es fundamental usar bambú en su etapa de maduración óptima y con el tratamiento químico adecuado para garantizar su durabilidad (Stamm et al., n.d.).

La incorporación de una malla de bambú en las esquinas de muros de mampostería tiene un impacto positivo en el refuerzo, lo que se evidencia a través de los ensayos de flexión y compresión diagonal. En comparación con los muros de mampostería no reforzada, se registraron incrementos hasta de un 120% en los valores obtenidos (Ecos Vásquez & Villegas Espinoza, 2022).

En la Figura 4-13 se presenta el ejemplo de conexión de muros de mampostería en las esquinas utilizando una pieza única de malla formada por tiras de bambú.

**Figura 4-13.** Ejemplo de conexión de muros de mampostería en las esquinas utilizando una pieza única de malla formada por tiras de bambú.



Fuente: Elaboración propia.

### **Deficiencias generadas por la inadecuada resistencia a la tracción y cortante**

En cuanto a la deficiencia generada por la inadecuada resistencia a la tracción y cortante, se tiene que el comportamiento de la mampostería no reforzada ante esfuerzos de cortante se caracteriza por la respuesta frágil de las unidades de mampostería y la debilidad introducida por las juntas de mortero. De esta manera, los modos de fallo resultan a partir de la combinación de grietas de tensión diagonal cruzando las unidades y grietas a lo largo de las interfaces entre las unidades y el mortero (Bonett Díaz, 2003).

La resistencia a la tracción de la mampostería está controlada por la resistencia a la adherencia desarrollada en las interfaces mortero-unidad. Los tipos de fallo pueden ocurrir de acuerdo con la dirección de la carga de tracción y la magnitud relativa de la resistencia de adherencia y la resistencia a la tracción de las unidades de mampostería. Cuando los esfuerzos de tracción son paralelos a las juntas horizontales de mortero, se pueden presentar grietas completamente verticales que atraviesan las unidades de mampostería y grietas que no afectan a las unidades y solo se presentan a lo largo de las juntas de mortero (Bonett Díaz, 2003)

Estas características hacen que las edificaciones de mampostería no reforzada sean propensas a fallos estructurales bajo cargas dinámicas, como las generadas por eventos sísmicos, indicando la necesidad de implementar medidas de reforzamiento estructural para mejorar su desempeño y reducir los riesgos asociados (Bonett Díaz, 2003).

La inadecuada resistencia a tracción y cortante es un problema estructural que ocurre cuando un material o sistema constructivo no puede soportar adecuadamente las tensiones que tienden a estirarlo [tracción] o deslizar una parte sobre otra [cortante]. Esto compromete la estabilidad y seguridad de las estructuras, especialmente ante eventos extremos como sismos, fuertes vientos o cargas concentradas. Las principales consecuencias incluyen la aparición de fisuras y grietas, colapsos parciales o totales, deformaciones excesivas y una reducción significativa de la vida útil de la edificación. Este problema suele originarse por el uso de materiales de baja calidad, deficiencias en el diseño estructural, construcción sin refuerzos adecuados, sobrecargas imprevistas o el deterioro debido a la falta de mantenimiento y la exposición a factores externos como la humedad o la corrosión.

Para reducir las deficiencias generadas por la inadecuada resistencia a la tracción y cortante se plantea el reforzamiento de muros con bandas de polipropileno y con mortero lanzado reforzado con fibras vegetales.

- **Reforzamiento de muros de mampostería con bandas de polipropileno**

Esta medida de reducción busca mitigar la condición estructural inadecuada, reduciendo las deficiencias generadas por la inadecuada resistencia a tracción y cortante de los muros de mampostería no reforzada a través del reforzamiento estructural con bandas de polipropileno.

Las bandas de polipropileno están ampliamente disponibles debido a su utilización convencional como elemento de embalaje en la industria del transporte y carga, es un material de fácil transporte y para su instalación en muros de mampostería con objetivos de reforzamiento estructural no requiere mano de obra calificada (Hernández Carvajal, 2022).

Especificaciones de las bandas de polipropileno:

- Ancho: 1/2"
- Calibre: 0.7 mm

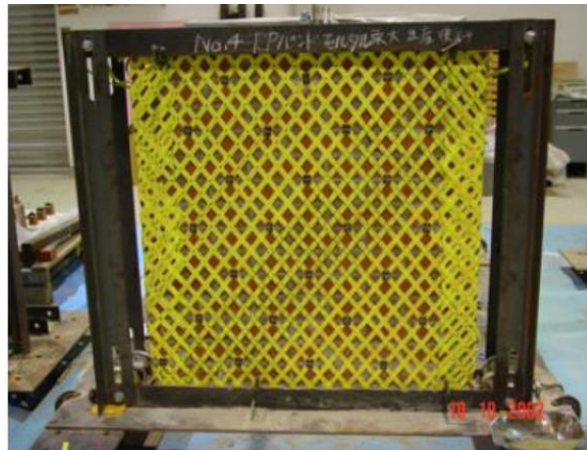
La configuración de la malla debe realizarse con una disposición de 45° respecto al mortero de pega de la mampostería, debido a que esta configuración presenta mayor eficacia pues restringen el tamaño de las grietas (Mayorca et al., 2006). Se recomienda el recubrimiento de todo el muro por ambas caras (Sathiparan, 2020). Para configurar la malla con bandas de polipropileno es posible utilizar un soldador de plástico en cada uno de los cruces ortogonales de las bandas verticales y horizontales (Sathiparan, 2020), o asegurar la malla por medio de grapa metálica o clip directamente en el muro (Banerjee et al., 2019).

Una vez instalada la malla de bandas de polipropileno se deben recubrir con mortero, para su protección de la radiación, la lluvia y afectaciones por terceros, así mismo, este recubrimiento mejora el anclaje de la malla a la mampostería (Mayorca et al., 2006; Sathiparan, 2020).

El reforzamiento con bandas de polipropileno puede generar incrementos en la resistencia sísmica de un muro de hasta el 70%, a la vez que aumenta el tiempo en que el muro colapsa, con respecto a los muros tradicionales de mampostería no reforzada. Las bandas de polipropileno resultan con menores impactos al medio ambiente que los métodos convencionales de reforzamiento como el uso de mallas electrosoldadas, esto debido a que el material utilizado puede tener origen reciclado, evitando la contaminación con micro plástico en el ambiente; además de ser más económicas por m<sup>2</sup> (Hernández Carvajal, 2022).

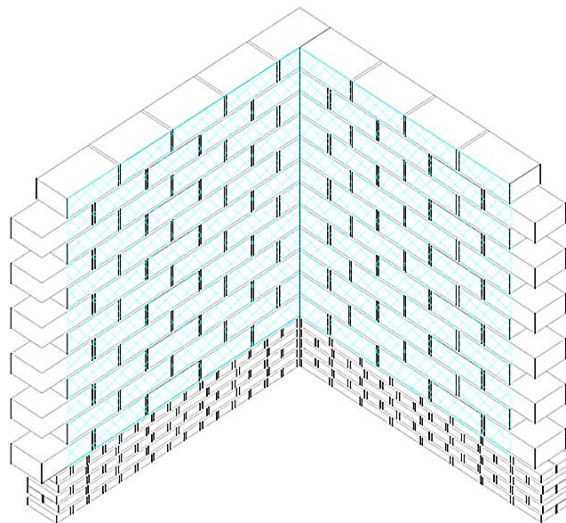
En la Figura 4-14 y Figura 4-15 se muestran los ejemplos de reforzamiento y colocación de mallas con bandas de polipropileno en muros de mampostería.

**Figura 4-14.** Ejemplo de reforzamiento de un muro de mampostería con mallas de bandas de polipropileno.



Fuente: (Mayorca et al., 2006).

**Figura 4-15.** Ejemplo de colocación de mallas de bandas de polipropileno para el reforzamiento de muros de mampostería.



Fuente: Elaboración propia.

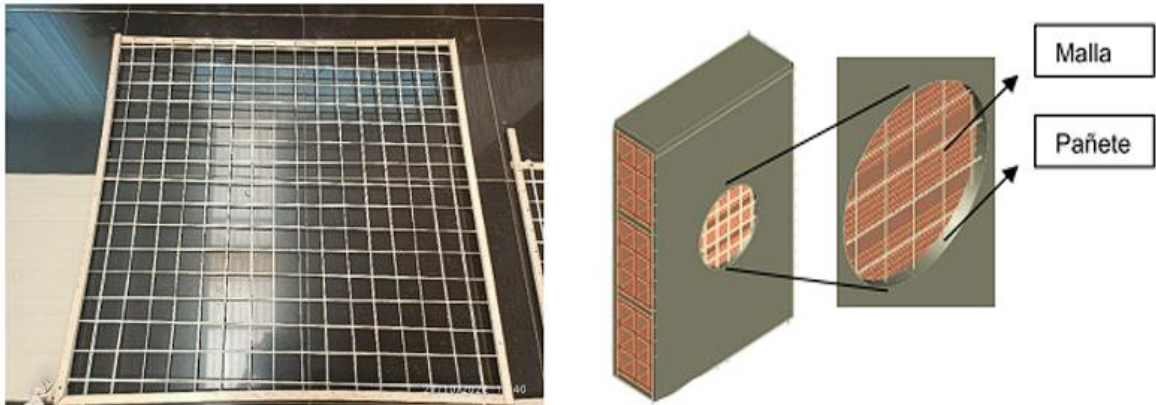
- **Reforzamiento de muros de mampostería con mortero y fibras vegetales**

Las fibras naturales pueden mejorar las propiedades mecánicas de una matriz cementosa (Neuta-Neuta, 2024). Las fibras de algodón, en particular, pueden ofrecer mayor resistencia a la tracción debido a su alto contenido de celulosa, alcanzando incrementos de hasta el 141%, con respecto a los muros de mampostería no reforzada. Además, este material es compatible con los muros de mampostería, presenta buena relación rigidez-peso, es poco abrasivo y tiene un costo menor en comparación con las fibras sintéticas (X. Zhao et al., 2022). Dentro de las ventajas de la fibra se resalta la resistencia a tracción, su buen comportamiento en condiciones húmedas y su buena adherencia con materiales cementantes (Martín Sendra, 2020). Un factor para considerar en la implementación de esta alternativa de intervención es la durabilidad de las fibras naturales, debido a su origen orgánico, pues la matriz cementosa favorece la degradación de las fibras dada la alcalinidad y humedad, por lo que se plantea el uso de recubrimientos con resinas o aditivos para mejorar la durabilidad de la fibra (Mercedes et al., 2020; Syiemiong & Marthong, 2021).

Se propone el uso de mallas de fibras de algodón con espaciamiento de 6 cm, esto teniendo en cuenta los prototipos ensayados con diferentes separaciones, alcanzando un mejor desempeño con el espaciamiento de 6 cm con respecto a los espaciamientos de 3, 4 y 5 cm (Neuta-Neuta, 2024). Las fibras de algodón deben estar conformadas por hilos de 0,5 mm de diámetro, agrupados en hilazas trenzadas de 36 hilos. El mortero debe prepararse con una relación 1:3 [cemento-arena] (Neuta-Neuta, 2024).

En la Figura 4-16 se muestra el detalle constructivo del reforzamiento de muros de mampostería con mortero y fibra de algodón.

**Figura 4-16.** Ejemplo de conformación de malla con hilazas de fibras de algodón.



Fuente: (Neuta-Neuta, 2024).

Si bien las medidas de intervención estructurales no convencionales descritas en este capítulo permiten una mejoría, en diferentes medidas, en el comportamiento estructural de las edificaciones de mampostería no reforzada, se recomienda el desarrollo de curvas de fragilidad que se ajusten a estos comportamientos con el fin de predecir las aceleraciones a las que se podrían alcanzar los diferentes estados de daño.

En general, las medidas de intervención estructurales no convencionales representan alternativas a las mallas electrosoldadas tradicionales. En este contexto, se compara el comportamiento de las edificaciones reforzadas con mallas electrosoldadas con el de las edificaciones de mampostería no reforzada. El uso de mallas electrosoldadas o de sistemas no convencionales, que utilizan materiales como el bambú, bandas de polipropileno y fibras de algodón, ha demostrado ser efectivo para reducir la probabilidad de colapso y garantizar niveles aceptables de daño. Estas soluciones mejoran hasta en un 40% el comportamiento general según las curvas de fragilidad. Para aceleraciones entre 1,6 g y 1,7 g, como las analizadas en este trabajo de investigación, en lugar de presentarse colapsos completos, se observarían daños moderados, lo que reduce significativamente los costos de reparación y el impacto en la salud de las personas al presentarse un evento sísmico de estas magnitudes (Quiroz & Maruyama, 2014).

## 4.2 Diseño de intervenciones no estructurales

Las medidas no estructurales se refieren aquellas acciones que no implican construcciones físicas, sino que se basan en el conocimiento, las prácticas y los acuerdos existentes para reducir el riesgo y sus impactos. Estas medidas suelen implementarse a través de políticas, leyes, campañas de concientización pública, capacitación y educación (UNISDR, 2009). En este sentido, las intervenciones no estructurales pueden incluir la prevención del surgimiento de desarrollos informales y autoconstrucciones, el diseño de mecanismos que permitan mejorar las prácticas de autoconstrucción, y la implementación de estrategias de capacitación, asesoramiento y sensibilización, orientadas a preparar normativa y técnicamente a las personas que desarrollan las obras (Neuta-Neuta, 2024).

La preparación para la respuesta comunitaria a emergencias constituye una medida no estructural clave para la reducción del riesgo sísmico, debido a que ayuda a mitigar los impactos derivados de la materialización del riesgo. Esta preparación es el conjunto de acciones orientadas principalmente a la coordinación de sistemas de alerta, la capacitación de las personas, el equipamiento para la respuesta, la organización de centros de reserva y albergues, así como el entrenamiento de los organismos de respuesta. Su objetivo es optimizar la ejecución de los diferentes servicios básicos de respuesta (Ley 1523, 2012).

Se ha propuesto planificar el uso del suelo de acuerdo con los escenarios de riesgo sísmico, actualizar los reglamentos de construcción y normas de diseño para fortalecer la seguridad estructural, implementar instrumentos financieros que faciliten acciones orientadas a la reducción del riesgo sísmico, y promover una cultura de transferencia de dicho riesgo mediante mecanismos de aseguramiento (CENAPRED México & CONACYT, 2018). Así mismo, el diseño de planes de emergencia y evacuación a nivel familiar y comunitario resulta fundamental para asignar los roles y responsabilidades ante la ocurrencia de una emergencia. Además, el desarrollo de programas de capacitación dirigidos a las comunidades vulnerables contribuye a fortalecer su capacidad de organización y respuesta ante la ocurrencia de un evento sísmico (CENAPRED México & CONACYT, 2018).

Por lo descrito anteriormente, se diseñó en este trabajo de investigación una guía para la construcción de un plan familiar de respuesta a emergencias causadas por eventos sísmicos y un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico.

### **4.2.1 Guía para la construcción de un plan familiar de respuesta a emergencias causadas por eventos sísmicos**

Un plan familiar de respuesta a eventos sísmicos es el conjunto de actividades que los miembros de un grupo familiar deben realizar para estar preparados y responder de manera planificada y organizada ante un evento sísmico que genere afectaciones en su vivienda (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2013). Para la elaboración de este instrumento se requiere la participación de manera coordinada de las personas que viven en el hogar, permitiendo conocer el rol que deben cumplir y las responsabilidades asumidas en su preparación y su respuesta a emergencias tras la ocurrencia de un evento sísmico (Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021).

Para elaborar un plan familiar de emergencias, es fundamental comenzar identificando a los integrantes del grupo familiar, recopilando información como nombres, género, edades, enfermedades crónicas o cuidados específicos, medicamentos, contraindicaciones médicas, grupo sanguíneo y números de contacto, entre otros datos relevantes (Universidad Libre, n.d.).

Es fundamental identificar las posibles amenazas, como elementos no estructurales que puedan desprenderse y causar daños, así como las vulnerabilidades estructurales que puedan comprometer la seguridad de la vivienda durante un evento sísmico. También es importante evaluar la condición general de la vivienda, considerando el estado de las instalaciones eléctricas, hidrosanitarias y de gas natural (Universidad Libre, n.d.). Para realizar esta evaluación, se sugiere elaborar un plano de la vivienda y señalar las áreas que representen riesgos, como escaleras, ventanas, conexiones de gas, estufas y otros posibles puntos de peligro, como fuentes de incendios (Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021).

Para elaborar un análisis de vulnerabilidad sísmica en una vivienda es importante tener en cuenta los principios de sismorresistencia de la estructura, tales como la forma regular, el bajo peso, la mayor rigidez, la buena estabilidad, el suelo firme y la buena cimentación, la estructura apropiada, los materiales competentes, la calidad de la construcción, la capacidad de disipar energía y la fijación de acabados e instalaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002).

Una vez detectadas las condiciones de riesgo, se implementan acciones para prevenirlos y mitigarlos, como retirar elementos colocados en superficies altas, asegurar todos los muebles y reforzar la estructura (Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021). También se deben definir zonas seguras, áreas de protección y rutas de evacuación que conduzcan a un punto de encuentro seguro (Universidad Libre, n.d.), este lugar debe estar despejado, lejos de árboles, postes o elementos que puedan caer (Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021).

Para prepararse para la respuesta ante un evento sísmico de importancia, se deben asignar tareas específicas a cada miembro del grupo familiar, asegurando que cada actividad tenga un responsable. Así mismo, se debe crear un directorio de contactos de emergencia que incluya números de familiares, amigos y servicios de asistencia (Universidad Libre, n.d.).

Otro paso esencial es la preparación de un kit de emergencia, diseñado para cubrir las necesidades del grupo familiar, incluidas las mascotas, durante al menos 72 horas (Universidad Libre, n.d.). Este kit de emergencias debe contener un botiquín con vendajes y compresas, medicamentos para cortaduras y lesiones, medicamentos especiales para los miembros del grupo familiar, guantes de látex, entre otros (Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021). Así mismo, debe contener elementos como radio con baterías de uso inmediato y de repuesto, vestuario, silbato y linterna, elementos de higiene personal, elementos para el consumo de alimentos, agua, bolsas, entre otros. Para las mascotas es necesario incluir elementos de identificación, alimentos, juguetes, correas y guacales, entre otros (Fundación Universitaria Los Libertadores, 2021).

Finalmente, es recomendable realizar ejercicios periódicos de simulación y simulacros para poner a prueba el plan familiar de emergencia y garantizar su efectividad en caso de un evento real (Universidad Libre, n.d.). En la Figura 4-17 se presenta una secuencia del proceso para la construcción de un plan familiar de emergencias ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

**Figura 4-17.** Proceso para la construcción de un plan familiar de emergencias ante la ocurrencia de un evento sísmico.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos indicados en el proceso para la construcción de un plan familiar de emergencias ante la ocurrencia de un evento sísmico.

▪ **Identificación del grupo familiar**

Un grupo familiar puede ser definido como un sistema social abierto, compuesto por un número variable de integrantes, que comparten un mismo espacio de convivencia y están unidos por lazos consanguíneos, legales o de afinidad (Asociación Latinoamericana de Profesores de Medicina Familiar A.C., 2005). La caracterización del grupo familiar se realiza mediante un listado que incluye a todas las personas que lo conforman, detallando aspectos como número de identificación, género, edad, número de contacto, enfermedades, medicamentos, contraindicaciones médicas, necesidades particulares, cuidados especiales, entre otros (Oficina Nacional de Emergencia, 2015). En la Tabla 4-2 se presenta la información necesaria para la caracterización de las personas que integran el grupo familiar.

**Tabla 4-2.** Caracterización de las personas que integran el grupo familiar.

Nombre	Número de identificación	Género	Edad	Número de contacto	Medicamentos, necesidades, cuidados y apoyos	Contraindicaciones médicas	Otras observaciones

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, es fundamental incorporar a las mascotas dentro de la caracterización del grupo familiar, considerando que son animales de compañía bajo el cuidado humano, vinculados a un hogar, donde comparten intimidad y cercanía con sus cuidadores y reciben atención, cuidados y afecto que aseguran su bienestar (Savishinsky, 1985). La información relevante para su caracterización incluye nombre, especie, raza, sexo, color, edad, esquema de vacunación, enfermedades, medicamentos, necesidades especiales, temperamento, entre otras (Grupo de Prevención y Acción Integral, 2020). La Tabla 4-3 recopila la información necesaria para la caracterización de las mascotas que forman parte del grupo familiar, la cual debe completarse individualmente para cada animal de compañía.

**Tabla 4-3.** Caracterización de las mascotas que integran el grupo familiar.

<b>Nombre</b>
<b>Especie</b>
<b>Raza</b>
<b>Sexo</b>
<b>Color</b>
<b>Edad</b>
<b>Esquema de vacunación</b>
<b>Medicamentos, necesidades, cuidados y apoyos</b>
<b>Contraindicaciones médicas</b>
<b>Temperamento</b>
<b>Chip de localización</b>
<b>Otras observaciones</b>

Fuente: Elaboración propia.

- **Identificación del riesgo**

Una vez identificados debidamente los integrantes del grupo familiar y sus datos relevantes se hace necesario realizar una inspección del entorno de la vivienda, identificando factores de riesgo, como la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición, que puedan afectarla desde el exterior, y de la misma manera inspeccionar el interior de la vivienda con el fin de identificar posibles elementos que representen amenazas en caso de un evento sísmico.

Para la identificación de la amenaza sísmica, se plantea la incorporación de las aceleraciones obtenidas en este trabajo de investigación, para el escenario planteado en

el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016). Este análisis indica que las áreas ubicadas hacia el occidente de la zona de estudio podrían experimentar aceleraciones levemente más elevadas.

Para las amenazas al interior de la vivienda se plantea tener en cuenta elementos no estructurales que puedan caer y causar daño a las personas o impedir su evacuación oportuna, así como el estado de las redes de acueducto, alcantarillado, energía eléctrica y gas natural. En la Tabla 4-4 se presentan elementos para la caracterización de las amenazas al interior de la vivienda.

**Tabla 4-4.** Caracterización de las amenazas al interior de la vivienda.

<b>Amenazas al interior de la vivienda</b>	<b>Si</b>	<b>No</b>
¿Pueden caer elementos de la estructura de cubierta? [cielos rasos, tejas o soportes]		
¿Existen obstáculos en los pasillos que dan a la salida?		
¿Existen lámparas que puedan caer?		
¿Las escaleras cuentan con pasamanos?		
¿Las ventanas cuentan con películas de seguridad?		
¿Se ha realizado inspección del sistema eléctrico?		
¿Se ha realizado inspección del sistema de gas natural?		
¿Se ha realizado inspección de las redes hidrosanitarias?		
¿Los armarios y estantes están asegurados y no cuentan con objetos pesados?		
¿Almacena material combustible como madera, papel, combustible líquido, entre otros, en áreas donde se puedan producir incendios?		
¿Las puertas se encuentran en buen estado?		

Fuente: Adaptado de Universidad Libre (n.d.).

Para la evaluación de la vulnerabilidad física de la vivienda, se plantea la implementación de una metodología simplificada de evaluación, basada en el enfoque de Gómez Zuluaga et al. (2017). Esta considera aspectos como la irregularidad en planta, la cantidad de muros en dos direcciones, la irregularidad en altura, la calidad de las juntas de pega en mortero, el tipo y disposición de los ladrillos, la calidad de los materiales, las características de las aberturas de los muros, el tipo y disposición de entrepiso, el amarre de cubierta, el material y estructura de cubierta, la antigüedad de la vivienda, las reformas realizadas, la presencia de viga de fundación en concreto reforzado, la topografía y las características locales del suelo. Para la evaluación de la vulnerabilidad se propone el diligenciamiento de la Tabla 4-5.

**Tabla 4-5.** Información de vulnerabilidad física de la vivienda.

<b>Fecha:</b>		<b>Observaciones:</b>		
<b>Comuna:</b>				
<b>Barrio:</b>				
<b>Dirección:</b>				
<b>Evaluación de vulnerabilidad</b>				
<b>Aspecto</b>	<b>Calificación</b>			
	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	
<b>Aspectos geométricos</b>				
Irregularidad en planta de la edificación				
Cantidad de muros en dos direcciones				
Irregularidad en altura				
<b>Aspectos constructivos</b>				
Calidad de las juntas de pega de mortero				
Tipo y disposición de unidades de mampostería				
Calidad de los materiales				
<b>Aspectos estructurales</b>				
Características de las aberturas				
Entrepiso				
Amarre de cubiertas				
<b>Otros aspectos</b>				
Material y estructura de la cubierta				
Edad de la estructura				
Reformas				
<b>Cimentación</b>				
<b>Entorno (Topografía)</b>				
<b>Suelos</b>				

Fuente: Adaptado de Gómez Zuluaga et al (2017).

Para evaluar los aspectos de la vulnerabilidad física mostrados en la Tabla 4-5, es necesario considerar las características específicas de cada uno, las cuales se detallan en el **Anexo B**. Este anexo presenta las descripciones de las calificaciones de vulnerabilidad asociadas a cada aspecto. Así mismo, la calificación de la vulnerabilidad física global de la vivienda se basa en los pesos ponderados determinados por Gómez Zuluaga et al. (2017), mediante el proceso de análisis jerárquico y la consulta a expertos.

De igual manera, se hace relevante la evaluación de la vulnerabilidad familiar frente al riesgo de la ocurrencia de un evento sísmico, considerando aspectos como el nivel de conocimiento de los factores de riesgo, la disponibilidad de recursos y elementos para la atención de emergencias, la asignación de roles y responsabilidades a los integrantes de la familia, el conocimiento de rutas de evacuación y puntos de encuentro, así como de los números de emergencia y entidades de apoyo externo. Para la evaluación de la vulnerabilidad familiar se propone el diligenciamiento de la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6.** Información sobre la vulnerabilidad familiar.

<b>Test de Vulnerabilidad Familiar</b>	<b>Si</b>	<b>No</b>
Conocimiento sobre las amenazas existentes alrededor de la vivienda y dentro de ella		
Disponibilidad de elementos para atender emergencias tales como botiquín, extintor, kit de emergencias y conocimiento sobre su uso		
En la familia hay personas capacitadas en primeros auxilios		
Se tienen asignados roles y responsabilidades para acciones durante la ocurrencia de emergencias, como la protección de adultos mayores, menores de edad o un familiar con necesidades especiales		
Conocimiento de la ubicación de los registros de agua, gas e interruptores de energía		
Conocimiento de rutas de evacuación y puntos de encuentro		
Conocimiento de números de emergencia y contactos de apoyo externo		

Fuente: Adaptado de Grupo de Prevención y Acción Integral (2020)

Para la exposición, la evaluación del entorno es fundamental, debido a que los eventos sísmicos pueden generar efectos concatenados como los movimientos en masa. Por ello, es importante determinar la exposición de la vivienda ante este tipo de fenómenos, analizando su ubicación en relación con áreas de posible remoción (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2011). Este análisis permite identificar tres zonas de afectación descritas a continuación:

- *Zona de influencia directa:* área en la que tiene lugar el movimiento en masa [en el cuerpo del deslizamiento], en esta zona las edificaciones sufren daños relacionados con desplazamientos laterales, que a su vez dependen de la velocidad del movimiento.
- *Zona de influencia indirecta:* área que puede ser invadida por la masa deslizada o la parte alta que puede ser desconfinada. En esta zona, para el primer caso las edificaciones pueden sufrir daños relacionados con empujes laterales asociados a la altura que alcanza el material contra la estructura; y para el segundo caso los daños en las edificaciones están asociados con grietas o asentamientos.
- *Fuera de la zona de influencia:* área en donde no se espera ningún tipo de afectación asociada a movimientos en masa.

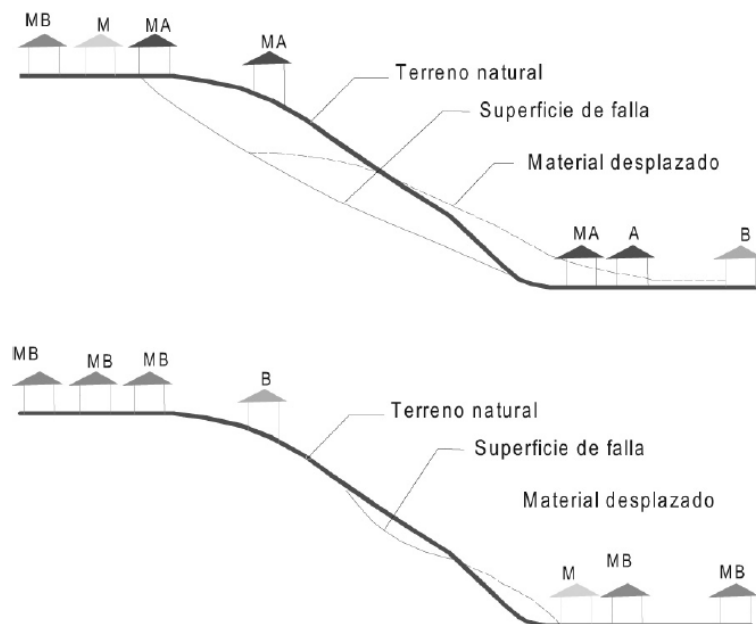
Teniendo en cuenta las zonas de influencia de la ocurrencia de movimientos en masa es posible definir para la vivienda un grado de exposición ante este fenómeno, como se describe en la Tabla 4-7 y Figura 4-18.

**Tabla 4-7.** Clasificación del grado de exposición de una vivienda frente al fenómeno de movimiento en masa.

Grado de exposición	Clasificación
Dentro de la zona de influencia directa	MA: Muy alta
Parcialmente en la zona de influencia directa	A: Alta
Totalmente dentro del área de influencia indirecta	M: Media
Parcialmente en la zona de influencia indirecta	B: Baja
Fuera de la zona de influencia directa e indirecta	MB: Muy baja

Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2011).

**Figura 4-18.** Zonas de exposición de las edificaciones frente a fenómenos de movimiento en masa.



Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2011).

Así mismo, para la evaluación del entorno se debe considerar las posibles fuentes de riesgos cercanas a la vivienda, como empresas que utilicen sustancias peligrosas, estaciones de abastecimiento de combustible, árboles de gran tamaño y postes de energía que puedan colapsar y causar daños. También es fundamental considerar la proximidad a cuerpos de agua que puedan originar inundaciones y avenidas torrenciales, entre otros. Este análisis integral permite anticipar y mitigar los riesgos que podrían intensificarse tras la ocurrencia de un evento sísmico (Grupo de Prevención y Acción Integral, 2020).

#### ▪ Reducción del riesgo

La reducción del riesgo está compuesta por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos

ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse un evento físico peligroso (Ley 1523, 2012).

Con base en el análisis de vulnerabilidad realizado y la identificación de los aspectos a mejorar para incrementar la resiliencia frente a eventos sísmicos, el grupo familiar debe implementar medidas de reducción del riesgo que puedan llevar a cabo de manera anticipada. Entre estas medidas, se sugieren los ejemplos presentados en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8.** Acciones familiares para la reducción del riesgo ante la ocurrencia de un evento sísmico.

Aspecto a mejorar	Medida de reducción del riesgo
Vulnerabilidad física de la vivienda	Reforzamiento estructural empleando las medidas de intervención estructurales convencionales y no convencionales planteadas en este trabajo de grado, contando con la asesoría de una persona idónea.
Falta de amarre de elementos no estructurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Realizar el ajuste de elementos que puedan caer y causar daño, como lámparas, estanterías y armarios.</li> <li>▪ Ubicar objetos pesados a nivel de piso.</li> <li>▪ Instalar películas de seguridad en ventanas.</li> </ul>
Ruta de evacuación obstaculizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Despejar los pasillos que conducen a la salida de la vivienda que puedan estar obstaculizados con objetos.</li> <li>▪ Realizar mantenimiento a puertas.</li> </ul>
Ruta de evacuación insegura.	Instalar pasamanos y cintas antideslizantes en las escaleras.
Irregularidades en el sistema eléctrico	Realizar inspección y mantenimiento del sistema eléctrico.
Riesgo de incendio estructural	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Almacenar los elementos combustibles lejos de fuentes de calor, chispa o llama.</li> <li>▪ Tener disponible un extintor multipropósito.</li> <li>▪ Capacitación del uso adecuado del extintor.</li> </ul>
Irregularidades en sistema de gas natural	Realizar inspección y mantenimiento al sistema de gas natural.
Irregularidades en las redes hidrosanitarias	Realizar inspección y mantenimiento a las redes hidrosanitarias.
Reservas insuficientes	Mantener reservas de agua potable para consumo o aseo, y rotarlas periódicamente con el fin de prevenir acumulación de microorganismos patógenos.
Árboles en riesgo	Solicitar inspección y mantenimiento fitosanitario a la autoridad ambiental de la jurisdicción o entidad territorial competente.
Riesgo eléctrico en el entorno	Solicitar inspección y mantenimiento a la red eléctrica externa a la empresa de servicio de energía.
Falta de contactos de emergencia	Elaborar un listado con los organismos de respuesta que puedan apoyar en caso de la ocurrencia de un evento sísmico
Falta de kit de emergencias	Disponer, revisar y actualizar trimestralmente el Kit de emergencias.
Falta de capacitación en primeros auxilios	Capacitar a las personas que conforman el grupo familiar en primeros auxilios.

Fuente: Adaptado de (Grupo de Prevención y Acción Integral, 2020; Universidad Libre, n.d.).

### ▪ Preparación para la respuesta

La preparación es el conjunto de acciones de coordinación, sistemas de alerta, capacitación y entrenamiento, equipamiento, centros de reserva y alberges, con el propósito de optimizar la ejecución de los diferentes servicios básicos de respuesta (Ley 1523, 2012). En el marco de un plan familiar de emergencias ante eventos sísmicos, la preparación incluye medidas orientadas a fortalecer la capacidad de respuesta del grupo familiar durante y después de un sismo.

Una de las principales acciones de preparación consiste en la identificación de zonas seguras, lugares de protección, vías de evacuación y puntos de encuentro. Es fundamental identificar los sitios de menor riesgo tanto dentro como fuera de la vivienda. En el interior, se recomiendan áreas cerca de vigas, columnas, pasillos estructurales o muebles resistentes. En el exterior, los espacios abiertos como patios, antejardines, parques o plazas son ideales, siempre que estén libres de elementos que puedan caer, incendiarse o explotar. Así mismo, deben establecerse rutas de evacuación que incluyan pasillos, puertas principales y escaleras seguras que conecten rápidamente con el exterior. El punto de encuentro, por su parte, debe ser un lugar previamente acordado, ubicado en una zona libre de riesgos, como movimientos en masa, tránsito vehicular, puentes o sótanos, para garantizar la seguridad de todos los integrantes del grupo familiar (Universidad Libre, n.d.).

Otra acción fundamental es la asignación de roles y responsabilidades dentro del grupo familiar. Se debe identificar una lista de tareas necesarias para ejecutar tras un evento sísmico, como trasladar a las mascotas, cerrar las llaves de paso de agua, gas y energía eléctrica, verificar que todos los integrantes estén presentes en el punto de encuentro, ayudar al desplazamiento de personas que requieran asistencia, transportar el kit de emergencia, solicitar ayuda externa y contactar servicios de emergencia (Universidad Libre, n.d.). La designación de un responsable para cada tarea mejora la coordinación y evita confusiones en situaciones de estrés.

En ese sentido, es esencial establecer y mantener actualizado un directorio de contactos de emergencia. Este listado debe incluir números de familiares, amigos, vecinos y servicios de emergencia, como bomberos, policía y organismos de respuesta (Universidad Libre, n.d.), como se observa en la Tabla 4-9 y Tabla 4-10. Este directorio debe estar accesible para todos los miembros del grupo familiar y ser revisado periódicamente para garantizar su vigencia.

**Tabla 4-9.** Contactos de familiares y amigos de apoyo.

Nombre	Teléfono

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4-10.** Contactos de organismos de respuesta.

Entidad	Teléfono
Número Único de Seguridad y Emergencias	123
Estación de Bomberos	
Cuadrante de Policía	
Policía Nacional	112
EPM Emergencias Gas	604 444 41 15 / Directo 164
EPM Emergencias Energía, Acueducto y Alcantarillado	604 444 41 41

Fuente: Elaboración propia.

La preparación del kit de emergencia es otra medida importante en la preparación. Este maletín debe ubicarse en un lugar de fácil acceso y contener los suministros básicos necesarios para la supervivencia durante al menos 72 horas por fuera de la vivienda (Grupo de Prevención y Acción Integral, 2020; Universidad Libre, n.d.). Es importante que el contenido del kit se revise periódicamente para reemplazar los elementos vencidos o deteriorados, y que se adapte a las necesidades específicas del grupo familiar, incluyendo las mascotas. En la Tabla 4-11 se presenta un listado de elementos que puede contener un kit de emergencias.

**Tabla 4-11.** Contenido propuesto del kit de emergencias.

Grupo de elementos	Listado propuesto
<b>Elementos básicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Copia de documentos de identificación.</li> <li>▪ Copia de carnet de vacunas.</li> <li>▪ Copia de documentos de la vivienda (escrituras).</li> <li>▪ Fotos recientes de los miembros del grupo familiar.</li> <li>▪ Radio portátil con baterías.</li> <li>▪ Agua potable envasada.</li> <li>▪ Alimentos no perecederos.</li> <li>▪ Bolsas plásticas.</li> <li>▪ Lápiz y papel.</li> <li>▪ Prendas de vestir, incluyendo ropa interior.</li> <li>▪ Linterna con baterías.</li> <li>▪ Dinero.</li> <li>▪ Copia de llaves de la casa.</li> <li>▪ Encendedor o fósforos.</li> <li>▪ Jabón en barra o líquido.</li> <li>▪ Papel higiénico y pañuelos desechables.</li> <li>▪ Mantas, cobijas.</li> <li>▪ Navaja, abrelatas.</li> <li>▪ Pañales desechables.</li> <li>▪ Silbato.</li> <li>▪ Menaje.</li> <li>▪ Cargador de celular.</li> <li>▪ Batería de recarga portátil (banco de poder).</li> </ul>
<b>Elementos de primeros auxilios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medicamentos con formulación médica.</li> <li>▪ Termómetro.</li> <li>▪ Tijeras.</li> <li>▪ Bajalenguas.</li> <li>▪ Esparadrapo, microporo, algodón.</li> <li>▪ Guantes de látex, tapabocas, monogafas.</li> <li>▪ Apósitos, vendas.</li> <li>▪ Solución salina.</li> <li>▪ Gasas.</li> <li>▪ Sales de rehidratación oral.</li> <li>▪ Toallas húmedas.</li> <li>▪ Toallas higiénicas.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Grupo de prevención.

**Tabla 4-11.** Contenido propuesto del kit de emergencias (Continuación).

Grupo de elementos	Listado propuesto	
<b>Elementos para mascotas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medicamentos con formulación veterinaria.</li> <li>▪ Copia de carné de vacunas y desparasitación interna y externa.</li> <li>▪ Apósitos, vendas.</li> <li>▪ Solución salina.</li> <li>▪ Traílla.</li> <li>▪ Collar con identificación.</li> <li>▪ Concentrado y/o alimento no perecedero.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agua potable embotellada.</li> <li>▪ Guacal.</li> <li>▪ Manta, cobija.</li> <li>▪ Juguetes y premios.</li> <li>▪ Foto actualizada.</li> <li>▪ Información del microchip de identificación.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Grupo de Prevención y Acción Integral (2020).

Finalmente, una vez diseñado el plan familiar de emergencias ante la ocurrencia de eventos sísmicos, es esencial realizar simulaciones y simulacros de manera periódica. Estas actividades permiten identificar posibles mejoras, corregir fallos y garantizar que todos los integrantes del hogar comprendan sus roles y responsabilidades (Oficina Nacional de Emergencia, 2015). La preparación constante y participación de todos los integrantes del grupo familiar es importante para asegurar una respuesta eficiente y reducir los riesgos en caso de un evento sísmico.

En el **Anexo B** se incluyen los formularios necesarios para la correcta formulación del plan familiar de emergencias frente a la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos documentos están diseñados para guiar el proceso de planificación, facilitando la identificación de riesgos, la definición de roles, la organización de recursos y la estructuración de las acciones a seguir antes, durante y después de la ocurrencia de un sismo.

#### 4.2.2 Guía para la construcción de un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico

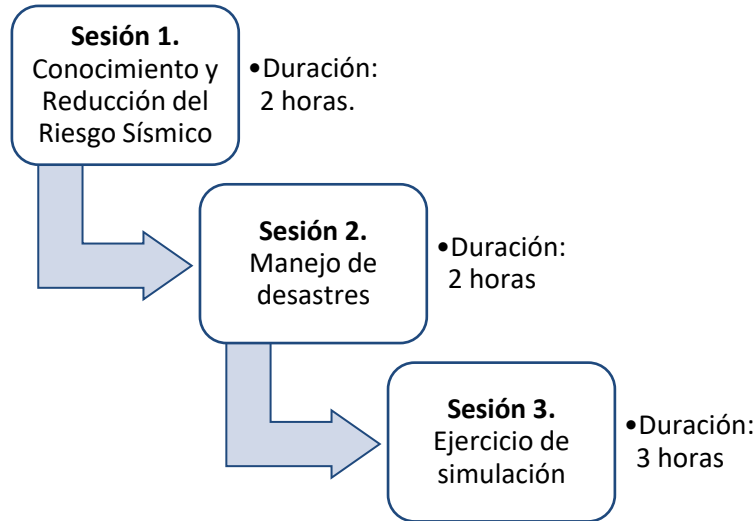
Los planes comunitarios de gestión del riesgo son herramientas fundamentales para educar a la población en la gestión del riesgo de desastres. Estos planes se conciben como instrumentos que contienen un conjunto de normas y procedimientos diseñados para orientar las acciones ante la ocurrencia de un evento adverso (Rosales-Veitia & Marcano-Montilla, 2023). Además, los planes comunitarios permiten a la comunidad reconocer las condiciones del espacio que habita, identificar los escenarios de riesgos a los que están expuestos, establecer acciones para mitigar los efectos de los desastres y promover la organización comunitaria para la gestión del desarrollo (Martínez Rueda, 2008).

En este trabajo de investigación se propone una guía para la construcción de un plan comunitario para la gestión del riesgo sísmico, como estrategia de mitigación no estructural encaminada a la reducción del riesgo.

La metodología para la elaboración de este plan consta de tres sesiones de taller. La primera se enfoca en familiarizar a la comunidad con la terminología general sobre gestión y reducción del riesgo de desastres, y en identificar acciones prácticas que puedan

implementarse para minimizar o prevenir los factores de riesgo. La segunda aborda el manejo de desastres, con el objetivo de desarrollar de forma participativa un plan de emergencias comunitario. Finalmente, en la tercera sesión se realiza un ejercicio de simulación que permite poner a prueba el plan de emergencias, identificando aspectos que requieren ajustes o refuerzos. En la Figura 4-19 se ilustra el proceso para la elaboración del plan comunitario de gestión del riesgo sísmico.

**Figura 4-19.** Proceso para la elaboración del plan comunitario de gestión del riesgo sísmico.

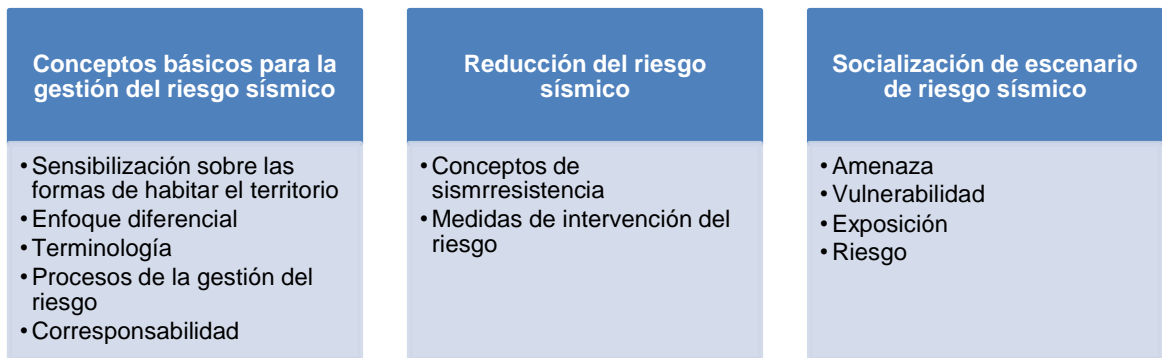


Fuente: Elaboración propia.

- **Sesión 1: Conocimiento y Reducción del Riesgo Sísmico**

La Sesión 1 se estructura en tres momentos. El primero se centra en la introducción a los conceptos fundamentales sobre la gestión del riesgo sísmico. El segundo aborda los aspectos clave para la reducción del riesgo. Finalmente, el tercer momento está dedicado a la socialización de los elementos que configuran el escenario de riesgo sísmico en este territorio. En la

Figura 4-20 se presenta la descripción de los momentos de la Sesión 1.

**Figura 4-20.** Momentos de la Sesión 1 - Conocimiento y Reducción del Riesgo Sísmico.

Fuente: Elaboración propia.

### Conceptos básicos para la gestión del riesgo sísmico

Este momento se centra en introducir los conceptos básicos que permiten a la comunidad comprender y participar activamente en la reducción de los riesgos asociados a los sismos. Se abordan temas clave como la sensibilización sobre las formas de ocupar los territorios, el enfoque diferencial, la terminología sobre gestión del riesgo, los procesos de la gestión del riesgo y la corresponsabilidad.

Uno de los pilares de esta sesión es la sensibilización respecto a la ocupación del territorio. Para ello, se presentan ejemplos históricos de eventos sísmicos relevantes en Colombia, como el sismo de Tumaco en 1979, el sismo de Popayán en 1983 y el sismo del Eje Cafetero en 1999. Estos casos ilustran cómo las características del territorio, combinadas con las decisiones humanas sobre su uso y las formas de construir, influyen directamente en el impacto de los terremotos. A través de infografías, se invita a reflexionar sobre cómo los asentamientos y las construcciones en áreas de riesgo pueden aumentar la vulnerabilidad de las comunidades.

El enfoque diferencial en la gestión del riesgo sísmico reconoce que los impactos de los desastres no afectan de manera uniforme a todas las personas y comunidades. Este enfoque considera las particularidades de grupos específicos, como mujeres, niños, personas mayores, personas con discapacidad, comunidades étnicas y habitantes en situación de vulnerabilidad económica, para diseñar estrategias inclusivas y adaptadas a sus necesidades. En el contexto del riesgo sísmico, el enfoque diferencial implica evaluar cómo las características sociales, culturales y económicas de cada grupo pueden influir en su capacidad para enfrentar y recuperarse de un evento adverso, asegurando que las medidas de prevención y respuesta sean equitativas y efectivas para toda la población.

En cuanto a la terminología, se introducen conceptos que sirven de base para entender la gestión del riesgo de desastres. Entre estos, se destacan términos como fenómeno natural, fenómeno socio-natural, amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo. Estos conceptos permiten describir técnicamente los elementos del riesgo y ayudan a la comunidad a identificar y analizar su entorno de manera informada, facilitando su participación en las actividades de gestión del riesgo (UNGRD, 2017).

Los procesos de la gestión del riesgo se explican como un conjunto de acciones interrelacionadas. En primer lugar, el conocimiento del riesgo incluye la identificación y evaluación de escenarios de riesgo, así como el monitoreo, seguimiento y comunicación de la información para que sea accesible y útil. En segundo lugar, la reducción del riesgo se enfoca en implementar medidas correctivas para mitigar riesgos existentes, acciones prospectivas para prevenir nuevos riesgos, y estrategias de protección financiera para minimizar los impactos económicos de los desastres. Por último, el manejo de desastres aborda tanto la preparación y respuesta ante emergencias como los procesos de recuperación y reconstrucción posteriores (Ley 1523, 2012).

Finalmente, la sesión enfatiza el principio de corresponsabilidad en la gestión del riesgo, destacando que esta es una tarea conjunta que involucra a todas las autoridades, comunidades y habitantes del territorio. Se recalca que la comunidad tiene un papel esencial en la implementación de acciones locales para prevenir y mitigar los riesgos. La gestión del riesgo debe considerarse como un esfuerzo colectivo para garantizar la seguridad y la resiliencia de los territorios (Ley 1523, 2012).

### **Reducción del riesgo sísmico**

Para abordar la reducción del riesgo sísmico, se presenta la Normativa Sismorresistente vigente en Colombia, destacando cómo su aplicación contribuye a disminuir la vulnerabilidad física de las viviendas. El cumplimiento de esta normativa permite aumentar la capacidad de respuesta de las edificaciones ante cargas sísmicas, logrando un mejor desempeño durante los eventos sísmicos. Esto no solo minimiza los daños materiales y las pérdidas económicas, sino que también protege la vida de los ocupantes al mejorar la seguridad estructural de las viviendas (Ministerio de Ambiente, 2010).

En este contexto, es fundamental favorecer la comprensión de los conceptos básicos de sismorresistencia. Estos incluyen aspectos como la forma regular, el bajo peso de las edificaciones, la rigidez adecuada, la estabilidad general, la cimentación en suelo firme, el diseño estructural apropiado que garantice una adecuada transferencia de cargas, el uso de materiales de calidad, la correcta ejecución del proceso constructivo, la capacidad de la estructura para disipar energía y la fijación de los acabados e instalaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC, 2002). Cada uno de estos elementos juega un papel crucial en la capacidad de las edificaciones para resistir movimientos sísmicos y reducir los riesgos asociados. En este espacio del taller se presenta la oportunidad de generar una reflexión acerca de la vulnerabilidad física de las edificaciones presentes en la zona de estudio.

Para intervenir las situaciones de riesgo existentes, se propone la socialización de las medidas de intervención estructurales convencionales y no convencionales propuestas previamente en este trabajo de investigación. Estas medidas tienen el objetivo de reducir la vulnerabilidad física de las edificaciones construidas con mampostería no reforzada, mejorando su comportamiento estructural y disminuyendo la probabilidad de víctimas fatales durante un sismo. Entre las intervenciones planteadas se encuentran la corrección de deficiencias críticas como las irregularidades en planta, la excesiva altura libre de los muros, la falta de vigas de confinamiento, la conexión inadecuada en las esquinas de los muros y la baja resistencia de los muros de mampostería. Al implementar estas medidas, se busca optimizar la capacidad de las edificaciones para disipar la energía generada por los movimientos sísmicos y garantizar una mayor protección de sus ocupantes.

### **Socialización del escenario de riesgo sísmico**

En este momento del taller, se propone socializar con la comunidad los resultados obtenidos de la estimación del riesgo sísmico en una zona periurbana del corregimiento de San Cristóbal, en Medellín. Este análisis se construyó a partir de la interacción de variables clave como la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición, las cuales permiten comprender el escenario de riesgo y orientar estrategias para su gestión.

En cuanto a la amenaza sísmica, se presenta el contexto geológico, geomorfológico y estructural de la zona de estudio, detallando las características del terreno y los factores que podrían amplificar los efectos de un sismo. Es importante explicar las aceleraciones esperadas en el suelo tras un evento sísmico definido como el peor escenario con las características definidas por el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. Para fomentar la reflexión y el entendimiento, estas aceleraciones pueden compararse con eventos sísmicos históricos recordados por los participantes, permitiendo relacionar datos técnicos con las experiencias vividas y conocidas.

De la misma manera, se socializa el modelo de exposición, resaltando que la tipología estructural predominante en la zona de estudio es la mampostería no reforzada. Se analizan los factores que incrementan la vulnerabilidad física de estas edificaciones, como la falta de refuerzos estructurales, el uso de materiales de baja calidad y las deficiencias en el diseño o la construcción. Este análisis le permite a la comunidad identificar las debilidades existentes en sus viviendas y entender la importancia de implementar medidas correctivas.

Así mismo, se exponen los resultados del análisis del escenario de riesgo sísmico, incluyendo la distribución proyectada de daños en las edificaciones. En el peor de los casos, se estima que cerca del 95% de las construcciones podrían colapsar. Estos datos se complementan con mapas que muestran la distribución de los colapsos totales por manzana, permitiendo a los participantes visualizar las áreas más vulnerables y propensas a sufrir daños severos. Este ejercicio busca generar conciencia sobre la magnitud del riesgo y la necesidad de actuar colectivamente para mitigarlo.

Finalmente, para completar esta parte del taller, se propone un ejercicio participativo en el que la comunidad identifique los riesgos concatenados que podrían surgir tras un evento sísmico, tales como movimientos en masa, incendios estructurales, fugas de gas o colapsos adicionales. A través de la herramienta de cartografía social, los participantes ubicarán en un mapa los puntos críticos donde estos riesgos podrían manifestarse. Este ejercicio no solo fortalece el entendimiento del riesgo, sino que también promueve la organización y el trabajo colectivo en la identificación y priorización de acciones preventivas (UNGRD, 2013). Este momento del taller es clave para integrar el conocimiento técnico con la percepción comunitaria, logrando una mayor apropiación de los resultados y promoviendo una participación en la gestión del riesgo sísmico.

- **Sesión 2 – Manejo de desastres**

Este taller se centra en el desarrollo de capacidades comunitarias para la preparación y respuesta ante emergencias causadas por la ocurrencia de eventos sísmicos. Las temáticas incluyen la preparación para actuar frente a emergencias, acciones específicas

de respuesta, la creación de una cadena de llamadas, la identificación de líderes comunitarios y sus roles, así como la definición de rutas de evacuación y puntos de encuentro estratégicos.

La comunidad juega un papel fundamental en la respuesta a emergencias, debido a que su preparación y organización puede representar una diferencia significativa entre salvar vidas y enfrentar mayores pérdidas. Por esta razón, es crucial que la comunidad esté preparada para actuar de manera coordinada y efectiva, asegurando que todos los integrantes conozcan y participen en los planes de emergencia previamente definidos.

La preparación para emergencias implica un conjunto de acciones preventivas y organizativas como la coordinación, con una estructura clara de liderazgo y comunicación; sistemas de alerta, implementando mecanismos para advertir a la población de manera oportuna; capacitación, entrenando a la comunidad en temas como evacuación, primeros auxilios y control de incendios; equipamiento, dotando a las comunidades con kits de emergencias y herramientas básicas; alojamiento temporal, identificando y preparando espacios seguros para refugios temporales y el entrenamiento de organismos de respuesta (Ley 1523, 2012).

La respuesta a emergencias debe abarcar una variedad de servicios básicos que garanticen la seguridad y el bienestar de la comunidad, tales como accesibilidad y transporte, telecomunicaciones, salud y saneamiento, búsqueda y rescate, extinción de incendios, manejo de materiales peligrosos, albergues y alimentación y protección y convivencia. (Ley 1523, 2012).

En esta etapa del taller, se fomenta la reflexión sobre las acciones que la comunidad puede realizar en el marco de los servicios básicos de respuesta, incluyendo, identificación de entidades y funcionarios clave para coordinar la respuesta a emergencias, participación en la formulación y actualización de las estrategias municipales de respuesta, reconocimiento y coordinación con personas y organizaciones comunitarias que pueden apoyar los servicios de respuesta mientras llega el personal especializado, capacitación en temas como evacuación, control de incendios y primeros auxilios, preparación de un kit de emergencias familiar, formulación de un plan de emergencias en el hogar y la participación activa en ejercicios de simulación y simulacros para evaluar y mejorar la preparación. (Alcaldía de Sabaneta, 2022).

La organización comunitaria es esencial para garantizar una respuesta efectiva ante la ocurrencia de un sismo. Los roles que pueden asignarse dentro de la comunidad incluyen coordinación, brigadas de evacuación, brigada de primeros auxilios, brigadas contra incendios y brigadas de aseo y saneamiento, con las asignaciones mostradas en la Figura 4-21.

La asignación de estos roles debe ser clara y organizada para garantizar que cada persona conozca sus responsabilidades y actúe de manera eficiente durante la emergencia. Este enfoque participativo fortalece la capacidad de resiliencia comunitaria frente a sismos.

En el desarrollo de este taller se plantea llevar a cabo un proceso participativo con la comunidad para construir la cadena de llamadas y definir los líderes comunitarios junto con sus roles específicos. Estos líderes deben estar claramente identificados y reconocidos por toda la comunidad en momentos de respuesta a emergencias, utilizando elementos

visuales como chalecos, brazaletes o distintivos visibles que permitan su fácil ubicación (Alcaldía de Sabaneta, 2022).

Se creará un espacio de diálogo y participación en el que los miembros de la comunidad reflexionen y respondan a las siguientes preguntas clave (Sura, 2020):

- ¿Quién inicia la cadena de llamadas?
- ¿Cuál es el límite máximo de llamadas que puede realizar una persona?
- ¿Cuáles son los medios de comunicación alternativos?
- ¿Qué mensaje se deberá transmitir?
- ¿Cuál es el tiempo estimado en el desarrollo de la cadena de llamadas?
- ¿Qué personas deben estar vinculadas a la cadena de llamadas?

**Figura 4-21.** Roles comunitarios para el apoyo en la respuesta a emergencias ocasionadas por la ocurrencia de un evento sísmico.

#### Coordinación

- Informar sobre lo que está ocurriendo a las entidades operativas y a la comunidad.
- Activación de brigadas que existan en el lugar.
- Servir de conexión y enlace con las entidades operativas.
- Informar a la comunidad sobre el estado de la emergencia.
- Convocar el apoyo de la comunidad.

#### Brigada de evacuación

- Apoyar y orientar a la comunidad en los simulacros de evacuación.
- Difundir los planes de evacuación existentes.
- Activar la alarma comunitaria de evacuación.
- Conducir la evacuación de la comunidad.
- Garantizar que todas las personas cuenten con las condiciones para evacuar.

#### Brigada de primeros auxilios

- Prestar los primeros auxilios básicos mientras llega personal experto.
- Definir los lugares donde se pueden atender los afectados en coordinación con las entidades operativas.
- Identificar los sitios en donde se presta ayuda médica a la comunidad.

#### Brigada contra incendios

- Atender incendios en fase inicial.
- Prevenir y detectar incendios.
- Apoyar la evacuación en caso de incendio.

#### Brigada de aseo y saneamiento

- Identificar focos de contaminación del agua o del aire.
- Apoyar las medidas de saneamiento básico.
- Apoyar la prestación del servicio de agua en la comunidad.

Fuente: Elaboración propia a partir de Alcaldía de Sabaneta (2022).

El cierre de la sesión 2 se centrará en retomar el mapa elaborado durante la sesión 1 utilizando la herramienta de cartografía social. Este ejercicio tiene como objetivo fortalecer la capacidad comunitaria para la gestión del riesgo sísmico mediante la identificación de rutas de evacuación seguras y puntos de encuentro estratégicos. Durante esta actividad se incentiva la participación de los asistentes para revisar y ajustar el mapa existente, identificar las rutas de evacuación, señalar puntos de encuentro y determinar recursos críticos en las rutas (Alcaldía de Sabaneta, 2022).

Este momento final permitirá consolidar los avances realizados en la planificación comunitaria y garantizará que el plan comunitario de gestión del riesgo sísmico se convierta en una herramienta práctica y efectiva.

### ▪ Sesión 3 – Ejercicio de simulación

Un ejercicio de mesa o simulación tiene como propósito familiarizar a los participantes con el plan comunitario para la gestión del riesgo sísmico, permitiendo una experiencia práctica en un entorno controlado (Martínez Rueda et al., 2024). Este tipo de actividad reúne a los actores involucrados en el plan comunitario para trabajar conjuntamente en un escenario de entrenamiento diseñado para reflejar posibles eventos de emergencias similares a los impactos reales. A través de la entrega escrita o verbal de situaciones hipotéticas, se busca entrenar y fortalecer la capacidad de respuesta de todos los participantes (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE, 2014).

Este tipo de ejercicio fomenta un aprendizaje práctico y colectivo, donde los participantes pueden analizar, debatir y mejorar sus capacidades de coordinación y toma de decisiones. Al experimentar directamente las dinámicas de respuesta ante una crisis simulada, los actores involucrados no solo consolidan sus roles individuales, sino que también fortalece la cohesión y colaboración comunitaria, aspectos esenciales para enfrentar los desafíos asociados con un evento sísmico (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE, 2014).

Metodológicamente, una simulación es un debate dirigido por un facilitador sobre una situación de emergencia, diseñado para generar una discusión constructiva entre los participantes, identificar y resolver problemas y perfeccionar planes operativos existentes (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE, 2014).

El ejercicio de simulación debe estar cuidadosamente planificado, estableciendo de manera precisa los momentos para la entrega de mensajes a los participantes y las acciones esperadas de cada uno (Martínez Rueda et al., 2024). Esta planificación debe estar fundamentada en un análisis detallado del escenario de riesgo identificado y la evaluación de las capacidades comunitarias para atender emergencias, identificadas durante las sesiones de taller 1 y 2.

Es fundamental verificar la implementación efectiva de la cadena de llamadas y el cumplimiento de los roles asignados, asegurando que estos elementos se integren de manera adecuada al ejercicio. Este enfoque garantizará una simulación realista y efectiva que contribuya al fortalecimiento de la preparación comunitaria.

En la Tabla 4-12 se presenta un ejemplo para el mensaje inicial del ejercicio de simulación de un evento sísmico para la zona de estudio en la zona periurbana del Corregimiento de San Cristóbal.

El ejercicio de simulación debe incluir la participación de evaluadores capacitados, cuya función principal será observar y analizar el desempeño de los participantes durante la actividad. Estos evaluadores tienen la responsabilidad de identificar aspectos positivos y áreas de mejora, con el objetivo de contribuir al fortalecimiento de las capacidades comunitarias en la gestión del riesgo sísmico (Martínez Rueda et al., 2024).

**Tabla 4-12.** Ejemplo del mensaje inicial del ejercicio de simulación.

Fecha y hora real	Fecha y hora simulada	Mensaje	Acción esperada
20 de enero de 2025 10:00 am	20 de enero de 2025 7:00 pm	Mensaje N°1:  Se presenta un sismo profundo de magnitud 7.4 Mw con localización en el sistema de fallas Cauca – Romeral, generando una fuerte sacudida en la zona urbana del corregimiento de Cristóbal, Medellín.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difundir alerta.</li> <li>- Activar comunicación de la cadena de llamada.</li> <li>- Verificación de posibles daños.</li> <li>- Activación de organismos de respuesta.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar una evaluación estructurada y objetiva, se recomienda utilizar herramientas diseñadas específicamente para este propósito, como el modelo de formato propuesto en la Tabla 4-13. Este instrumento debe permitir registrar la información clave sobre el cumplimiento de los procedimientos, la efectividad de la comunicación, el desempeño en los roles asignados y la capacidad de respuesta ante el escenario planteado.

Así mismo, se recomienda que los evaluadores proporcionen una retroalimentación al finalizar el ejercicio de la simulación, fomentando un espacio de reflexión colectiva donde se analicen los resultados y se planteen ajustes necesarios para el fortalecimiento del plan comunitario de gestión de riesgo sísmico.

- **Análisis sobre las sesiones de construcción del plan comunitario de gestión del riesgo sísmico**

La guía metodológica para la construcción de un plan comunitario para la gestión del riesgo sísmico representa un esfuerzo integral y participativo, que comprende los procesos de la gestión del riesgo de desastres para fortalecer la capacidad de la comunidad frente a la ocurrencia de eventos sísmicos. Cada sesión ha sido diseñada para abordar aspectos clave del ciclo de la gestión del riesgo, fomentando un enfoque colaborativo que favorece el conocimiento y la acción coordinada.

El primer taller se centra en el conocimiento y reducción del riesgo sísmico, lo que permite a la comunidad comprender las amenazas específicas a las que está expuesta y las estrategias necesarias para minimizar las vulnerabilidades. La participación de la

comunidad es fundamental para identificar conjuntamente los riesgos en el entorno y priorizar acciones preventivas.

El segundo taller se enfoca en la preparación comunitaria para la respuesta a emergencias. En este espacio la comunidad trabaja colectivamente en la construcción de una cadena de llamadas efectiva, la identificación de rutas de evacuación seguras y la definición de puntos de encuentro específicos. Además, se destaca la importancia de contar con un plan familiar de emergencias como componente esencial para garantizar que los grupos familiares se integren en un esfuerzo colectivo de manera organizada.

**Tabla 4-13.** Modelo de formato para informe de evaluación de un ejercicio de simulación.

<b>Nombre del ejercicio de simulación</b>	
<b>Objetivo General</b>	
<b>Herramienta de planificación a evaluar</b>	
<b>Principales logros de la simulación</b>	
<b>Población que efectuó acciones de protección</b>	
<b>Participantes en la toma de decisiones</b>	
<b>Evaluación del ejercicio</b>	
<b>Debilidades</b>	
<b>Oportunidades</b>	
<b>Fortalezas</b>	
<b>Amenazas</b>	
<b>Lecciones aprendidas</b>	
<b>Recomendaciones</b>	

Fuente: Adaptado de (Martínez Rueda et al., 2024).

La tercera sesión conformada por un ejercicio de simulación permite poner en práctica los conocimientos adquiridos y evaluar la efectividad de los procedimientos establecidos. En

un entorno controlado, los participantes pueden experimentar situaciones hipotéticas que simulan condiciones reales de un evento sísmico, permitiendo fortalecer la capacidad de respuesta, identificando áreas de mejora y aumentando la confianza en la preparación.

En conjunto, estos talleres logran diseñar un plan comunitario completo y adaptado a las necesidades específicas del territorio, además de permitir la consolidación de la participación de la comunidad como eje fundamental para la gestión del riesgo sísmico, consolidando la gestión del riesgo de desastres como un proceso social con el propósito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Ley 1523, 2012).



# 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

### Objetivo específico 1

Se realizó una estimación detallada del riesgo sísmico en una zona de estudio localizada en la zona periurbana del Corregimiento de San Cristóbal en el Distrito de Medellín, mediante el análisis integral de las variables clave para la configuración de un escenario sísmico tales como la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición. Este enfoque permitió identificar factores críticos para la planificación y gestión del riesgo en el área de estudio.

En cuanto a la caracterización de la amenaza sísmica, se presentó un contexto geológico, geomorfológico, demográfico y territorial del Corregimiento de San Cristóbal. Las fuentes de amenaza sísmica se relacionaron con eventos en los ambientes tectónicos cortical y profundo, originados en el sistema de fallas Cauca – Romeral, situado al occidente del Distrito de Medellín. Se modelaron escenarios sísmicos basados en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) y eventos previamente definidos por Acevedo et al. (2020), utilizando GMPE's recomendadas por el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia (Arcila et al., 2020). Los resultados, obtenidos a través del software OpenQuake Engine, evidenciaron mayores aceleraciones en el occidente del área, consistentes con la proximidad de las fuentes sísmicas, la atenuación de las ondas y los efectos de sitio.

Al comparar los resultados de aceleración de los diferentes escenarios de riesgo modelados se tiene que el peor escenario está configurado por una falla en el ambiente profundo con las características definidas en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016), con la GMPE de Montalva et al. (2017), con aceleraciones entre 1,5 g y 1,6 g. De la misma manera, en contraste con el Estudio del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Universidad de los Andes, 2019), se tiene consistencia en los resultados de las aceleraciones obtenidas en este trabajo de investigación, con resultados máximos aproximados de entre 1,5 g y 2,0 g. Así mismo, estos valores son consistentes con los valores definidos por la NSR-10 (Ministerio de Ambiente, 2010), ingresando los valores de aceleración en el espectro elástico.

Respecto al modelo de exposición, se recopiló información detallada de 341 edificaciones, en los polígonos de estudio mediante herramientas como *Google Street View*, *QGIS* y *MapGis9*. La información incluyó variables estructurales y arquitectónicas, como altura, uso, materiales de construcción, estado de los muros y costos estimados de reposición. Se adoptó la taxonomía de edificaciones propuesta por la Fundación GEM, identificándose

que el 96% de las edificaciones están construidas en mampostería no reforzada, lo que las convierte en un factor determinante de la exposición al riesgo sísmico.

El análisis mostró que las edificaciones predominantes son de mampostería no reforzada de dos y tres niveles (78%), seguidas de construcciones de un nivel y de cuatro niveles (15,5%). Estas edificaciones presentan características comunes en zonas periurbanas, como cubiertas inclinadas, balcones y escaleras externas, y en su mayoría tienen uso residencial, aunque algunas combinan actividades comerciales. El costo estimado de reposición para las edificaciones evaluadas asciende a aproximadamente 78 mil millones de pesos colombianos.

Uno de los aspectos que introduce incertidumbre en estos resultados es la caracterización del modelo de exposición mediante Google Street View, en lugar de un levantamiento de campo detallado. Aunque esta herramienta permitió recopilar información sobre variables arquitectónicas y estructurales de las edificaciones, presenta limitaciones en cuanto a la actualización de las imágenes, la visibilidad de detalles clave (como el estado de los muros internos, refuerzos estructurales no visibles y materiales de construcción en profundidad) y la cobertura de algunas áreas. Para reducir esta incertidumbre, se complementó el análisis con otras herramientas como el catastro distrital, MapGis9 y QGIS, lo que permitió mejorar la caracterización del modelo de exposición y aumentar la confiabilidad de los resultados. No obstante, se recomienda que futuros estudios incorporen inspecciones en campo para validar y complementar la información obtenida mediante estas herramientas digitales.

En el análisis de vulnerabilidad, se emplearon curvas de fragilidad que consideran los estados de daño leve, moderado, extensivo y completo en función de la aceleración, desarrolladas por diversos autores y seleccionadas teniendo en cuenta las características de las edificaciones presentes en el modelo de exposición. Dado que estas curvas provienen de distintas fuentes, pueden existir diferencias en la definición de los estados de daño o estados límite, lo que podría afectar la interpretación de los resultados. Como resultado de la estimación de riesgo, el escenario de mayor amenaza sísmica modelado predijo que el 83% de las edificaciones sufrirían colapsos totales, el 8% daños extensivos, el 5% daños moderados, el 2% daños leves y solo el 1% no presentaría afectaciones. La alta vulnerabilidad está asociada a la predominancia de mampostería no reforzada, deficiencias constructivas, baja calidad de los materiales y prácticas constructivas inadecuadas.

## **Objetivo específico 2**

En este trabajo de investigación se propuso un proceso para la implementación de medidas de mitigación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones presentes en la zona de estudio. A partir del análisis del modelo de exposición y de la vulnerabilidad sísmica, se identificaron las principales deficiencias estructurales y constructivas de las edificaciones de mampostería no reforzada y se definieron estrategias de intervención enfocadas en mejorar su desempeño sísmico.

Dentro de las alternativas estructurales convencionales, se priorizaron medidas como la instalación de vigas de amarre, la inclusión de columnas de confinamiento y la construcción

de dinteles de concreto reforzado. La selección de estas estrategias responde a la tipología de edificaciones predominante en la zona y a su viabilidad técnica y económica.

Así mismo, se identificó el potencial uso de materiales alternativos y estrategias de refuerzo no convencionales, como el uso de mallas de bambú, bandas de polipropileno y fibras naturales. Si bien la efectividad de estas soluciones ha sido documentada en estudios previos, en este trabajo se estableció su posible aplicabilidad a las edificaciones de la zona de estudio, considerando factores como el acceso a materiales y la capacidad técnica de la comunidad para su implementación. Sin embargo, se reconoce la necesidad de realizar estudios experimentales o modelaciones específicas para evaluar cuantitativamente su impacto en la reducción del riesgo sísmico en el contexto particular del área analizada.

Adicionalmente, se propusieron estrategias de mitigación no estructurales orientadas a mejorar la preparación y respuesta comunitaria frente a eventos sísmicos. Estas incluyen la formulación de un plan familiar de emergencias y un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico, que pueden contribuir al fortalecimiento de la resiliencia en la zona de estudio.

En general, los resultados de este trabajo aportan información clave para la planificación de estrategias de mitigación del riesgo sísmico en contextos similares, donde predominan edificaciones vulnerables y recursos limitados para la implementación de medidas de reforzamiento estructural. Se recomienda en futuras investigaciones complementar el análisis mediante ensayos experimentales y modelaciones que permitan cuantificar con mayor precisión el impacto de estrategias propuestas.

### **Objetivo específico 3**

En este trabajo de investigación, se desarrolló una guía práctica para la construcción de un plan familiar de respuesta a emergencias sísmicas y un plan comunitario de gestión del riesgo sísmico, orientados a fortalecer la preparación para la respuesta ante eventos de este tipo.

La guía para la formulación de un plan familiar de emergencias establece pasos de fácil comprensión que incluyen la identificación del grupo familiar, la evaluación del riesgo, la formulación de medidas para reducirlo y las acciones de preparación para responder eficazmente. Este enfoque incorpora una perspectiva diferencial que considera necesidades específicas de las personas que integran el grupo familiar y los animales de compañía. Además, se propone una metodología para identificar amenazas derivadas de eventos sísmicos, como movimientos en masa, incendios estructurales y fugas de gas.

Un aspecto destacado es el procedimiento para evaluar la vulnerabilidad física de las viviendas, facilitando a la comunidad la comprensión de parámetros clave de sismo-resistencia. También se planteó la evaluación de la vulnerabilidad familiar, centrada en las capacidades para enfrentar emergencias. Entre las acciones de preparación se incluyó la elaboración de un directorio de contactos de apoyo y organismos de respuesta, así como una lista sugerida para el contenido del kit de emergencias.

En la guía para la construcción del plan comunitario de gestión del riesgo sísmico se presentó un esquema de tres talleres participativos enfocados en los procesos esenciales

de gestión del riesgo de desastres: conocimiento, reducción del riesgo y manejo de desastres. Estas sesiones ofrecen un espacio reflexivo para analizar los componentes del escenario del riesgo sísmico y socializar las medidas de intervención estructural propuestas en este trabajo de investigación.

Además, se definió una hoja de ruta para la acción comunitaria ante un evento sísmico, abordando desde la identificación de riesgos hasta la preparación para la respuesta. Como parte del proceso, se planteó la realización de un ejercicio de escritorio, diseñado para poner en práctica los conocimientos adquiridos y evaluar la efectividad del plan comunitario.

Estas guías representan herramientas prácticas para el fortalecimiento de la preparación y capacidad de respuesta tanto a nivel familiar como comunitario, promoviendo la seguridad y la resiliencia ante los impactos de los sismos.

La implementación de medidas no estructurales propuestas para la reducción del riesgo sísmico fortalece las capacidades de las comunidades, incrementado su resiliencia y asegurando una respuesta efectiva ante emergencias. Estas acciones no solo abordan el riesgo sísmico, sino que pueden extrapolarse a la gestión de otros tipos de riesgo, promoviendo un enfoque integral de prevención y respuesta comunitaria. Además, estas medidas contribuyen al desarrollo sostenible al priorizar la participación comunitaria, la educación en gestión de riesgos de desastres y la protección de vidas y bienes, fomentando sociedades más inclusivas, seguras y preparadas para enfrentar los desafíos actuales y futuros.

## 5.2 Recomendaciones

- Fortalecer la integración de herramientas tecnológicas como el software OpenQuake Engine en las estrategias de planificación municipal y regional, con el fin de generar escenarios de riesgo sísmico precisos y actualizados.
- Realizar estudios periódicos para actualizar las estimaciones de amenaza y exposición en áreas periurbanas, teniendo en cuenta las dinámicas de los territorios y sus cambios demográficos, urbanísticos y de infraestructura, así como la generación de nuevos conocimientos en el área del riesgo sísmico.
- Fomentar la armonización territorial incorporando los resultados del análisis de riesgo al Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del Distrito de Medellín, priorizando acciones para las edificaciones más vulnerables.
- Se recomienda para trabajos de investigación futuros la realización de pruebas en muros de mampostería no reforzada empleando las estrategias de mitigación del riesgo sísmico planteadas en esta tesis.
- Si bien las medidas de intervención estructurales no convencionales descritas en este trabajo permiten una mejoría, en diferentes medidas, en el comportamiento estructural de las edificaciones de mampostería no reforzada, se recomienda el desarrollo de curvas de fragilidad que se ajusten a estos comportamientos con el fin de predecir las aceleraciones con las que se podrían alcanzar los diferentes estados de daño.
- Implementar programas de capacitación para constructores y propietarios orientados a la adopción de medidas convencionales y no convencionales, permitiendo la socialización de prácticas constructivas mejores y más seguras.

- Desarrollar incentivos económicos por parte de la administración distrital para fomentar la realización de intervenciones estructurales en las edificaciones de mampostería no reforzando, priorizando aquellas con mayor riesgo de colapso total.
- Realizar campañas de sensibilización sobre la importancia de aplicar la normativa sismo – resistente, especialmente en comunidades periurbanas donde predominan prácticas constructivas informales.
- Promover la implementación de planes comunitarios de gestión del riesgo sísmico mediante talleres participativos, asegurando la integración de todos los actores sociales, incluyendo líderes comunitarios, organismos de respuesta y población vulnerable.
- Fortalecer las capacidades locales mediante ejercicios de simulación y simulacros que evalúen la efectividad de los planes familiares y comunitarios de respuesta a emergencias.

## **ANEXOS**

## A. Resultados del análisis de escenarios sísmicos

En este anexo se incluyen los resultados de los escenarios de riesgo sísmico evaluados en el presente trabajo de investigación. Durante el desarrollo de la tesis se expusieron los resultados correspondientes al peor escenario de riesgo sísmico, definido en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) utilizando la GMPE de Montalva et al. (2017). Es de anotar que la estimación del riesgo sísmico consideró el mismo modelo de exposición y las mismas curvas de fragilidad. A continuación, se presentan los resultados de los demás escenarios modelados.

- **Escenario de riesgo definido por el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres en el ambiente tectónico superficial**

La falla modelada tiene una magnitud de 7,4 Mw con una profundidad de 7,5 metros, localizada en las coordenadas Longitud: -75,68 y Latitud 6,20. Las GMPE utilizadas para el ambiente superficial corresponden a las desarrolladas por Idriss (2014), Cauzzi et al. (2014) y Abrahamson et al. (2014).

Los resultados de amenaza sísmica, expresados como de campos de movimientos del terreno, en términos de PGA y la aceleración espectral a los 0.4 segundos [SA (0,4)], tienen aceleraciones que oscilan entre los 0.315 g y los 0.525 g, como se muestra en la Tabla A. 1 y en la Figura 3-10, Figura 3-11 y Figura 3-12.

**Tabla A. 1.** Resultados de amenaza sísmica para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente tectónico superficial.

GMPE	PGA [g]	SA(0.4) [g]
Abrahamson et al. (2014)	0,315 – 0,350	0,515 – 0,565
Cauzzi et al. (2014)	0,350 – 0,385	0,470 – 0,525
Idriss (2014)	0,415 – 0,465	0,480 – 0,525

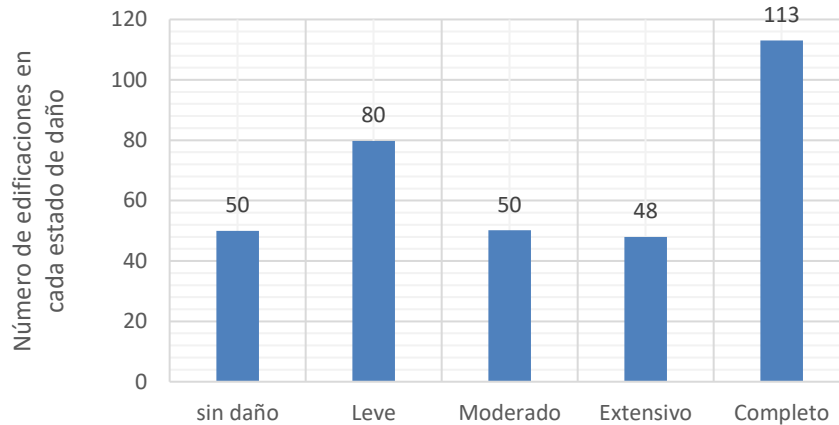
Fuente: Elaboración propia.

### **GMPE de Abrahamson et al. (2014)**

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Abrahamson et al. (2014), una estimación de aproximadamente 113 edificaciones [33%] sufrirían colapsos totales, 48 edificaciones [14%] presentarían daño extensivo, 50 edificaciones [15%] tendrían daños moderados, 80 edificaciones [23%] experimentarían daños leves y 50 edificaciones [15%]

no resultarían afectadas. En la Figura A. 1 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

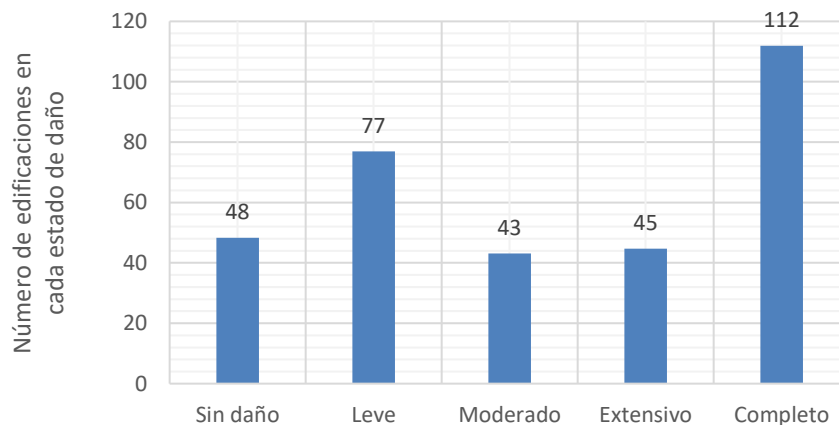
**Figura A. 1.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Abrahamson et al. (2014).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 112 edificaciones [34%] colapsarían por completo, 45 edificaciones [14%] sufrirían daños extensivos, 43 edificaciones [13%] presentarían daños moderados, 77 edificaciones [27%] tendrían daños leves y 48 edificaciones [15%] no sufrirían daños. En la Figura A. 2 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

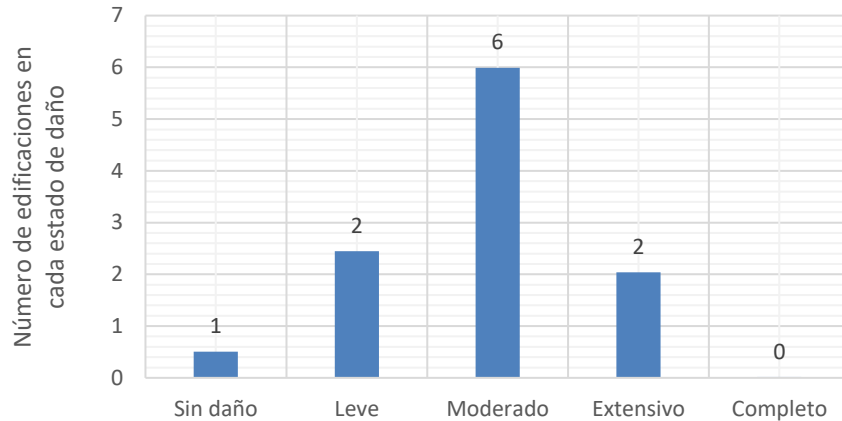
**Figura A. 2.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Abrahamson et al. (2014) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente, 2 edificaciones [18%] sufrirían daños extensivos, 6 edificaciones [55%] presentarían daños moderados, 2 edificaciones [18%] tendrían daños leves y 1 edificación [9%] no presentaría daños. En la Figura A. 3 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería confinada en este escenario de riesgo.

**Figura A. 3.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Abrahamson et al. (2014) en edificaciones de mampostería confinada.



Fuente: Elaboración propia.

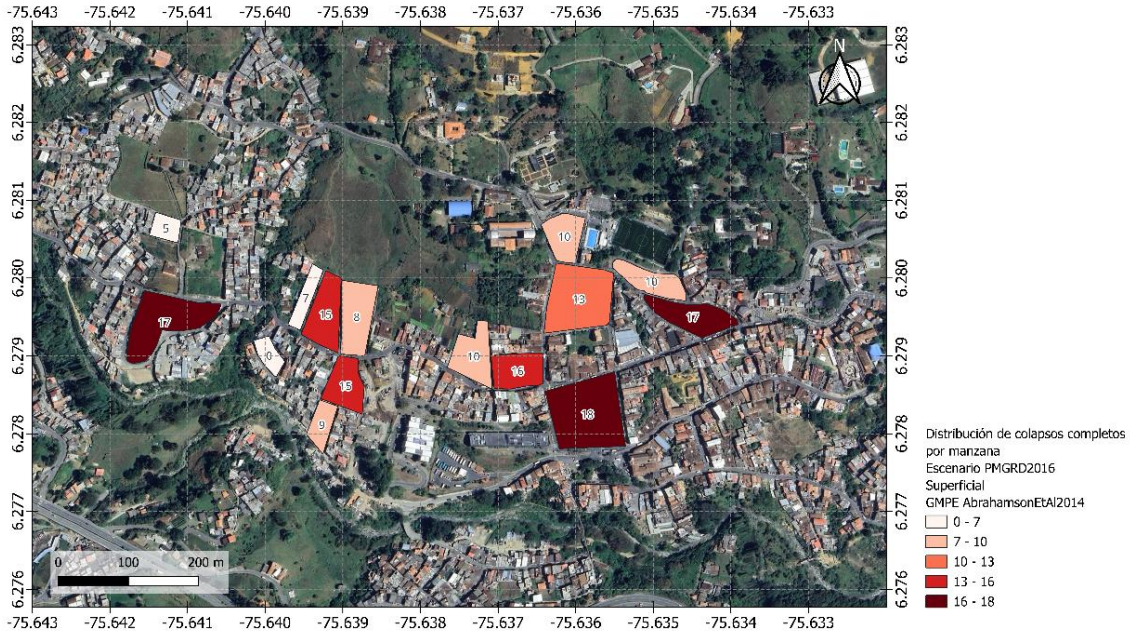
En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño moderado en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Abrahamson et al. (2014). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que colapsarían.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que colapsarían en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 4 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos totales por manzana considerando el escenario sísmico definido por el PMGRD y la GMPE de Abrahamson et al. (2014).

### **GMPE de Cauzzi et al. (2014)**

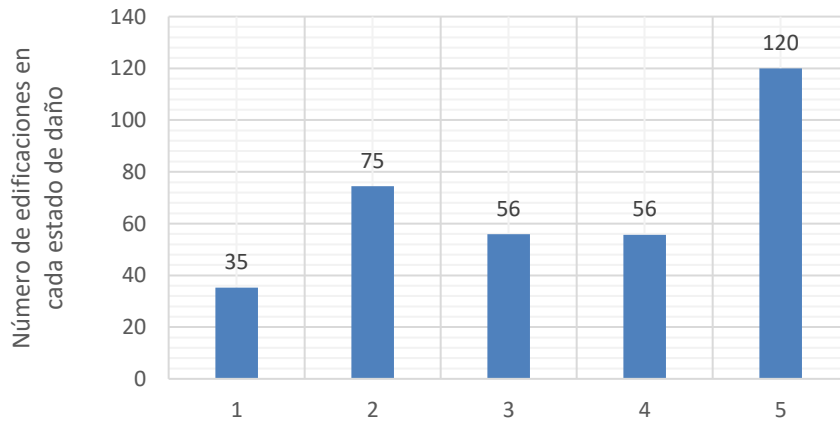
Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) una estimación de aproximadamente 120 edificaciones [35%] sufrirían colapsos totales, 56 edificaciones [16%] presentarían daño extensivo, 56 edificaciones [16%] tendrían daños moderados, 75 edificaciones [22%] experimentarían daños leves y 35 edificaciones [10%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 5 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

**Figura A. 4.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el escenario definido por el PMGRD y la GMPE de Abrahamson et al. (2014).



Fuente: Elaboración propia.

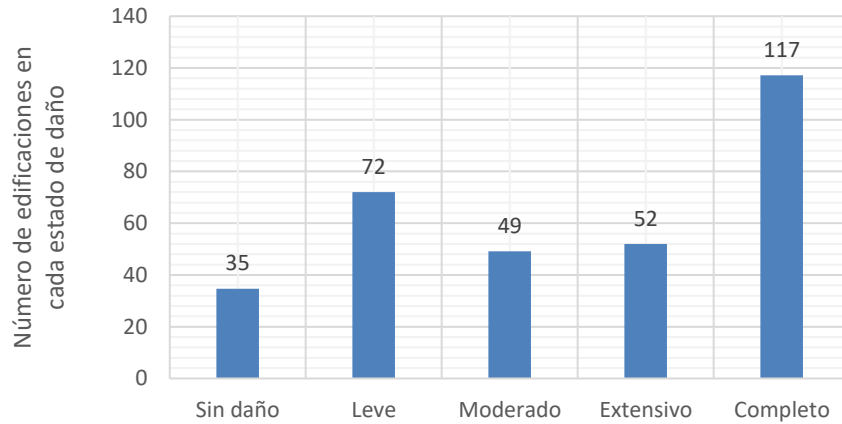
**Figura A. 5.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Cauzzi et al. (2014).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 117 edificaciones [36%] colapsarían por completo, 52 edificaciones [16%] sufrirían daños extensivos, 49 edificaciones [15%] presentarían daños moderados, 72 edificaciones [22%] tendrían daños leves y 35 edificaciones [11%] no sufrirían daños. En la Figura A. 6 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

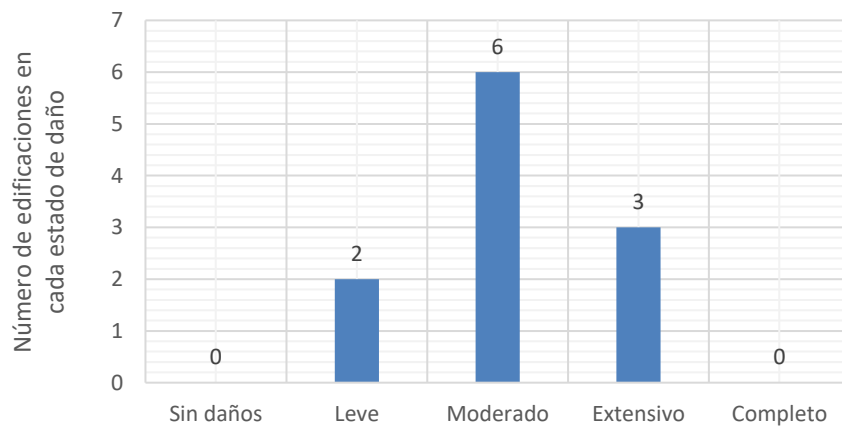
**Figura A. 6.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente, 3 edificaciones [27%] sufrirían daños extensivos, 6 edificaciones [55%] presentarían daños moderados, 2 edificaciones [18%] tendrían daños leves. En la Figura A. 7 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería confinada para el este escenario de riesgo.

**Figura A. 7.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) en edificaciones de mampostería confinada.

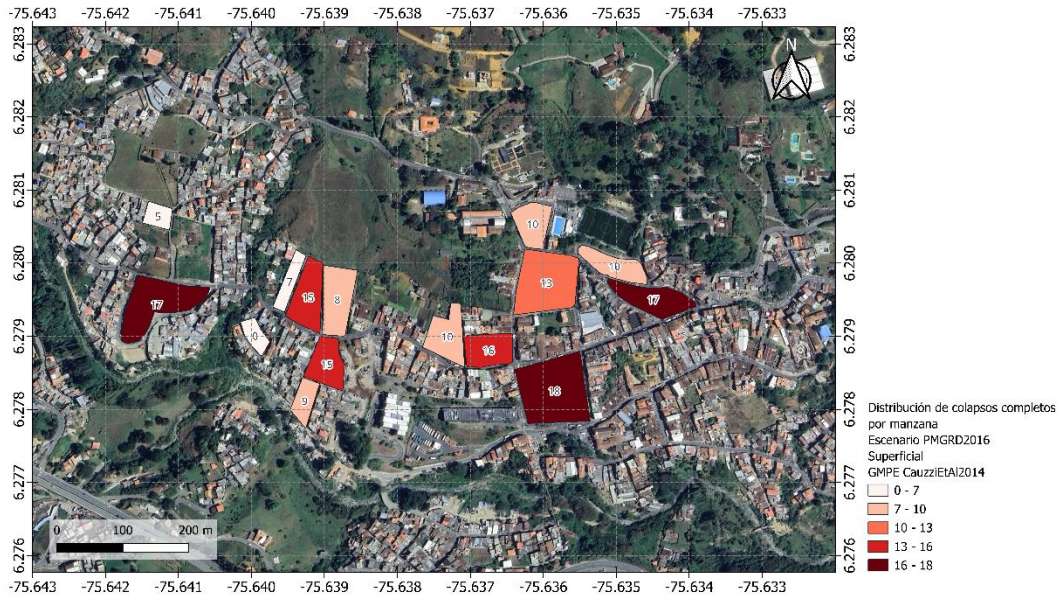


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño extensivo en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Cauzzi et al. (2014). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que colapsarían.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que colapsarían en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 8 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos totales por manzana considerando el escenario sísmico definido por el PMGRD y la GMPE de Cauzzi et al. (2014).

**Figura A. 8.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el escenario definido por el PMGRD y la GMPE de Cauzzi et al. (2014).



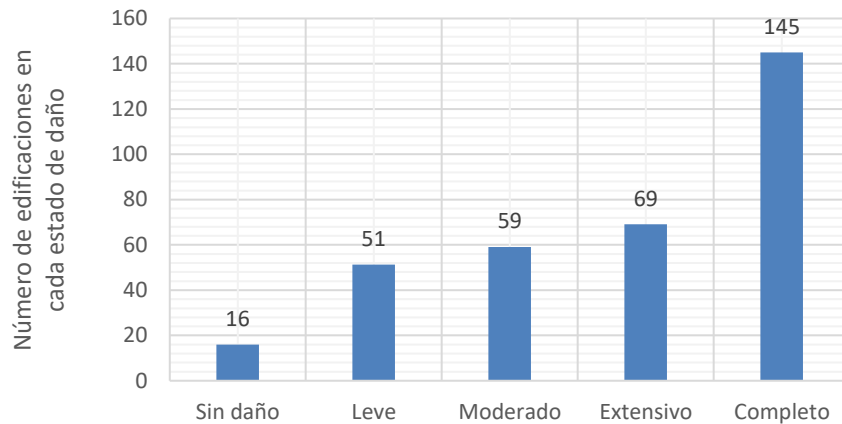
Fuente: Elaboración propia.

### GMPE de Idriss (2014)

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Idriss (2014) una estimación de aproximadamente 145 edificaciones [43%] sufrirían colapsos totales, 69 edificaciones [20%] presentarían daño extensivo, 59 edificaciones [17%] tendrían daños moderados, 51 edificaciones [15%] experimentarían daños leves y 16 edificaciones [5%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 9 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

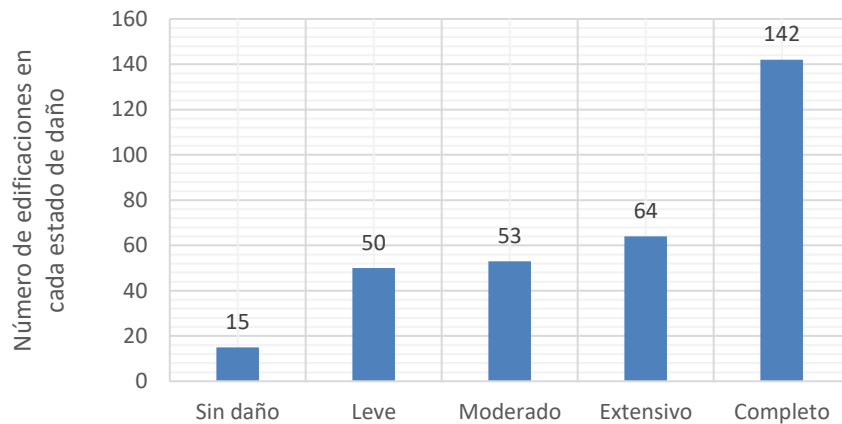
Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 142 edificaciones [44%] colapsarían por completo, 64 edificaciones [20%] sufrirían daños extensivos, 53 edificaciones [16%] presentarían daños moderados, 50 edificaciones [15%] tendrían daños leves y 15 edificaciones [5%] no sufrirían daños. En la Figura A. 10 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

**Figura A. 9.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Idriss (2014).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura A. 10.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Idriss (2014) en edificaciones de mampostería no reforzada.

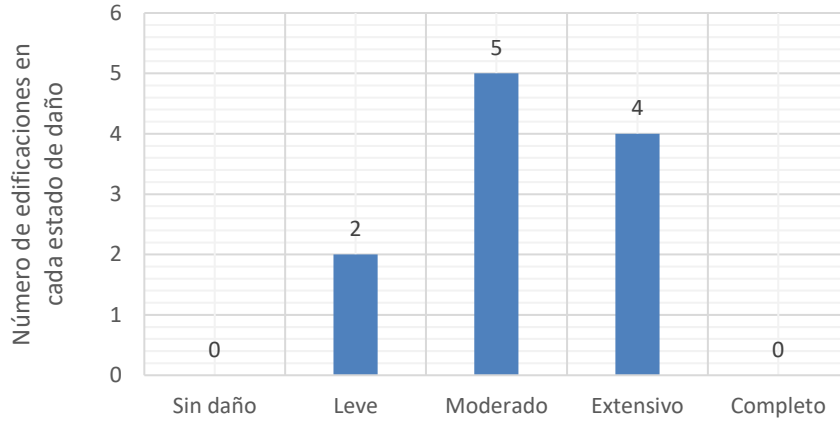


Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente, 4 edificaciones [36%] sufrirían daños extensivos, 5 edificaciones [45%] presentarían daños moderados, 2 edificaciones [18%] tendrían daños leves. En la Figura A. 11 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería reforzada para el este escenario de riesgo.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un colapsaría completamente en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Idriss (2014). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que colapsarían.

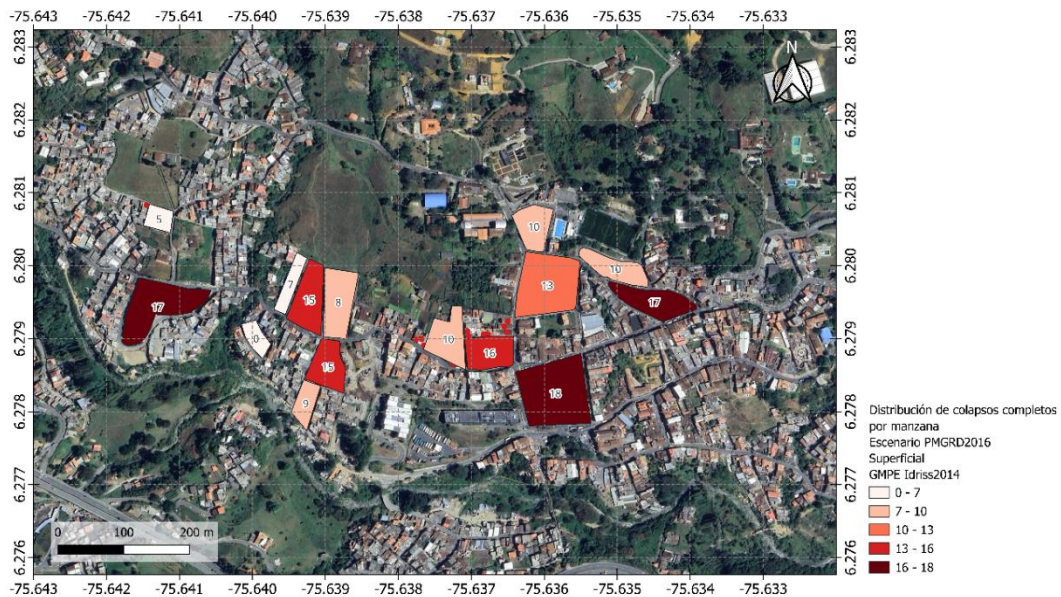
**Figura A. 11.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por el PMGRD en el ambiente superficial con la GMPE de Idriss (2014) en edificaciones de mampostería confinada.



Fuente: Elaboración propia.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que colapsarían en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 12 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos totales por manzana considerando el escenario sísmico definido por el PMGRD y la GMPE de Idriss (2014).

**Figura A. 12.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el escenario definido por el PMGRD y la GMPE de Idriss (2014).



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una comparación de los resultados obtenidos para el escenario de riesgo planteado por el PMGRD (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) en el ambiente tectónico superficial utilizando las diferentes GMPE, es posible identificar que los resultados de la GMPE de Idriss (2014) presentarían mayores daños en la zona de estudio, sin embargo, observando la distribución espacial de las edificaciones que presentarían colapsos completos se mantiene consistente el número de colapsos por manzana.

- **Escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente tectónico superficial**

La falla modelada tiene una magnitud de 7,5 Mw con una profundidad de 7,5 metros, localizada en las coordenadas Longitud: -76,08 y Latitud 6,30. Las GMPE utilizadas para el ambiente superficial corresponden a las desarrolladas por Idriss (2014), Cauzzi et al. (2014) y Abrahamson et al. (2014).

Los resultados de amenaza sísmica, expresados como de campos de movimientos del terreno, en términos de PGA y la aceleración espectral a los 0.4 segundos [SA (0,4)], tienen aceleraciones que oscilan entre los 0,315 g y los 0,525 g, como se muestra en la Tabla A. 2 y en la Figura 3-16, Figura 3-17 y Figura 3-18.

**Tabla A. 2.** Resultados de amenaza sísmica para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente tectónico superficial.

<b>GMPE</b>	<b>PGA [g]</b>	<b>SA(0.4) [g]</b>
Abrahamson et al. (2014)	0,085 – 0.090	0,160 – 0,165
Cauzzi et al. (2014)	0,095 – 0.100	0,120 – 0,130
Idriss (2014)	0,080 – 0.085	0,105 – 0,115

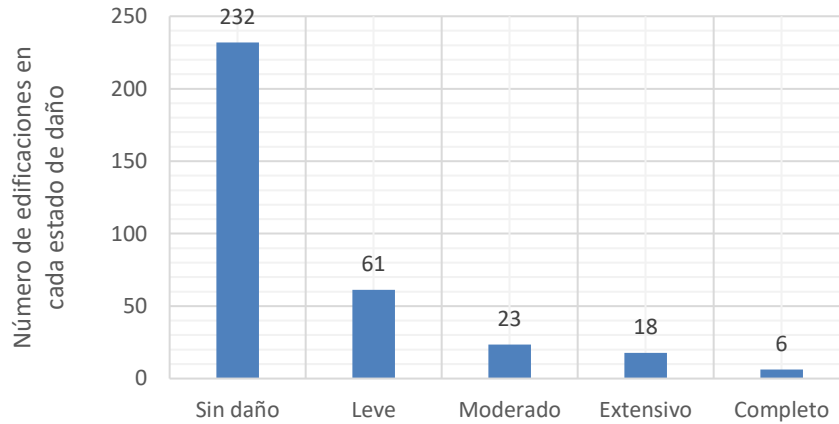
Fuente: Elaboración propia.

#### **GMPE de Abrahamson et al. (2014)**

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Abrahamson et al. (2014), una estimación de aproximadamente 6 edificaciones [2%] sufrirían colapsos totales, 18 edificaciones [5%] presentarían daño extensivo, 23 edificaciones [7%] tendrían daños moderados, 61 edificaciones [18%] experimentarían daños leves y 232 edificaciones [68%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 13 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

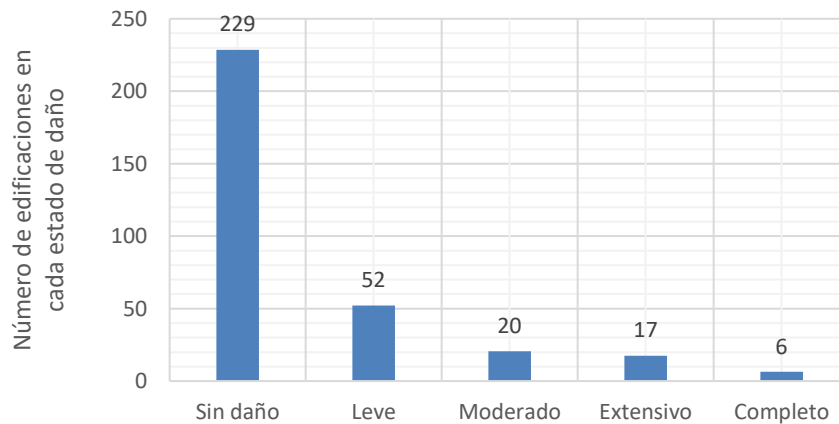
Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 6 edificaciones [2%] colapsarían por completo, 17 edificaciones [5%] sufrirían daños extensivos, 20 edificaciones [6%] presentarían daños moderados, 52 edificaciones [16%] tendrían daños leves y 229 edificaciones [70%] no sufrirían daños. En la Figura A. 14 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

**Figura A. 13.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Abrahamson et al. (2014).



Fuente: Elaboración propia.

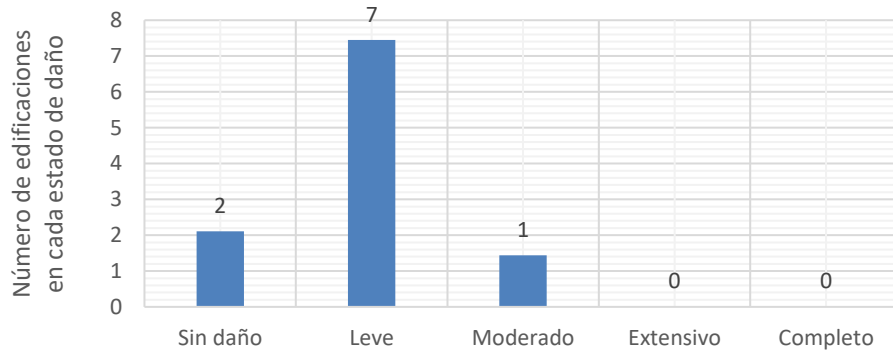
**Figura A. 14.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Abrahamson et al. (2014) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente ni sufriría daños extensivos, 1 edificación [9%] presentaría daños moderados, 7 edificaciones [64%] tendrían daños leves y 2 edificaciones [18%] no presentarían daños. En la Figura A. 15 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería confinada en este escenario de riesgo.

**Figura A. 15.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Abrahamson et al. (2014) en edificaciones de mampostería confinada.

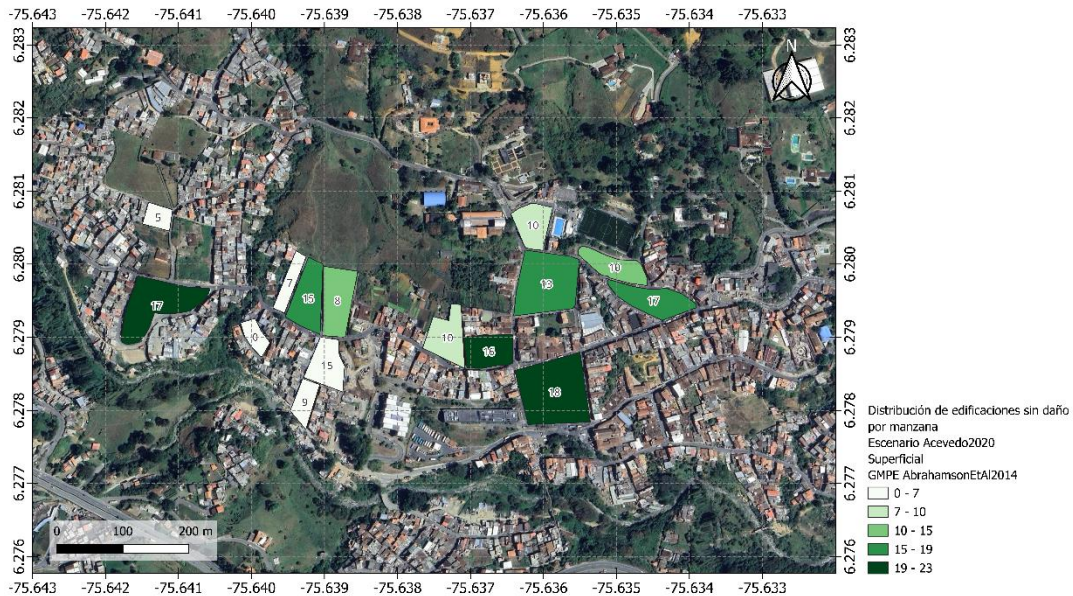


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño leve en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Abrahamson et al. (2014). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que presentarían daños moderados.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que no presentarían daños en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 16 presenta la distribución espacial de las edificaciones sin daños por manzana considerando el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Abrahamson et al. (2014).

**Figura A. 16.** Distribución de edificaciones sin daños por manzana para el escenario definido Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Abrahamson et al. (2014).

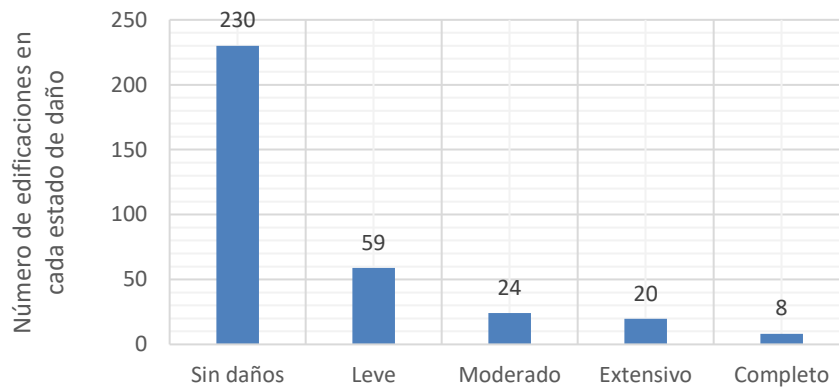


Fuente: Elaboración propia.

**GMPE de Cauzzi et al. (2014)**

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) una estimación de aproximadamente 8 edificaciones [2%] sufrirían colapsos totales, 20 edificaciones [6%] presentarían daño extensivo, 24 edificaciones [7%] tendrían daños moderados, 59 edificaciones [17%] experimentarían daños leves y 230 edificaciones [67%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 17 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

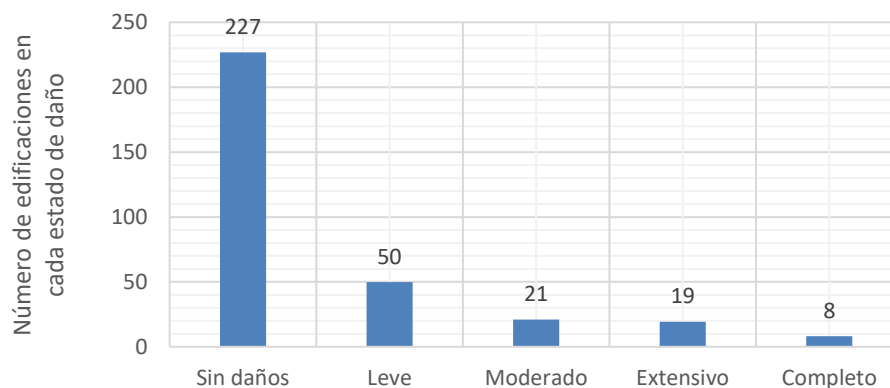
**Figura A. 17.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Cauzzi et al. (2014).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 8 edificaciones [2%] colapsarían por completo, 19 edificaciones [6%] sufrirían daños extensivos, 21 edificaciones [6%] presentarían daños moderados, 50 edificaciones [15%] tendrían daños leves y 227 edificaciones [70%] no sufrirían daños. En la Figura A. 18 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

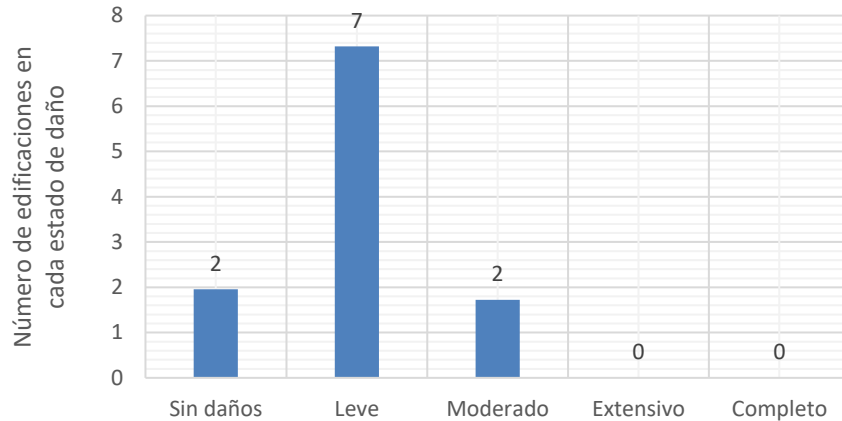
**Figura A. 18.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente ni tendría daños extensivos, 2 edificaciones [18%] presentarían daños moderados, 7 edificaciones [67%] tendrían daños leves y 2 edificaciones [2%] no presentarían daños. En la Figura A. 19 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería confinada para el este escenario de riesgo.

**Figura A. 19.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) en edificaciones de mampostería confinada.



Fuente: Elaboración propia.

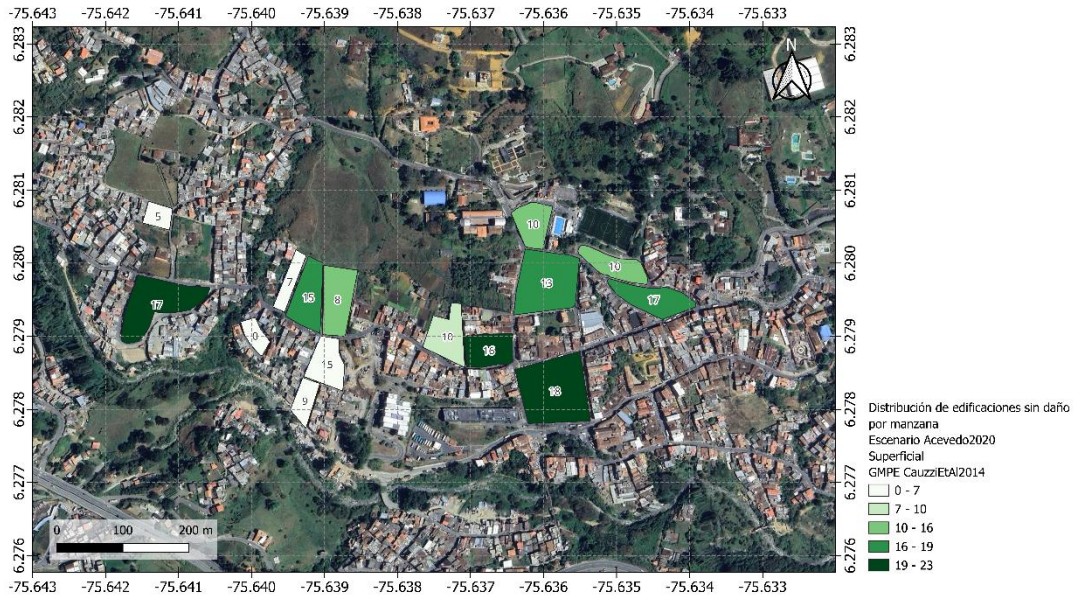
En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño leve en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Cauzzi et al. (2014). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que sufrirían daños moderados.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que no presentarían daños en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 20 presenta la distribución espacial de las edificaciones sin daños por manzana considerando el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Cauzzi et al. (2014).

### GMPE de Idriss (2014)

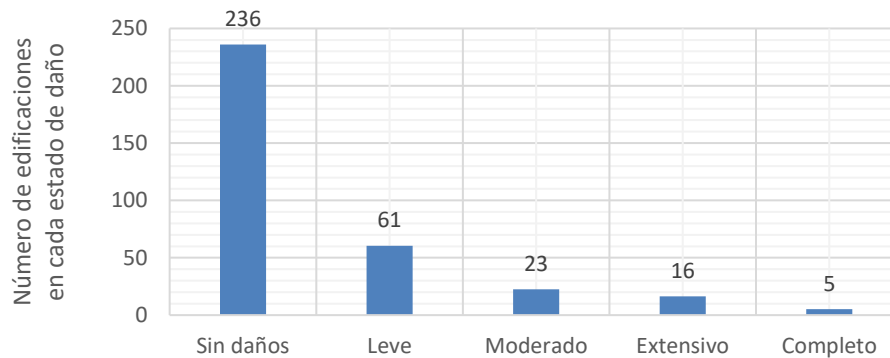
Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Idriss (2014) una estimación de aproximadamente 5 edificaciones [1%] sufrirían colapsos totales, 16 edificaciones [5%] presentarían daño extensivo, 23 edificaciones [7%] tendrían daños moderados, 61 edificaciones [18%] experimentarían daños leves y 236 edificaciones [69%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 21 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

**Figura A. 20.** Distribución de edificaciones sin daños por manzana para el escenario definido Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Cauzzi et al. (2014).



Fuente: Elaboración propia.

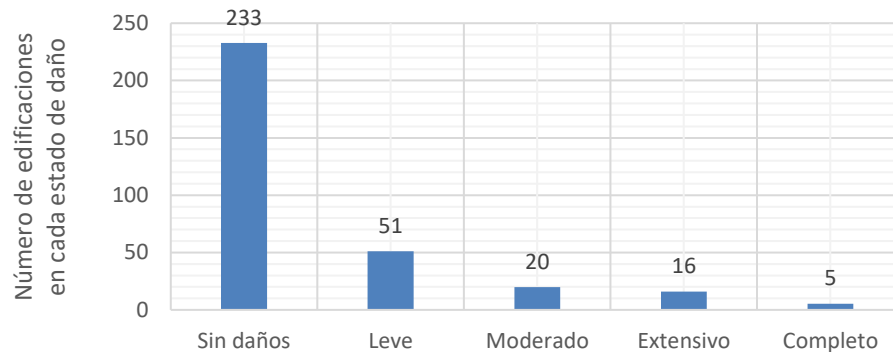
**Figura A. 21.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Idriss (2014).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 5 edificaciones [2%] colapsarían por completo, 16 edificaciones [5%] sufrirían daños extensivos, 20 edificaciones [6%] presentarían daños moderados, 51 edificaciones [16%] tendrían daños leves y 233 edificaciones [72%] no sufrirían daños. En la Figura A. 22 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

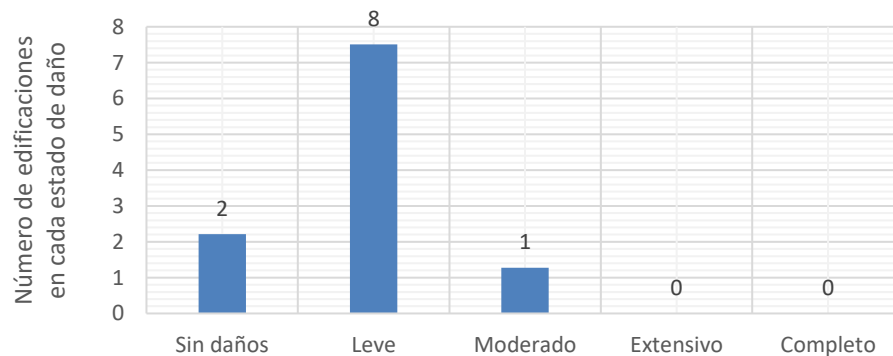
**Figura A. 22.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Idriss (2014) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente ni presentaría daños extensivos, 1 edificación [9%] sufriría daños moderado, 8 edificaciones [73%] tendrían daños leves y 2 edificaciones [18%] no presentarían daños. En la Figura A. 23Figura A. 11 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería reforzada para el este escenario de riesgo.

**Figura A. 23.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente superficial con la GMPE de Idriss (2014) en edificaciones de mampostería confinada.

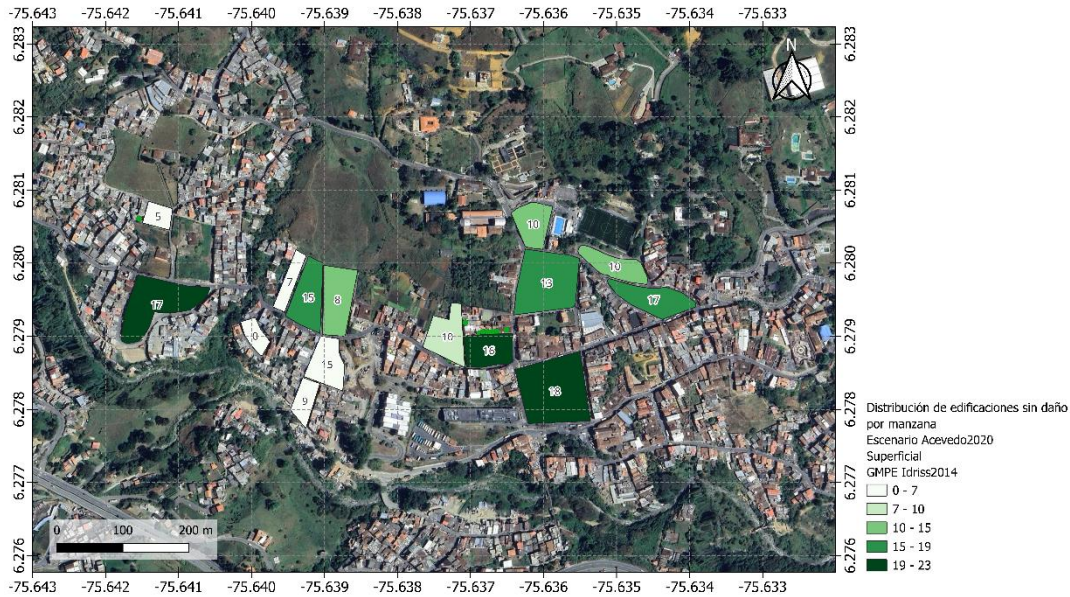


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual colapsaría completamente en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Idriss (2014). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que presentarían daños moderados.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que no presentarían daños en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 24 presenta la distribución espacial de las edificaciones sin daños por manzana considerando el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Idriss (2014).

**Figura A. 24.** Distribución de edificaciones sin daños por manzana para el escenario definido Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Idriss (2014).



Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los escenarios de riesgo modelados en el ambiente tectónico superficial, se observa que, aunque ambos presentan magnitudes y profundidades similares, el escenario definido por el PMGRD (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, 2016) muestra un número significativamente mayor de colapsos en todas las tipologías estructurales incluidas en el modelo de exposición, en comparación con el escenario propuesto por Acevedo et al. (2020). Esta diferencia podría atribuirse a la ubicación de la falla y al impacto de las ecuaciones de atenuación.

- **Escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente tectónico profundo**

La falla modelada tiene una magnitud de 8,4 Mw con una profundidad de 29,1 metros, localizada en las coordenadas Longitud: -76,15 y Latitud 5,45. Las GMPE utilizadas para el ambiente profundo corresponden a las desarrolladas por J. X. Zhao et al. (2006), Abrahamson et al. (2016) y Montalva et al. (2017).

Los resultados de amenaza sísmica, expresados como de campos de movimientos del terreno, en términos de PGA y la aceleración espectral a los 0.4 segundos [SA (0.4)], tienen aceleraciones que oscilan entre los 0.315 g y los 0.525 g, como se muestra en la Tabla A. 3 y en la Figura 3-19, Figura 3-20 y Figura 3-21.

**Tabla A. 3.** Resultados de amenaza sísmica para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente tectónico profundo.

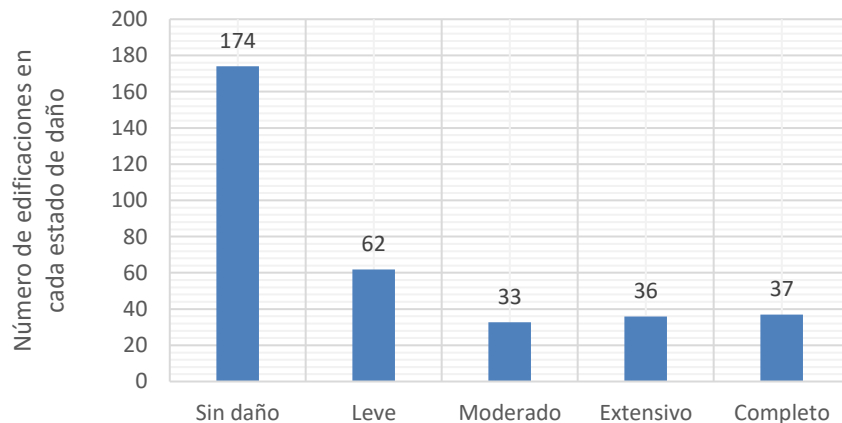
GMPE	PGA [g]	SA(0.4) [g]
Abrahamson et al. (2016)	0.185 – 0.195	0.295 – 0.305
Montalva et al. (2017)	0.180 – 0.190	0.305 – 0.310
J. X. Zhao et al. (2006)	0.200 – 0.210	0.295 – 0.305

Fuente: Elaboración propia.

### GMPE de Abrahamson et al. (2016)

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Abrahamson et al. (2016), una estimación de aproximadamente 37 edificaciones [11%] sufrirían colapsos totales, 36 edificaciones [11%] presentarían daño extensivo, 33 edificaciones [10%] tendrían daños moderados, 62 edificaciones [18%] experimentarían daños leves y 174 edificaciones [51%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 25 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

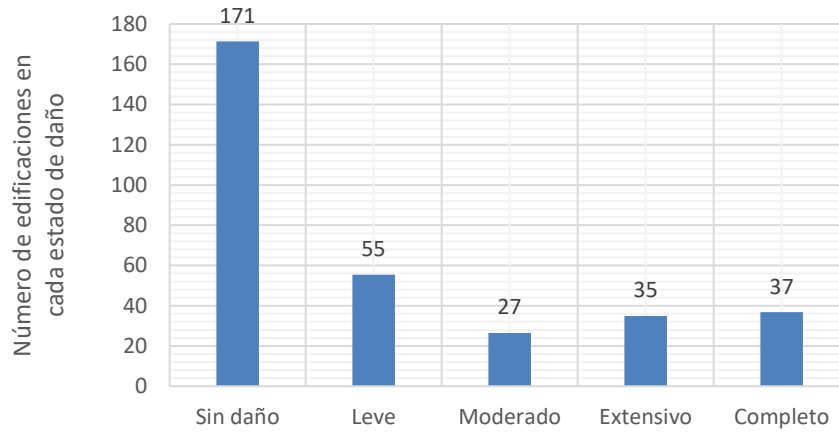
**Figura A. 25.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de Abrahamson et al. (2016).



Fuente: Elaboración propia.

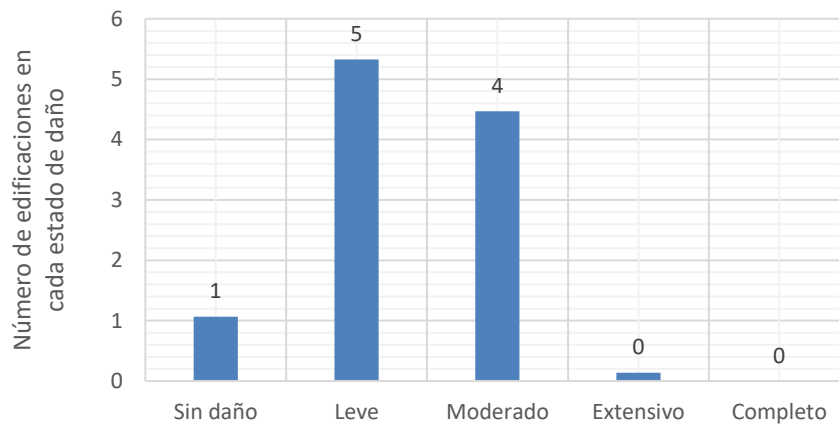
Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 37 edificaciones [11%] colapsarían por completo, 35 edificaciones [11%] sufrirían daños extensivos, 27 edificaciones [8%] presentarían daños moderados, 55 edificaciones [17%] tendrían daños leves y 171 edificaciones [53%] no sufrirían daños. En la Figura A. 26 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

**Figura A. 26.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de Abrahamson et al. (2016) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura A. 27.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de Abrahamson et al. (2016) en edificaciones de mampostería confinada.

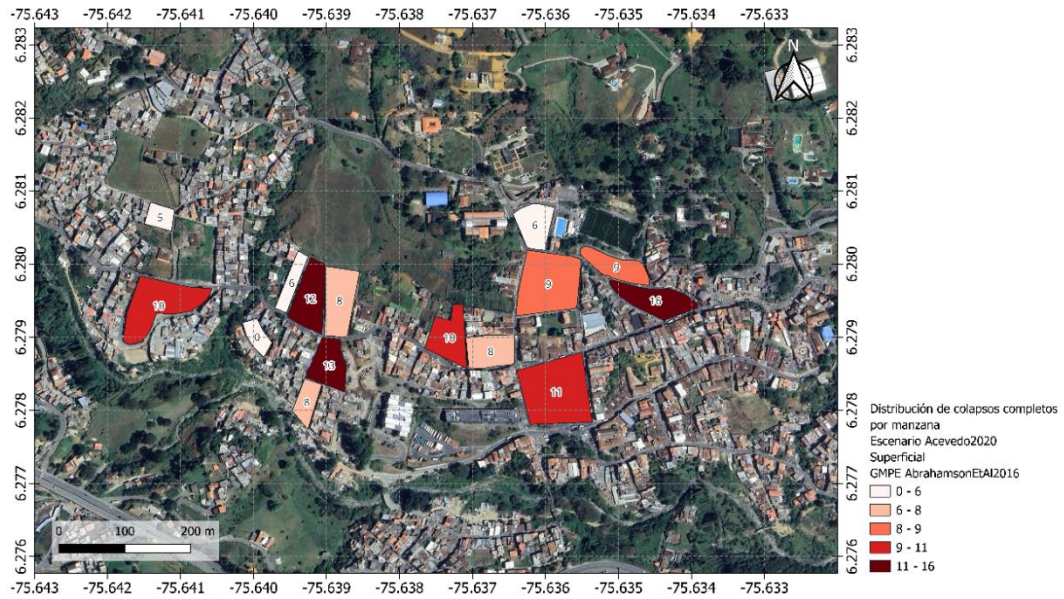


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño leve en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Abrahamson et al. (2016). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que presentarían daños moderados.

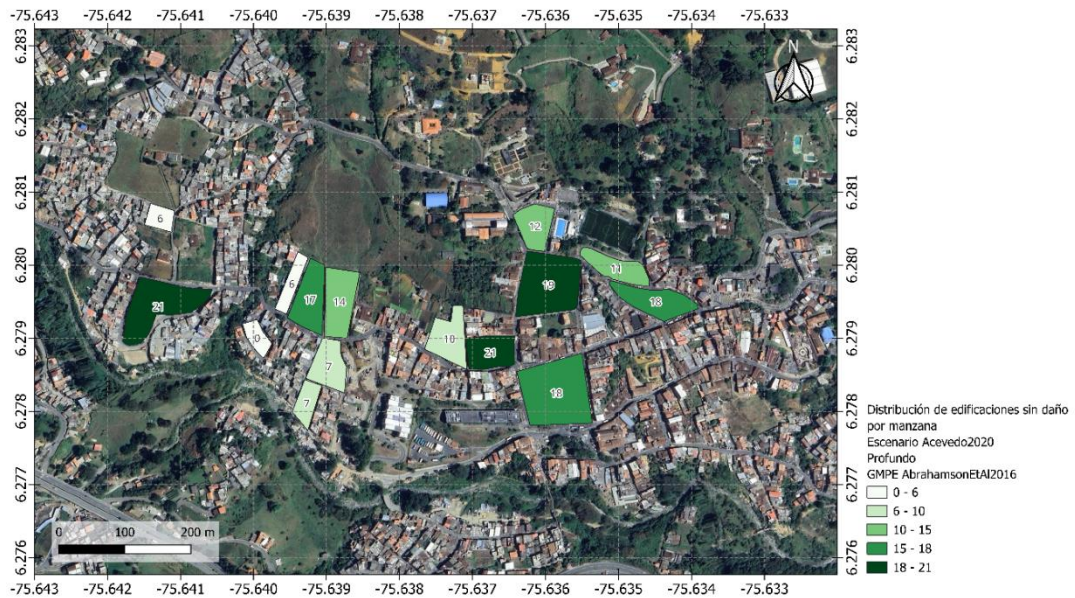
Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que no presentarían daños en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 28 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos completos por manzana y en la Figura A. 29 se tiene la distribución espacial de las edificaciones sin daños por manzana, considerando el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Abrahamson et al. (2016).

**Figura A. 28.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Abrahamson et al. (2016).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura A. 29.** Distribución de edificaciones sin daños por manzana para el escenario definido Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Abrahamson et al. (2016).

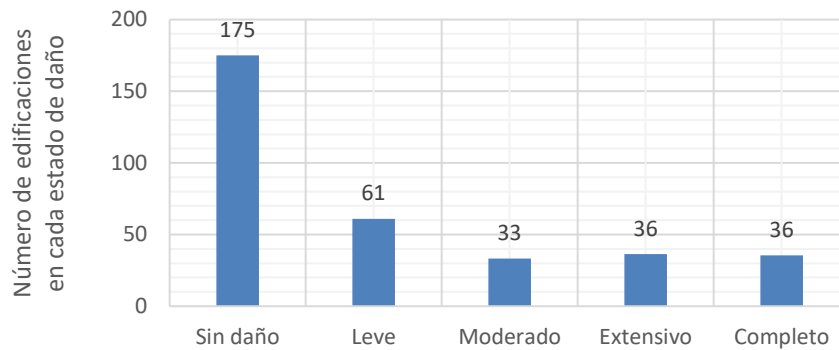


Fuente: Elaboración propia.

**GMPE de Montalva et al. (2017)**

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de Cauzzi et al. (2014) una estimación de aproximadamente 36 edificaciones [11%] sufrirían colapsos totales, 36 edificaciones [11%] presentarían daño extensivo, 33 edificaciones [10%] tendrían daños moderados, 61 edificaciones [18%] experimentarían daños leves y 175 edificaciones [51%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 30 Figura A. 17 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

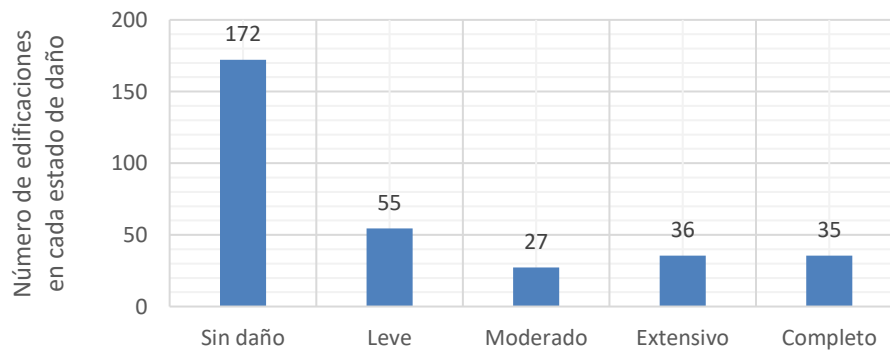
**Figura A. 30.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de Montalva et al. (2017).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 35 edificaciones [11%] colapsarían por completo, 36 edificaciones [11%] sufrirían daños extensivos, 27 edificaciones [8%] presentarían daños moderados, 55 edificaciones [17%] tendrían daños leves y 172 edificaciones [53%] no sufrirían daños. En la Figura A. 31 Figura A. 18 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

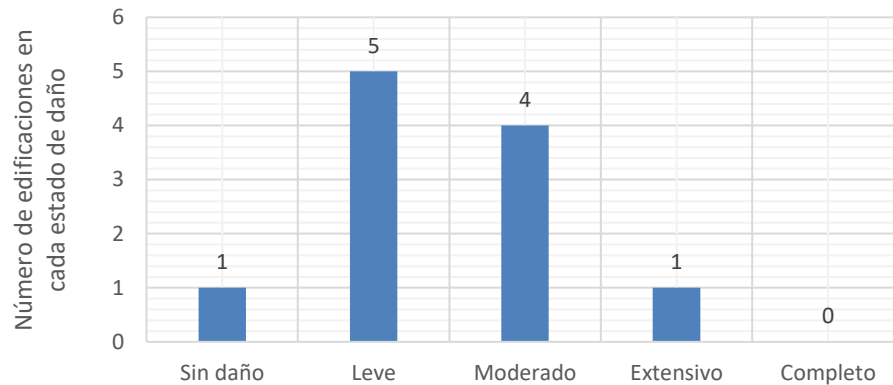
**Figura A. 31.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de Montalva et al. (2017) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente, 1 edificación [9%] tendría daños extensivos, 4 edificaciones [36%] presentarían daños moderados, 5 edificaciones [45%] tendrían daños leves y 1 edificación [9%] no presentaría daños. En la Figura A. 32 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería confinada para el este escenario de riesgo.

**Figura A. 32.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de Montalva et al. (2017) en edificaciones de mampostería confinada.

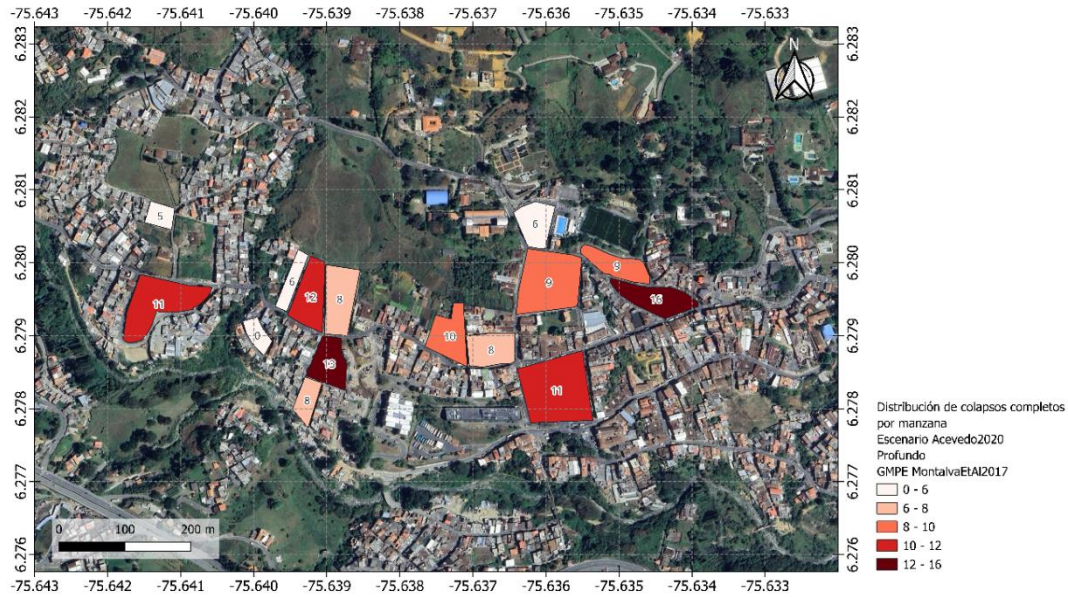


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño leve en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de Montalva et al. (2017). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que sufrirían daños moderados.

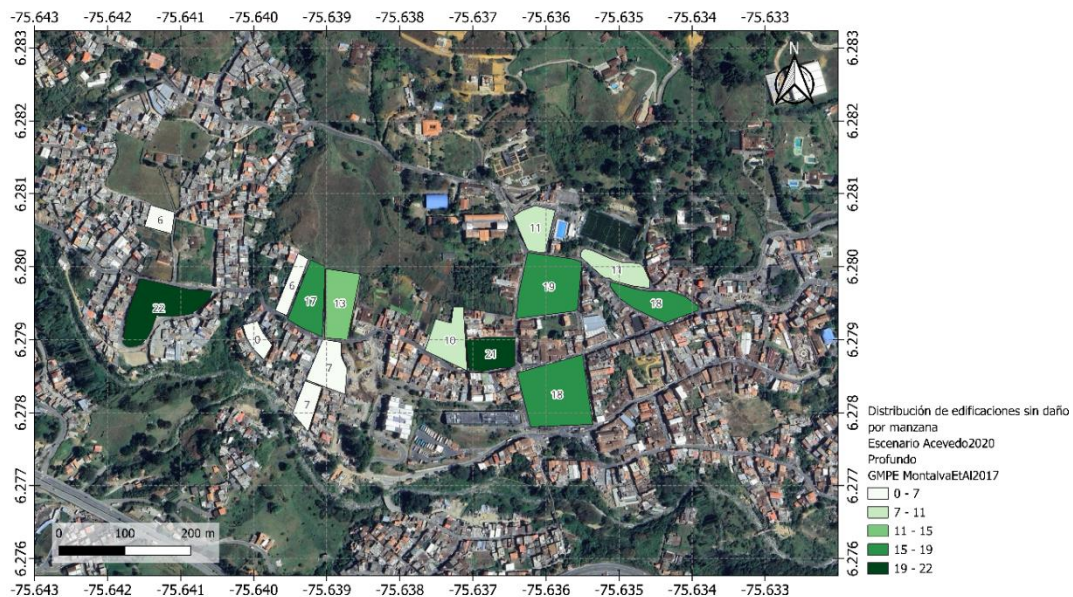
Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que no presentarían daños en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 33 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos completos por manzana y en la Figura A. 34 se tiene la distribución espacial de las edificaciones sin daños por manzana, considerando el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Montalva et al. (2017).

**Figura A. 33.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Montalva et al. (2017).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura A. 34.** Distribución de edificaciones sin daños por manzana para el escenario definido Acevedo et al. (2020) y la GMPE de Montalva et al. (2017).

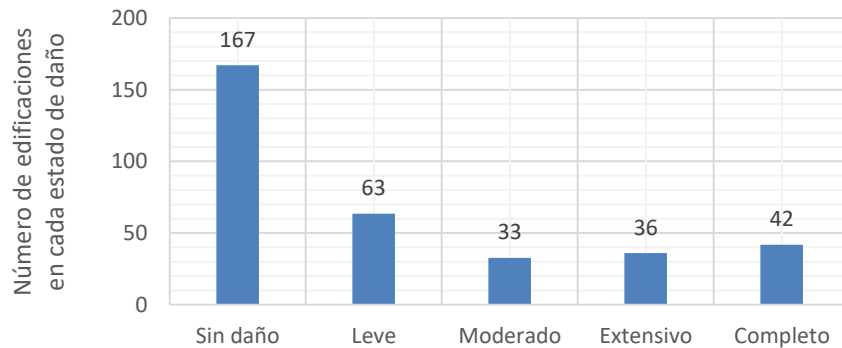


Fuente: Elaboración propia.

**GMPE de J. X. Zhao et al. (2006)**

Se tiene que, para este escenario de riesgo con la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006) una estimación de aproximadamente 42 edificaciones [12%] sufrirían colapsos totales, 36 edificaciones [11%] presentarían daño extensivo, 33 edificaciones [10%] tendrían daños moderados, 63 edificaciones [18%] experimentarían daños leves y 167 edificaciones [49%] no resultarían afectadas. En la Figura A. 35 se presenta la distribución de daño en las edificaciones de la zona de estudio para este escenario sísmico.

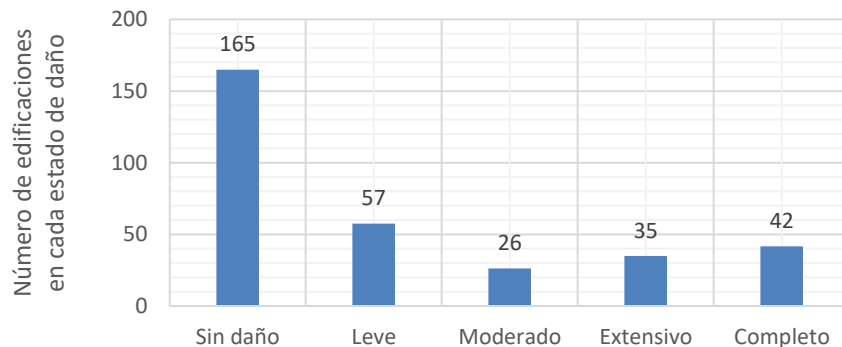
**Figura A. 35.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006).



Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las edificaciones de mampostería no reforzada, los resultados muestran que alrededor de 42 edificaciones [13%] colapsarían por completo, 35 edificaciones [11%] sufrirían daños extensivos, 26 edificaciones [8%] presentarían daños moderados, 57 edificaciones [18%] tendrían daños leves y 165 edificaciones [51%] no sufrirían daños. En la Figura A. 36 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería no reforzada en este escenario de riesgo.

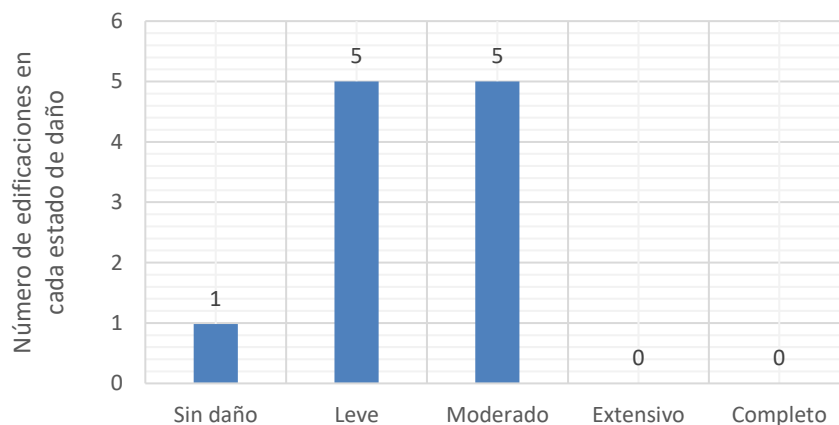
**Figura A. 36.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006) en edificaciones de mampostería no reforzada.



Fuente: Elaboración propia.

Para las edificaciones de mampostería confinada, los resultados indican que ninguna edificación colapsaría completamente ni presentaría daños extensivos, 5 edificaciones [45%] sufrirían daños moderados, 5 edificaciones [45%] tendrían daños leves y 1 edificación [9%] no presentaría daños. En la Figura A. 37Figura A. 23Figura A. 11 se presenta la distribución de daños para las edificaciones de mampostería reforzada para el este escenario de riesgo.

**Figura A. 37.** Distribución de daños para el escenario de riesgo definido por Acevedo et al. (2020) en el ambiente profundo con la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006) en edificaciones de mampostería confinada.



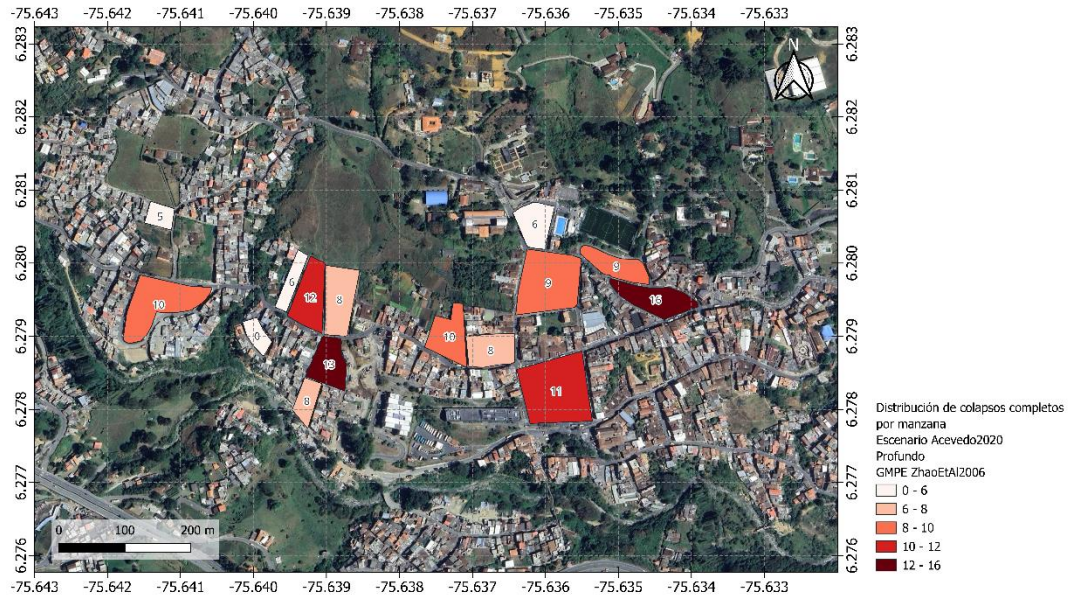
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la tipología estructural de mampostería reforzada, el modelo de exposición sísmica registra una única edificación, la cual presentaría un daño leve en el escenario de riesgo sísmico modelado con la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006). Para la tipología constructiva de concreto reforzado, el modelo de exposición sísmica registra tres edificaciones que presentarían daños moderados.

Con esta información es posible identificar la cantidad de edificaciones que no presentarían daños en cada uno de los polígonos estudiados, así, la Figura A. 38 presenta la distribución espacial de las edificaciones con colapsos completos por manzana y en la Figura A. 39 se tiene la distribución espacial de las edificaciones sin daños por manzana, considerando el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006).

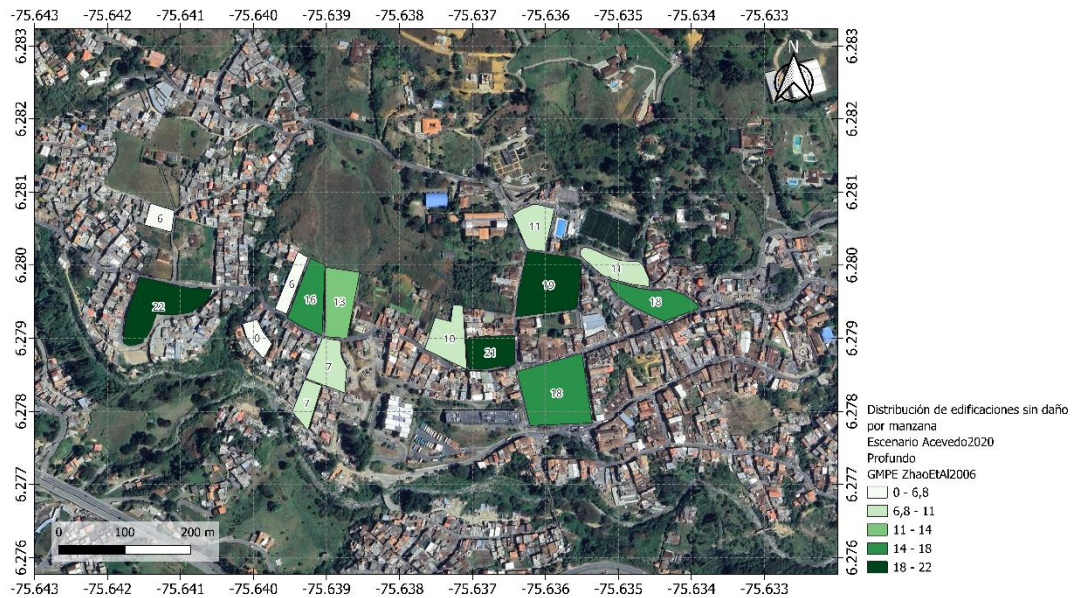
Observando la distribución de daños de los escenarios de riesgo en los ambientes tectónicos superficial y profundo, es posible concluir que este escenario tendría comportamientos similares en cuanto a los daños presentados en las edificaciones, estando por debajo de los daños que podrían ser generados por el escenario de riesgo definido por el PMGRD.

**Figura A. 38.** Distribución de edificaciones con colapsos totales por manzana para el escenario definido por Acevedo et al. (2020) y la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura A. 39.** Distribución de edificaciones sin daños por manzana para el escenario definido Acevedo et al. (2020) y la GMPE de J. X. Zhao et al. (2006).



Fuente: Elaboración propia.

## **B. Formularios del Plan Familiar de Respuesta a Emergencias causadas por Eventos Sísmicos.**

En el Anexo B se incluyen los formularios necesarios para la correcta formulación del plan familiar de emergencias frente a la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos documentos están diseñados para guiar el proceso de planificación, facilitando la identificación de factores de riesgo, la definición de roles, la organización de recursos y la estructuración de las acciones a seguir antes, durante y después de la ocurrencia de un sismo.

Los formularios del plan familiar de respuesta a emergencias causadas por eventos sísmicos contiene la caracterización del grupo familiar y las mascotas que lo conforman, así como los factores de riesgo que incluyen la identificación de amenazas al interior de la vivienda y la evaluación de la vulnerabilidad física, abordando criterios como los aspectos geométricos, constructivos y estructurales, suelo y entorno; finalmente incorpora el formulario para la construcción de un directorio de familiares y amigos de apoyo y organismos de respuesta.

Este anexo puede ser consultado en el repositorio institucional.

[Anexo B. Formularios del Plan de Respuesta a emergencias causadas por eventos sísmicos.](#)

## Bibliografía

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44.
- Abrahamson, N., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025–1055. <https://doi.org/10.1193/070913EQS198M>
- Acevedo, A. B., Jaramillo, J. D., Yepes, C., Silva, V., Osorio, F. A., & Villar, M. (2017). Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia. *Natural Hazards*, 86, 31–54. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2647-8>
- Acevedo, A. B., Yepes-Estrada, C., González, D., Silva, V., Mora, M., Arcila, M., & Posada, G. (2020). Seismic risk assessment for the residential buildings of the major three cities in Colombia: Bogotá, Medellín, and Cali. *Earthquake Spectra*, 36(1\_suppl), 298–320. <https://doi.org/10.1177/8755293020942537>
- Aguiar, R., & Bobadilla, C. (2006). Curvas de fragilidad para estructuras de hormigón armado y comparación con HAZUS. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(1), 49–58.
- Alam, N., Alam, M. S., & Tesfamariam, S. (2012). Buildings' seismic vulnerability assessment methods: A comparative study. *Natural Hazards*, 62(2), 405–424. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0082-4>
- Alcaldía de Medellín. (2014). *Cuentas Claras Corregimiento 60 San Cristóbal*.
- Alcaldía de Medellín. (2020). *Comuna 60: San Cristóbal. Ficha de Caracterización*.
- Alcaldía de Medellín. (2024a). *MapGis9*. MapGis9. [https://www.medellin.gov.co/mapgis9/mapa.jsp?aplicacion=1&css=css/app\\_mapas\\_medellin.css](https://www.medellin.gov.co/mapgis9/mapa.jsp?aplicacion=1&css=css/app_mapas_medellin.css)
- Alcaldía de Medellín. (2024b, May 19). *Alcaldía de Medellín*. Proyecciones (Población, Viviendas y Hogares). <https://www.medellin.gov.co/es/centro-documental/proyecciones-poblacion-viviendas-y-hogares/>
- Alcaldía de Sabaneta. (2022). *Preparación de las comunidades para la respuesta a emergencias y desastres*.

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismorresistente de edificaciones*.
- Aldama Ojeda, A., Gómez Soberón, C., & Guillén López, B. (2008). Elaboración de una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 15(1), 41–48.
- Alonzo Hernández, R. A., & Martínez Díaz, M. E. (2018). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería de uno y dos niveles a través de curvas de capacidad y fragilidad*. Universidad de El Salvador.
- Amaya Correa, J. E. (2012). *Gestión del riesgo sísmico en Medellín. Alistamiento y resiliencia de la ciudad frente a un terremoto*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Arango, M., & Velásquez, Andrés. (1993). *Catálogo sísmico para Medellín*.
- Arcila, M., García, J., Montejó, J. S., Eraso, J., Valcárcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagni, M., & Díaz, F. (2020). Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. In Servicio Geológico Colombiano & Fundación Global Earthquake Model (Eds.), *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585279469>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2006). *Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá*.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2012). *Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el norte del Valle de Aburrá*. [www.udea.edu.co/](http://www.udea.edu.co/)
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2016). *Armonización de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá, e inclusión de los corregimientos de Medellín*.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2023). *Plan Metropolitano de Gestión del Riesgo Sísmico*.
- Arroyo-Solórzano, M. (2023). Riesgo sísmico ante terremotos potencialmente perjudiciales en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM). *Revista Geológica de América Central*, 69, 1–33. <https://doi.org/10.15517/rgac.2023.54878>
- Ashraf, M., Khan, A. N., Naseer, A., Ali, Q., & Alam, B. (2012). Seismic behavior of unreinforced and confined brick masonry walls before and after ferrocement overlay retrofitting. *International Journal of Architectural Heritage*, 6(6), 665–688. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.599916>

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. (2011). *Guía de Patologías Constructivas, Estructurales y No Estructurales*.  
<http://www.asosismica.org><http://www.sire.gov.co>[www.conlospiesenlatierra.gov.co](http://www.conlospiesenlatierra.gov.co)[www.fopae.gov.co](http://www.fopae.gov.co)Evaluación de Daños <http://www.sire.gov.co/portal/page/portal/sire/componentes/EvaluacionDanos>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, & Comité AIS 400. (2023). *Evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería*.  
[www.asosismica.org.co](http://www.asosismica.org.co)
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero - FOREC. (2002). *Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismorresistente de viviendas de Mampostería*.
- Asociación Latinoamericana de Profesores de Medicina Familiar A.C. (2005). Conceptos básicos para el estudio de las familias. *Archivos En Medicina Familiar*, 7(1).
- Assatourians, K., & Atkinson, G. M. (2013). EqHaz: An open-source probabilistic seismic-hazard code based on the Monte Carlo simulation approach. *Seismological Research Letters*, 84(3), 516–524. <https://doi.org/10.1785/0220120102>
- Banerjee, S., Nayak, S., & Das, S. (2019). Enhancing the flexural behaviour of masonry wallet using PP band and steel wire mesh. *Construction and Building Materials*, 194, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.001>
- Bender, B., & Perkins, D. M. (1982). *SEISRISK II A computer program for seismic hazard estimation*.
- Bender, B., & Perkins, D. M. (1987). *SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation*.
- Benito, B., & Cabañas, L. (1999). Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica. *Física de La Tierra*, 11, 49–79.
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación. Administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (Tercera edición). Pearson Education S.A.
- Bernal, G., Cardona, O. D., Salgado, M. A., & Villegas, C. (2015, May 27). Actualización de la microzonificación sísmica de Manizales. *VII Congreso Nacional Ingeniería Sísmica*. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>
- Bhattacharya, S., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2014). A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures. In *International Journal of Disaster Risk Reduction* (Vol. 7, pp. 51–67). <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.12.004>

- Bird, J. F., & Bommer, J. J. (2004). Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75(2), 147–179. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2004.05.006>
- Bommer, J. J. (2002). Deterministic Vs. Probabilistic Seismic Hazard Assessment: An Exaggerated and Obstructive Dichotomy. *Journal of Earthquake Engineering*, 06(spec01), 43–73. <https://doi.org/10.1142/S1363246902000644>
- Bonett Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Boore, D. M., & Bommer, J. J. (2004). Engineering seismology. *Encyclopedia of Geology*, 499–515.
- 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 2013-02 V1.0.0*. <https://doi.org/10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>.
- Build Change, & Swisscontact. (2015). *Manual de Evaluación y Reforzamiento Sísmico para Reducción de Vulnerabilidad en Viviendas*.
- Caballero Acosta, J. H. (2014). Los temblores de 1730; sismos olvidados que afectaron a Medellín. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 36, 69–70. <https://doi.org/10.15446/rbct.n36.47639>
- Cabrera Cárdenas, M. C., Jiménez Prieto, A. J., Camargo Garcés, J. A., & Coronado Neira, M. (2021). *Estudio patológico de Bodega París Gaitán ubicado en la Carrera 86 No. 86 - 34 - Localidad de Engativá en la ciudad de Bogotá D.C.*
- Cagua Gómez, B. J., Pilatasig Caizaguano, J. E., & Aguiar Falconí, R. R. (2023). Análisis Estático No Lineal de Pórticos de Acero empleando OpenSees y CEINCI LAB. *Latin-American Journal of Computing*, 10(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7504018>
- Caicedo, C., Barbat, A. H., Canas, J. A., & Aguiar, R. (1994). *Vulnerabilidad sísmica de edificios* (A. H. Barbat, Ed.).
- Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., & Bianchini, A. (2014). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(6), 1587–1612. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9685-y>
- CENAPRED México, & CONACYT. (2018). *Estrategias para la reducción del riesgo sísmico en México*.

- Cevallos-Velásquez, O. A., Guerra-Valladares, M. D., Marcillo-Zapata, C. A., & Quinatoa-Martínez, J. G. (2024). Evolución histórica de las normativas de diseño sismorresistente en América Latina. Casos de estudio: Colombia, Ecuador, Perú, Chile. *Revista Científica "INGENIAR": Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 7(13). <https://doi.org/10.46296/ig.v7i13edespjun.0195>
- Chicaiza Puchaicela, M. D. (2017). *Modelo de Exposición y Mapa de Vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. Escuela Politécnica Nacional.
- Coburn, Andrew., & Spence, R. J. S. . (2002). *Earthquake protection*. J. Wiley.
- Construyendo Seguro. (2024a). *Consejos para construir dinteles bien hechos*. <https://www.construyendoseguro.com/consejos-para-construir-dinteles-bien-hechos/>
- Construyendo Seguro. (2024b). *¿Sabes cómo reforzar columnas estructurales?* <https://www.construyendoseguro.com/sabes-como-reforzar-las-columnas-estructurales/>
- Contreras Condori, A. F., & Pérez Laos, R. K. (2021). *Estudio comparativo entre el sistema de muros de ductilidad limitada y albañilería confinada en una edificación de 5 pisos, Distrito de Los Olivos*. Universidad Ricardo Palma.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606.
- Coronel-Delgado, G. (2016, November 14). Exposición a la Amenaza Sísmica de las Edificaciones Residenciales en el Área Metropolitana de Caracas. *Jornadas de Investigación - Encuentro Académico Industrial*. <http://www.ing.ucv.ve>
- Corporación Penca de Sábila. (2006). *Formulación del Plan de Desarrollo Corregimental de San Cristóbal 2006-2016*.
- Crowley, H., Polidoro, B., Pinho, R., & Van Elk, J. (2017). Framework for developing fragility and consequence models for local personal risk. *Earthquake Spectra*, 33(4), 1325–1345. <https://doi.org/10.1193/083116EQS140M>
- D 'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., & Silva, V. (2015). *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment - Low/Mid - Rise*. GEM Technical Report 2015-08 v1.0.0. <https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12>
- DANE. (2024). *Estratificación socioeconómica*.
- del Río Bueno, A. (2004). *Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación*.

- Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD. (2016). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. Medellín 2015 - 2030*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda*.
- Dinamité, C., Drake, L., Yepes, H., Ocola, L., Rendon, H., Grünthal, G., & Giardini, D. (1999). Seismic hazard assessment in the Northern Andes (PILOTO Project). *Annali Di Geofisica*, 42(6).
- Drougkas, A., Sarhosis, V., Basheer, M., D'Alessandro, A., & Ubertini, F. (2023). Design of a smart lime mortar with conductive micro and nano fillers for structural health monitoring. *Construction and Building Materials*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130024>
- Ecos Vásquez, J. I., & Villegas Espinoza, K. R. (2022). *Reforzamiento estructural con mallas ecológicas para muros de adobe en viviendas de San Pedro de Huacarpana, Chincha, Ica, 2022*. Universidad César Vallejo.
- EcuRed. (2019). *Estructuras (Construcción)*. Estructuras (Construcción).
- Eraso, J., & Montejó, J. (2019). *Mapa de Vs30 Integrado para Colombia*.
- Espinoza Malpartida, N. S. (2019). *La informalidad en la construcción de viviendas de albañilería y su influencia en la vulnerabilidad sísmica en el Sector 4, Distrito de Amarilis - Huánuco - 2019*. Universidad de Huánuco.
- Esquivel, R. (2016). *Tipos de construcción. Ideas que construyen el mundo*. Tipos de Construcción. Ideas Que Construyen El Mundo.
- Estrada Santos, M. A., & Yoplac Carhuatanta, J. (2019). *Evaluación técnica y económica de reforzamiento estructural en vigas de concreto armado con fibras de carbono en el edificio multifamiliar Huaraz Breña - Lima 2019*. Universidad Ricardo Palma.
- Federal Emergency Management Agency. (1999). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model*. [www.msc.fema.gov](http://www.msc.fema.gov)
- Federal Emergency Management Agency. (2015). *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation*. Government Printing Office.
- Field, E. H., Jordan, T. H., & Cornell, C. A. (2003). OpenSHA: A Developing Community-modeling Environment for Seismic Hazard Analysis. *Seismological Research Letters*, 74(4), 406–419. <https://doi.org/10.1785/gssrl.74.4.406>

- Fikri, R., & Ingham, J. (2022). Seismic response and aftershock fragility curves for Non-ductile Mid-rise buildings comprised of reinforced concrete frame with masonry infill. *Structures*, 45, 1688–1700. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.108>
- Follador, V., Donà, M., Carpanese, P., Saler, E., D'Alpaos, C., & da Porto, F. (2024). Seismic retrofit cost model for Italian masonry residential buildings to support territorial-scale risk analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104373>
- Fondo Adaptación, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, CORANTIOQUIA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & CORNARE. (2016). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá*.
- Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE. (2014). *Guía para el desarrollo de simulaciones*.
- Fundación Universitaria Los Libertadores. (2021). *Guía para elaboración de plan de emergencias familiar*.
- Furtado, A., Rodrigues, H., Arède, A., & Varum, H. (2021). A Review of the Performance of Infilled RC Structures in Recent Earthquakes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/app11135889>
- Galán Galdámez, O. E., & Samayoa Escalante, J. C. (2020). *Desarrollo de curvas de fragilidad y vulnerabilidad para edificaciones de mampostería reforzada de un nivel*. Universidad de El Salvador.
- Gamba Tiusaba, C. F. (2019). *Reforzamiento por una cara de muros de mampostería de arcilla con unidades de perforación horizontal*. Universidad Nacional de Colombia.
- García, L. E. (2014). Desarrollo de la normativa sismorresistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición. *Revista de Ingeniería*, 41, 71–77. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i41.785>
- García-Pelaez, J. (2020). *Datasets and hazard models for urban seismic hazard assessment in the TREQ cities. GEM - TREQ project technical report, deliverable D.2.2.1., v1.0.0*. <http://www.globalquakemodel.org/>
- Garzón Andrade, A. L. (2020). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Aplicación a edificios convencionales, de especial importancia y esenciales*. Escola de Camins.
- Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Iqbal, A., & Kaufmann, W. (2023). Structural behaviour of post-installed reinforcement for 3D concrete printed shells – A case study on water tanks. *Construction and Building Materials*, 366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130163>

- GEM Global Earthquake Model. (2020). *OpenQuake - Movimiento del Terreno: Marco Teórico*. OpenQuake - Movimiento del Terreno: Marco Teórico
- GEM Secretariat. (2015). *South America Risk Assessment (SARA) Final Report 2015, Version 1.0*. [www.globalquakemodel.org](http://www.globalquakemodel.org)
- Gómez Zuluaga, C. A., Zapata Trujillo, K. J., Cañola Cañola, H. D., & Arroyave Rojas, J. A. (2017). *Guía para realizar inspecciones técnicas en viviendas de uno y dos niveles de mampostería no reforzada en el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGR)*. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.
- González, H. (2001). *Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Escala 1:400.000*.
- González-González, D. (2017). *Modelo de exposición sísmica de viviendas de Medellín*. Universidad EAFIT.
- Google Streetview. (2023). *Fotografías recorrido virtual Google Streetview*.
- Grupo de Prevención y Acción Integral. (2020). *Plan Familiar de Emergencia - Cartilla Guía*.
- Grupo de sismología de Medellín. (2002). *Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá*.
- Henaó Trujillo, L., & Sánchez Uribe, N. (2023). *Construcción informal en Colombia: causas, características y efectos socioeconómicos; ambientales y jurídicos de una problemática latente*.
- Hénder Puerto, P. A. (2013). *Reforzamiento estructural sismorresistente de viviendas informales en Bogotá*.
- Hernández Carvajal, Y. C. (2022). *Viabilidad del uso de bandas de PP en el reforzamiento de muros de mampostería no reforzada*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición). McGrawHill.
- Hidalgo López, O. (1981). *Manual de construcción con bambú* (Estudios Técnicos Colombianos Ltda., Ed.).
- Hincapié A., J. E., Osorio M., R., Jaramillo Fernández, J. D., & Ortega P., D. C. (1994). *Estudio de la amenaza, zonificación, análisis y vulnerabilidad sísmica para Medellín*.

- Hinestroza Farfán, J. C. (2018). *Evaluación del riesgo sísmico de viviendas de Barrancabermeja (Colombia)*. Universidad EAFIT.
- Hosseinpour, V., Saeidi, A., Nollet, M. J., & Nastev, M. (2021). Seismic loss estimation software: A comprehensive review of risk assessment steps, software development and limitations. *Engineering Structures*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111866>
- Idriss, I. M. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155–1177. <https://doi.org/10.1193/070613EQS195M>
- Ingeniería Técnica y Científica, & Banco Mundial. (2013). *Evaluación y análisis del riesgo catastrófico en Colombia para el programa de financiamiento y aseguramiento del riesgo de desastre*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS. (2005). *Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali*.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER. (2016). *Caracterización General del Escenario de Riesgo Sísmico*. Caracterización General Del Escenario de Riesgo Sísmico.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2013). *Plan familiar de emergencia “La Seguridad Empieza en Casa.”*
- Jaldin Vásquez, A. R. (2013). *Mejora del proceso de respuesta durante la gestión de catástrofes*. Universidad de Chile.
- Juárez Tejada, V. L. (2024). *Análisis y diseño estructural de un edificio multifamiliar de 8 pisos con y sin junta sísmica* [Universidad Católica de Santa María]. [www.gob.pe](http://www.gob.pe)
- Kappos, A. J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., & Penelis, G. (2006). A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 391–413. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9023-0>
- Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). The seismic vulnerability assessment methodologies: A state-of-the-art review. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 849–864. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.001>
- Keshmiry, A., Hassani, S., Dackermann, U., & Li, J. (2024). Assessment, repair, and retrofitting of masonry structures: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137380>

- Kloft, H., Empelmann, M., Hack, N., Herrmann, E., & Lowke, D. (2020). Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing . *Civil Engineering Design*, 2(4), 131–139. <https://doi.org/10.1002/cend.202000022>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* (Prentice-Hall, Ed.).
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., & Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, 1787–1799. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>
- Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>
- Ley 142. (1994). *Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.*
- Ley 1523, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones (2012).
- Mahesh, J. V., Ramya, S., Sreedhara, B. M., & Raveesh, R. M. (2023). Bond strength characteristics of masonry using hemp fibre and chicken mesh reinforced mortar. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.704>
- Maldonado Rondón, E., Chio Cho, G., & Gómez Araujo, I. (2007). Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos. *Ing. Univ. Bogotá (Colombia)*, 1(2), 149–168.
- Martín Sendra, A. (2020). *Estudio comparativo de fibras naturales para reforzar hormigón*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez Rodríguez, J. M., Bustamante Pérez, M., Cardona Arboleda, O. D., Forero Dueñas, C. A., Jaramillo Fernández, J. D., París Q., G., & Parra P., E. (1994). *Los sismos del Atrato Medio 17 y 18 de octubre de 1992 noroccidente de Colombia*.
- Martínez Rueda, S. (2008). *Guía para la Elaboración de Planes Comunitarios para la Gestión del Riesgo*.
- Martínez Rueda, S., Duarte Mateus, L. H., & Pineda González, N. T. (2024). *Guía Metodológica para el Desarrollo de Simulaciones y Simulacros*. [www.gestiondelriesgo.gov.co](http://www.gestiondelriesgo.gov.co)

- Marulanda, M. C., Cardona, O. D., Mora, M. G., & Barbat, A. H. (2015, May 27). Aseguramiento colectivo voluntario en Manizales: Evaluación del riesgo sísmico con fines de transferencia. *VII Congreso Nacional Ingeniería Sísmica*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3526.1604>
- Mayorca, P., Navaratnaraj, S., & Meguro, K. (2006). *Report on the state-of-the-art in the seismic retrofitting of unreinforced masonry houses by PP-Band meshes*.
- McGuire, R. K. (1976). *FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis*.
- McGuire, R. K. (1978). *FRISK: Computer Program For Seismic Risk Analysis Using Faults as Earthquake Sources*.
- Mercedes, L., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2020). In-plane cyclic loading of masonry walls strengthened by vegetal-fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Engineering Structures*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111097>
- Meza Fajardo, K., Blázquez, A., González-Drigo, R., Lantada, N., & Pujades, L. (2022). *Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios*.
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente*.
- Monelli, D., Pagani, M., Weatherill, G., Silva, V., & Crowley, H. (2012). The hazard component of OpenQuake: The calculation engine of the Global Earthquake Model. *15th World Conference on Earthquake Engineering*. <https://github.com/gem/opensha>,
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901–911. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- Moreno González, R., & Bairán García, J. M. (2010). Curvas de fragilidad para evaluar el daño sísmico en edificios de concreto armado con losas reticulares. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 25(4), 61–71. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652010000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652010000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Murillo Carranza, E. S. (2021). *Evaluación estructural y alternativa de reforzamiento de una vivienda multifamiliar de albañilería confinada, Los Limoncillos, Los Olivos, Lima - 2019*. Universidad César Vallejo.
- Nayak, S., & Dutta, S. C. (2016). Failure of masonry structures in earthquake: A few simple cost effective techniques as possible solutions. *Engineering Structures*, 106, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.014>

- Neuta-Neuta, R. (2024). *Evaluación del uso de morteros reforzados con fibras de algodón como estrategia para la disminución de la vulnerabilidad sísmica de vivienda informal construida con mampostería simple en Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.
- New Zealand Standards Executive. (2006). *New Zealand Standard. Concrete structures standard. NZS 3101:2006*. Standards New Zealand.
- Newman, J. P., Maier, H. R., Riddell, G. A., Zecchin, A. C., Daniell, J. E., Schaefer, A. M., van Delden, H., Khazai, B., O'Flaherty, M. J., & Newland, C. P. (2017). Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions. *Environmental Modelling and Software*, 96, 378–409. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.042>
- Ochoa Márquez, V., & Daza Contreras, E. J. (2019). *Dinámica, morfología e impactos en las obras de ingeniería en el cauce de la quebrada La Iguaná de la ciudad de Medellín*. Universidad EAFIT.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres - UNDRR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*.
- Oficina Nacional de Emergencia. (2015). *Plan Familia Preparada*.
- Ordaz, M. G., Darío Cardona, O., Salgado Gálvez, M. A., Bernal Granados, G. A., Krishna Singh, S., & Zuloaga Romero, D. (2015, May 27). *Evaluación probabilista de la amenaza sísmica a nivel mundial*.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Meletti, C., & D'Amico, V. (2013). CRISIS2008: A flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assessment. *Seismological Research Letters*, 84(3), 495–504. <https://doi.org/10.1785/0220120067>
- Organización de las Naciones Unidas. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
- Ortega, C. (2023). *¿Qué es la metodología de la investigación? ¿Qué Es La Metodología de La Investigación?*
- Osorio Vergara, F. A. (2015). *Modelo de exposición sísmica de viviendas del departamento de Antioquia, Colombia*. Universidad EAFIT.
- Osorio Vergara, F. A. (2024). *Fragilidad sísmica de las edificaciones de uno y dos pisos de mampostería no reforzada del Valle de Aburrá (Colombia)*. Universidad EAFIT.

- Ospina Molina, E. H., & Castrillón Arenas, R. A. (2021). *Alternativas de mejoramiento para reparaciones y reforzamientos de estructuras en concreto reforzado. Una revisión de literatura*. Universidad de Antioquia.
- 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. *Seismological Research Letters*, 85(3), 692–702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>
- Parra Sánchez, B. H. (2022). *Manizales, una experiencia de transferencia del riesgo de la ciudad a favor del desarrollo sostenible*. [www.gestiondelriesgo.gov.co](http://www.gestiondelriesgo.gov.co)
- Pérez Huaman, J. C., & Saona Rojas, D. N. (2023). *Propuesta de utilización de muretes prefabricados reforzados con bambú tipo guadua angustifolia como alternativa estructural de los muretes no portantes de albañilería confinada en el Distrito de Comas*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., Mueller, C. S., & Shumway, A. M. (2018). Seismic Hazard, Risk, and Design for South America. *Bulletin of the Seismological Society of America Search Dropdown Menu*, 108(2), 781–800.
- Pinto, P., Giannini, R., Franchin, P., & Fardis, M. (2005). Seismic Reliability Analysis of Structures. *Journal of Earthquake Engineering - J EARTHQU ENG*, 9, 943. <https://doi.org/10.1080/13632460509350573>
- Pontificia Universidad Javeriana. (2013). *Cartilla de Autoconstrucción para Vivienda de Uno y Dos pisos*.
- Programa PREPARE-USAID/OFDA. (2017). *Reporte final Fase I: Evaluación de Riesgo Sísmico*.
- Pulido, J. F., Yamin, L., & Rincón, R. (2015, May). Evaluación y análisis del riesgo en las principales ciudades de Colombia. *VII Congreso Nacional Ingeniería Sísmica*.
- Quiroz, L. G., & Maruyama, Y. (2014, August 24). Assessment of performance of Peruvian high-rise thin RC wall buildings using numerical fragility functions. *The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM14)*. <https://www.researchgate.net/publication/265253548>
- Ranjan, N., Banerjee, S., Nayak, S., & Das, S. (2023). Agro-waste fiber reinforced mortar for augmenting the performance of masonry structures. *Construction and Building Materials*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129848>

- Restrepo Isaza, D. (2014). El control de la construcción y el control urbano en Colombia: El caso Medellín y la Ruta Medellín Vivienda Segura 2014-2024; retos y oportunidades. *Revista de Ingeniería*, 41, 90–94.  
<https://doi.org/10.16924/riua.v0i41.789>
- Robayo, D., & Cano Vélez, D. (2015). *Divulgación de Plan de Emergencias. Corregimiento de San Cristóbal Sector Central, Medellín, Noviembre 2015*. Universidad CES.
- Robinson, G., Fulford, G., & Dhu, T. (2005). *EQRM: Geoscience Australia's Earthquake Risk Model*.
- Rodríguez Miranda, O. A. (2015). *Análisis y conceptos básicos para el diseño de mampostería estructural según la norma de sismorresistencia NSR-10*. Universidad Santo Tomás.
- Rojas Gil, R. J. (2010). *Curvas de fragilidad sísmica para edificios aporticados de concreto reforzado a poca altura*. Universidad Central de Venezuela.
- Rosales-Veítia, J. A., & Marcano-Montilla, A. (2023). Planes comunitarios de riesgos en Suramérica. Una revisión sistemática. *Revista Geográfica de América Central*, 1(70), 107–134. <https://doi.org/10.15359/rgac.70-1.4>
- Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D. N., & Maqsood, T. (2014). *Guidelines for empirical vulnerability assessment, GEM Technical Report 2014-08 V1.0.0*.  
<https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.11>.
- Sadek, D. M., & El-Attar, M. M. (2015). Structural behavior of rubberized masonry walls. *Journal of Cleaner Production*, 89, 174–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.098>
- Safina Melone, S. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Saldaña Rodríguez, J. A. (2022). *Verificación experimental de la estructura en un depósito de flujo de lodos del Valle de Aburrá*. Universidad EIA.  
<https://repository.eia.edu.co/handle/11190/5765>
- Salgado-Gálvez, M. A., Ordaz, M., Singh, S. K., Cardona, O. D., Reinoso, E., Aguado, A., Zuloaga, D., Huerta, B., & Bernal, G. (2018, June 18). Homogeneous and continuous probabilistic seismic hazard model for Latin America and The Caribbean. *16th European Conference on Earthquake Engineering*.

- Salvatierra Vega, B. B. (2019). *Aplicación del bambú en el reforzamiento del concreto para medir el comportamiento estructural de una vivienda de 2 pisos en Cañete - 2019*. Universidad César Vallejo.
- San Bartolomé, A., & Castro Morán, A. (2007). *Reparación de un muro de albañilería confinada*.
- San Bartolomé, Á., & Quiun, D. (2015). Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 30(1), 71–80.
- Sathiparan, N. (2020). State of art review on PP-band retrofitting for masonry structures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(2), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41062-020-00316-9>
- Savishinsky, J. (1985). Pets and Family Relationships Among Nursing Home Residents. *Marriage & Family Review*, 8(3–4), 109–134. [https://doi.org/10.1300/J002v08n03\\_09](https://doi.org/10.1300/J002v08n03_09)
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). *Catálogo Sísmico*.
- Silva, V., Amo-Oduro, D., Calderon, A., Costa, C., Dabbeek, J., Despotaki, V., Martins, L., Pagani, M., Rao, A., Simionato, M., Viganò, D., Yepes-Estrada, C., Acevedo, A., Crowley, H., Horspool, N., Jaiswal, K., Journeay, M., & Pittore, M. (2020). Development of a global seismic risk model. *Earthquake Spectra*, 36(1\_suppl), 372–394. <https://doi.org/10.1177/8755293019899953>
- Sinha, R., & Shiradhonkar, S. R. (2012). Seismic Damage Index for Classification of Structural Damage-Closing the Loop. *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres - SIMPAD. (1999). *Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín*.
- Soto Barraza, E. N. (2008). *Rehabilitación de estructuras de concreto*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Stamm, J., Aguilar de la Lama, L., & Lujan Menchaca, D. (n.d.). *Manual para la construcción con Bambú*.
- Stewart, J. P., Douglas, J., Javanbarg, M., Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Boore, D. M., Campbell, K. W., Delavaud, E., Erdik, M., & Stafford, P. J. (2015). Selection of ground motion prediction equations for the global earthquake model. *Earthquake Spectra*, 31(1), 19–45. <https://doi.org/10.1193/013013EQS017M>
- Sura. (2020). *Propuesta para la activación de cadena de llamadas*.

- Syiemiong, H., & Marthong, C. (2021). The effect of mortar grade on the out-of-plane behaviour of low-strength masonry wall strengthened with welded wire mesh. *Construction and Building Materials*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122393>
- Taipe Acosta, L. M. (2013). *Análisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador utilizando datos registrados durante el periodo 2000 - 2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos*. Escuela Politécnica Nacional.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Pearson Education S.A.
- UNGRD. (2013). *Guía Comunitaria para la Gestión del Riesgo de Desastres*. [www.tallercreativoaleida.com.co](http://www.tallercreativoaleida.com.co)
- UNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*.
- Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD. (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*.
- Universidad de los Andes. (2019). *Estudio del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá*.
- Universidad Libre. (n.d.). *Plan de Emergencias Familiar*.
- Vásquez, W. (2022). *Irregularidades en planta y elevación*.
- Vielma, J. C., Barbat, A. H., & Oller, S. (2008). Umbrales de daño para estados límite de edificios porticados de concretos armado diseñados conforme al ACI-318/IBC-2006. *Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 8(2), 119.
- Vilchez Conde, P., & Munuera Montero, P. (2010, January). *Construcción de viviendas con muros portantes*. Construcción de Viviendas Con Muros Portantes.
- Villa García, L. M. (2009). Errores en el diseño sismorresistente de estructuras de edificación. *Técnica Industrial*, 279.
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., Gustavo, C. D., & María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581–604. <https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>

- Yamín Lacouture, L. E., Phillips Bernal, C., Reyes Ortiz, J. C., & Ruíz Valencia Daniel. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes*, 20(2), 286–303.
- Yepes-Estrada, C., Calderón, A., Acevedo, A. B., & Perez, H. (2022). *Evaluación del riesgo sísmico para Santiago de Cali. GEM-TREQ Reporte Técnico D.2.6.2.*
- Yepes-Estrada, C., Silva, V., Valcárcel, J., Acevedo, A. B., Tarque, N., Hube, M. A., Coronel, G., & Santa María, H. (2017). Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment. *Earthquake Spectra*, 33(1), 299–322. <https://doi.org/10.1193/101915EQS155DP>
- Yépez, F., Barbat, A. H., & Canas, J. A. (1994). *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería.*
- Yépez, F., Barbat, A. H., & Canas, J. A. (1995). Simulación de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño para estudios de riesgo sísmico. *Física de La Tierra*, 7, 327–366.
- Zalamea León, E. (2013). Mampostería Postensada. Una alternativa constructiva para Ecuador y regiones sísmicas. *Estoa*, 3.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Usin Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913. <https://doi.org/10.1785/01200501522>
- Zhao, X., Copenhaver, K., Wang, L., Korey, M., Gardner, D. J., Li, K., Lamm, M. E., Kishore, V., Bhagia, S., Tajvidi, M., Tekinalp, H., Oyedeji, O., Wasti, S., Webb, E., Ragauskas, A. J., Zhu, H., Peter, W. H., & Ozcan, S. (2022). Recycling of natural fiber composites: Challenges and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105962>
- Zuluaga Sánchez, G. P. (2008). Dinámicas urbano-rurales en los bordes de la ciudad de Medellín. *Gestión y Ambiente*, 11(3), 161–172.