



**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE
VIVIENDAS DE BARRANCABERMEJA
(COLOMBIA)**

**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE VIVIENDAS DE
BARRANCABERMEJA (COLOMBIA)**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería

Realizado por
Juan Camilo Hinestroza Farfán

Asesor
Ana Beatriz Acevedo Jaramillo



Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
Noviembre, 2018

RESUMEN

Barrancabermeja se emplaza bajo un territorio influenciado por el potencial sísmico de fallas activas y el Nido de Bucaramanga (una de las zonas sísmicamente más activas de Colombia). La realidad sísmica de esta zona genera la necesidad de evaluar el riesgo sísmico con el objetivo de brindar parámetros, a entidades gestoras del riesgo, que permitan tomar acciones de prevención, preparación y mitigación del riesgo. El presente estudio aborda los tres parámetros principales del riesgo sísmico: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad.

Se desarrolló un modelo de exposición a partir de información cartográfica y encuestas, lo cual dio como resultado un inventario de estructuras residenciales con información de: Número de pisos, sistema de resistencia lateral, costo de reposición de cada edificio y área construida. Se realizaron 5,234 encuestas remotas, usando la herramienta Google Street View, y 2,423 encuestas presenciales. Se obtuvo un total de 54,232 construcciones residenciales, con un área construida de 5,567,123 m² y un costo de reposición de 4,324,469 millones de pesos colombianos (4.32 billones de COP).

La vulnerabilidad sísmica se representó por medio de curvas de fragilidad y modelos de consecuencias lo cual permitió determinar estados de daños y pérdidas económicas. Usando el programa OpenQuake y el modelo probabilístico de la amenaza sísmica del proyecto SARA (GEM, 2015), se realizó un análisis de eventos estocásticos lo cual arrojó una pérdida promedio anual esperada de 13,753 millones de pesos, correspondiente al 0.32% del costo de reposición de todas las viviendas de Barrancabermeja. Del análisis estocástico se seleccionaron tres escenarios de las dos fuentes sismogénicas de mayor influencia en la ciudad: Corteza superficial y subducción intraplaca. Para periodos de retorno de pérdidas (Trp) de 250, 500 y 1000 años, los escenarios de corteza superficial arrojaron pérdidas promedio del 3.83%, 12.09% y 14.41% del costo de reposición de viviendas, respectivamente, y colapsaron en promedio el 0.58%, 3.98% y 5.35% de las construcciones residenciales de la ciudad, respectivamente. Para los tres periodos de retorno mencionados, los escenarios de subducción intraplaca (asociados al Nido de Bucaramanga) generaron pérdidas promedio del 1.786%, 4.86% y 8.39%, y colapsaron el 0.32%, 1.19% y 2.84% de las viviendas, respectivamente.

Este trabajo consideró la variabilidad de los parámetros del modelo de exposición debido a la incertidumbre que existe al identificar la estructura de una edificación a partir de una inspección externa. Para considerar la variabilidad se seleccionó el modelo de exposición más probable, elegido por los encuestadores como el de mayor confiabilidad y, a partir de éste, se crearon 13 posibles modelos de exposición distintos. Se encontró que la mayor variación (respecto al modelo más probable) en los resultados del riesgo se da en aquellos modelos de exposición que consideran mayor cantidad de edificaciones con baja ductilidad, como los pórticos de concreto sin ingeniería, incrementando las pérdidas hasta en un +42.3% para escenarios con Trp=250 años y hasta un +8.0 % en la pérdida promedio anual esperada.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo brindado por el personal de Grupo Ingenium S.A.S quien contribuyo al desarrollo de la investigación y dio valiosos aportes para lograr los objetivos del trabajo. A la empresa Servicios de Análisis Geológicos Especiales (SAGGES S.A.S) por el aporte de información fundamental para el estudio.

A las profesoras Ana Beatriz Acevedo y Daniela González de la Universidad EAFIT por su constante asesoría.

A mi familia por el soporte que han brindado durante toda mi carrera profesional y a María Paula Urrego por su apoyo incondicional.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE IMÁGENES	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. RIESGO SÍSMICO.....	4
2.1. AMENAZA SÍSMICA.....	4
2.1.1. MODELO DE AMENAZA SÍSMICA.	6
2.1.2. EFECTOS DE SITIO.....	8
2.2. MODELO DE EXPOSICIÓN	11
2.2.1. RECOPIACIÓN DE DATOS	12
2.2.2. ESTUDIOS PREVIOS.....	15
2.2.3. CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS EXPUESTAS.	16
2.3. VULNERABILIDAD	23
2.3.1. ACEVEDO et al. (2017).	25
2.3.2. VILLAR-VEGA et al. (2017).....	26
2.3.3. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA), HAZUS–MH 2.1. (2015).....	27
2.3.4. MODELO DE CONSECUENCIAS	28
2.4. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO.....	29
3. DESARROLLO DEL MODELO DE EXPOSICIÓN.....	32
3.1. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	32
3.1.1. ZONAS HOMOGÉNEAS.....	32

3.1.2. ÁREA CONSTRUIDA	40
3.1.3. COSTOS DE REPOSICIÓN DE VIVIENDAS.	44
3.2. PROCESAMIENTO DE ENCUESTAS	45
3.2.1. DESARROLLO DE ENCUESTAS	45
3.2.2. MATRIZ DE DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES.	49
3.2.3. CANTIDAD DE CONSTRUCCIONES.	50
3.2.4. ÍNDICE DE CONSTRUCCIONES NO RESIDENCIALES (Iu)	51
3.3. RESULTADOS DEL MODELO DE EXPOSICIÓN INICIAL (M0)	52
3.4. VARIABILIDAD DEL MODELO DE EXPOSICIÓN.	54
3.4.1. CONFUSIÓN DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES	55
3.4.2. RESULTADO DE LOS MODELOS DE EXPOSICIÓN	59
4. SELECCIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD.	62
5. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO.....	66
5.1. RESULTADOS DEL RIESGO SÍSMICO USANDO MODELO DE EXPOSICIÓN MÁS PROBABLE	66
5.1.1. ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE EVENTOS SÍSMICOS	66
5.1.2. ANÁLISIS DE ESCENARIOS SÍSMICOS.....	67
5.2. VARIABILIDAD DE LAS MÉTRICAS DEL RIESGO AL CONSIDERAR LA INCERTIDUMBRE EN EL MODELO DE EXPOSICIÓN.....	79
5.2.1. VARIABILIDAD EN ESCENARIOS	79
5.2.2. VARIABILIDAD EN ANÁLISIS DE EVENTOS ESTOCÁSTICOS.....	91
6. CONCLUSIONES	93
7. REFERENCIAS.....	95
ANEXO A.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE) usadas en el modelo de amenaza sísmica del proyecto SARA.....	8
Tabla 2.2 Información cartográfica provista por catastro	12
Tabla 2.3 Estadísticas generales de cantidad de predios, áreas y avalúos catastrales.	15
Tabla 2.4 Nomenclatura GEM de las tipologías más comunes de edificios residenciales. .	16
Tabla 3.1 Código de estratos socioeconómicos.....	34
Tabla 3.2 Tipos de distribuciones en altura.....	34
Tabla 3.3 Códigos de usos de suelo.	37
Tabla 3.4 Zonas homogéneas de interés	39
Tabla 3.5 Índice de área ocupada del predio (Ioc).....	43
Tabla 3.6 Costo de reposición por estrato y por metro cuadrado (COP).	44
Tabla 3.7 Número de encuestas por zonas homogéneas.	48
Tabla 3.8 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E1,2/A1/MIX.....	50
Tabla 3.9 Índice de construcciones por predio.	51
Tabla 3.10 Índice de usos diferentes a residencias (Iu)	52
Tabla 3.11 Matriz de confusión de tipologías estructurales	56
Tabla 3.12 Primera y segunda opción de tipologías estructurales elegidas en las encuestas.	58
Tabla 4.1 Asignación de curvas de fragilidad a las taxonomías de viviendas encontradas en Barrancabermeja.	62
Tabla 5.1 Escenarios seleccionados.....	69
Tabla 5.2 Pérdidas como porcentaje del costo de reposición para escenarios de corteza superficial.	72

Tabla 5.3 Pérdidas como porcentaje del costo de reposición para escenarios de subducción intraplaca.	72
Tabla 5.4 Porcentaje de colapsos de edificaciones residenciales para escenarios de corteza superficial.	72
Tabla 5.5 Porcentaje de colapsos de edificaciones residenciales para escenarios de subducción intraplaca.	73
Tabla 5.6 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M2	82
Tabla 5.7 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M3	83
Tabla 5.8 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M5	84
Tabla 5.9 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M6	85
Tabla 5.10 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M7	86
Tabla 5.11 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M8	87
Tabla 5.12 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M9	87
Tabla 5.13 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M10	88
Tabla 5.14 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M11.	89
Tabla 5.15 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M12.	90
Tabla A.1 Distribución de taxonomías de zona homogénea E1,2/A1/COM. Modelo de exposición Inicial (M0).	98
Tabla A.2 Distribución de taxonomías de zona homogénea E1,2/A1/MIX. Modelo de exposición Inicial (M0).	98
Tabla A.3 Distribución de taxonomías de zona homogénea E1,2/A1/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).	99
Tabla A.4 Distribución de taxonomías de zona homogénea E3,4/A2/COM. Modelo de exposición Inicial (M0).	100
Tabla A.5 Distribución de taxonomías de zona homogénea E3,4/A1/MIX. Modelo de exposición Inicial (M0).	100

Tabla A.6 Distribución de taxonomías de zona homogénea E3,4/A1/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).	101
Tabla A.7 Distribución de taxonomías de zona homogénea E3,4/A2/MIX. Modelo de exposición Inicial (M0).	101
Tabla A.8 Distribución de taxonomías de zona homogénea E3,4/A2/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).	102
Tabla A.9 Distribución de taxonomías de zona homogénea E3,4/A2/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Registro de eventos sísmicos según catálogo compilado.....	2
Figura 2.1 Distribución espacial de catálogo de eventos sísmicos alrededor de la zona de estudio.....	5
Figura 2.2 Eventos sísmicos según la profundidad (km)	6
Figura 2.3 Mapa de velocidad de onda de corte a 30 m de profundidad para Colombia, basado en el gradiente topográfico a partir de un SRTM de 7.5 arcosegundos.	10
Figura 2.4 Vs30 (m/s) de corregimientos de Barrancabermeja.	11
Figura 2.5 Curva de fragilidad de mampostería no reforzada de un nivel (MUR/LWAL+DNO/HEX:1).	25
Figura 2.6 Curva de fragilidad de pórticos de concreto reforzado, no dúctiles, de 3 niveles (CR/LFINF+DNO/HEX:3).....	27
Figura 2.7 Curva de fragilidad de edificios de muros de concreto reforzado entre 8 y 19 pisos.	28
Figura 2.8 Curva de vulnerabilidad de mampostería simple de 1 a 6 pisos.	29
Figura 3.1 Distribución de estratos socioeconómicos de los barrios de la zona urbana.	33
Figura 3.2 Distribuciones en altura de los barrios.	35
Figura 3.3 Usos de suelo de cada barrio.	36
Figura 3.4 Códigos de usos predominantes en cada barrio.	38
Figura 3.5 Mapa de zonas homogéneas.	39
Figura 3.6 Cantidad de barrios asignados para cada zona homogénea.	40
Figura 3.7 Identificación de lotes no residenciales.	41
Figura 3.8 Lotes vacíos e invasiones.	42
Figura 3.9 Barrio con manzanas y predios uniformes (LU).....	42
Figura 3.10 Barrio con manzanas y predios irregulares (LIR).....	43

Figura 3.11 Barrio con manzanas y predios muy irregulares (LMIR).....	43
Figura 3.12 Visualización de Google Street View.	46
Figura 3.13 Distribución geográfica de encuestas en zona urbana.....	48
Figura 3.14 Encuestas de campo en los corregimientos	49
Figura 3.15 Tipologías estructurales seleccionadas en la opción más probable.	53
Figura 3.16 Costo de reposición (Millones de COP) del modelo de exposición M0.	53
Figura 3.17 Área construida (m ²) del modelo de exposición M0.....	54
Figura 3.18 Nivel de incertidumbre de los principales grupos estructurales.	55
Figura 3.19 Cantidad de edificios de cada modelo de exposición.....	60
Figura 3.20 Costo de reposición de modelos de exposición	60
Figura 3.21 Área construida de modelos de exposición.	61
Figura 5.1 Curva de excedencia de pérdidas (CEP).	67
Figura 5.2 Pérdidas asociadas a los tres periodos de retorno.	69
Figura 5.3 Mapa de localización de epicentros de escenarios.....	70
Figura 5.4 Pérdidas económicas para escenarios de Corteza superficial.	71
Figura 5.5 Pérdidas económicas de escenarios de subducción intraplaca.	71
Figura 5.6 Cantidad de edificios residenciales colapsados en escenarios de Corteza superficial.	71
Figura 5.7 Cantidad de edificios residenciales colapsados en escenarios de subducción intraplaca.	72
Figura 5.8 Cantidad de edificios con daños.	74
Figura 5.9 Porcentaje de estados de daño para cada grupo estructural.....	75
Figura 5.10 Mapa de colapsos de barrios.....	76
Figura 5.11 Mapa de pérdidas de barrios.	77

Figura 5.12 Mapa de pérdidas de corregimientos de Barrancabermeja y epicentros.	78
Figura 5.13 (a) Resultados de pérdidas totales para el escenario Cort-250. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.	80
Figura 5.14 (a) Resultados de pérdidas totales para el escenario Cort-500. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.	80
Figura 5.15 (a) Resultados de pérdidas totales para el escenario Cort-1000. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.	80
Figura 5.16 (a) Resultados de colapsos para el escenario Cort-250. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.	81
Figura 5.17 (a) Resultados de colapsos para el escenario Cort-500. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.	81
Figura 5.18 (a) Resultados de colapsos para el escenario Cort-1000. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.	81
Figura 5.19 Curvas de tasa de excedencia de pérdidas para los diferentes modelos de exposición. Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura 5.20 Pérdida promedio anual esperada de cada modelo de exposición (Porcentaje de costo de reposición). Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 5.21 Diferencia porcentual de pérdida promedio anual esperada. Fuente: Elaboración propia.	92

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 2.1 Construcción improvisada (UNK).....	17
Imagen 2.2 Muros de Bahareque	18
Imagen 2.3 Casa de mampostería confinada dúctil (Izquierda). Casa en mampostera confinada no dúctil (Derecha).	19
Imagen 2.4 Edificio en mampostería reforzada dúctil en Barrancabermeja.	20
Imagen 2.5 Mampostería no reforzada.....	20
Imagen 2.6 Muros vaciados en concreto reforzado.	21
Imagen 2.7 Pórticos de concreto reforzado con mampostería adosada dúctil (Izquierda), Pórticos de concreto reforzado con mampostería adosada no dúctil (Derecha).....	22
Imagen 2.8 Edificio con estructura dual.	23
Imagen 3.1 Ingenieros realizando encuestas de campo.	47

1. INTRODUCCIÓN

Barrancabermeja es conocida como la capital petrolera de Colombia, el segundo centro urbano del departamento de Santander y el séptimo municipio de influencia económica en Colombia tal como lo indica el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) tras elaborar el Indicador de Importancia Económica Relativa Municipal (IIERM; DANE, 2015). Esta posición que goza el municipio se debe en gran medida a que ha sido por excelencia la sede de la empresa más grande del país: Ecopetrol, la cual hace parte del grupo de las 40 petroleras más grandes del mundo (Ecopetrol, 2018).

El municipio de Barrancabermeja posee una extensión de 1,154 km² y se encuentra situada en una planicie sobre la margen derecha del Río Magdalena. La ciudad está compuesta por 6 corregimientos y el centro urbano. Este último se divide en 7 comunas las cuales suman un total de 234 barrios residenciales. El municipio cuenta con 191,784 habitantes, 69,433 predios y un área construida de 6,129,556 m² (Barrancabermeja en Cifras: Alcaldía de Barrancabermeja, 2015).

Los habitantes de esta ciudad, los bienes físicos y la economía de Barrancabermeja están en constante riesgo por diversas amenazas naturales. Este estudio evalúa el riesgo que se da por una de las amenazas naturales más potenciales que tiene la ciudad: Los sismos.

Colombia, en cuya área se emplaza Barrancabermeja, es uno de los países sísmicamente más activos de Suramérica debido a la influencia generada en la convergencia de placas tectónicas como la Suramérica, Caribe y Nazca (AIS, 2010). La Figura 1.1 ilustra la amplia actividad sísmica registrada en el territorio colombiano según la compilación de los catálogos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), National Centers for Environmental Information (NOAA), U.S Geological Survey (USGS), International Seismological Center (ISC) e “Historia de terremotos” de José Emilio Ramírez (1995).

En Colombia se han registrado terremotos que han impactado importantes centros urbanos como lo fue el sismo de Armenia en 1999, con magnitud $M_w = 6.2$, el cual afectó cerca de 8,500 personas con varios grados de lesión y ocasionó daños a cerca de 100,000 construcciones (NSR-10; AIS, 2010). Dicho terremoto demostró que edificios diseñados con normas de sismo resistencia de 1984, presentaron múltiples daños, incluso el colapso. Las consecuencias observadas en este evento sísmico han llamado la atención de entidades de gestión del riesgo y atención de desastres para evaluar el riesgo de diversos centros urbanos de gran importancia para Colombia con la finalidad de definir planes de contingencia en caso de la ocurrencia de un sismo.

Barrancabermeja se localiza en una zona de amenaza sísmica intermedia (NRS-10; AIS, 2010), pero limita a menos de 90 km con una de las zonas sísmicamente más activas de Colombia: El Nido de Bucaramanga. A esta zona se le domina “Nido” por la gran cantidad de eventos sísmicos de subducción localizados en una misma zona. La zona de estudio no solo es influenciada por el Nido de Bucaramanga sino también por fallas geológicas activas que producen sismos que han alcanzado magnitudes de 6.5 M_w . Aunque a la fecha no se han

registrado muertes ni colapsos por terremotos en la zona de estudio, el potencial sísmico alrededor de la ciudad es evidente. La importancia económica de Barrancabermeja, la exposición de personas y bienes físicos, y el potencial de la amenaza sísmica son referentes que motivaron la realización de la presente investigación.

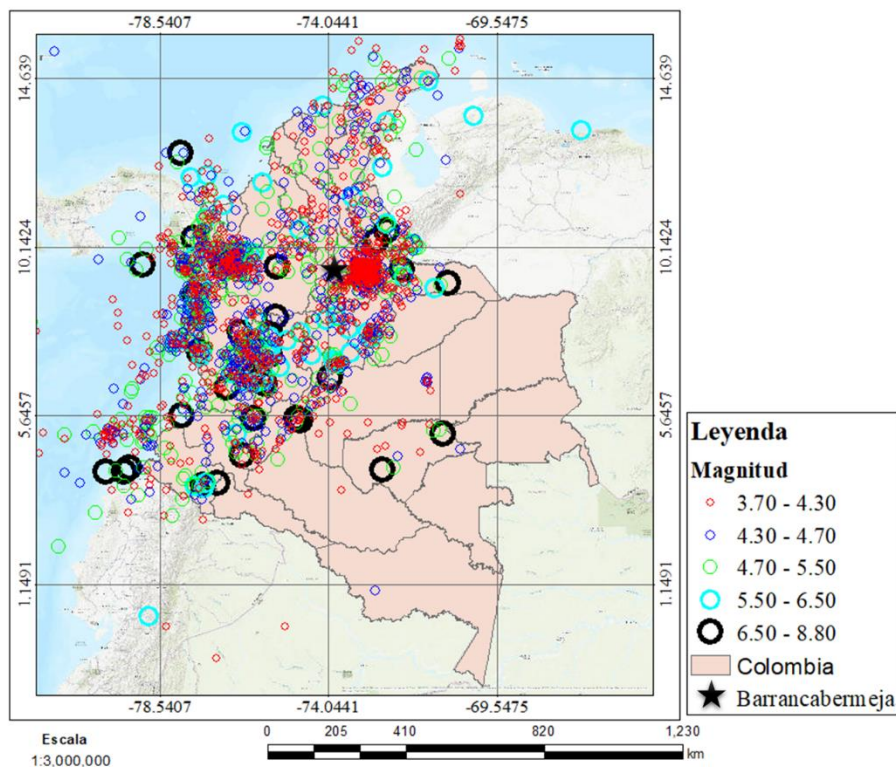


Figura 1.1 Registro de eventos sísmicos según catálogo compilado.
Fuente: Elaboración propia.

Determinar el riesgo requiere conocer los bienes físicos de la ciudad y su capacidad de resistir cargas sísmicas. Los habitantes, los edificios, las líneas vitales y demás infraestructura son algunos de los bienes tangibles que se ven afectados en la ocurrencia de un terremoto. El alcance del presente estudio llega únicamente hasta la evaluación del riesgo sísmico de la estructura de edificaciones residenciales, sabiendo que una evaluación completa del riesgo requiere estudiar las afectaciones a toda clase de edificación e infraestructura, considerando las pérdidas de contenidos dentro de los edificios, afectaciones a elementos no estructurales, la pérdida de funcionalidad de sistemas de transporte, comunicación, energía y acueductos, afectaciones al patrimonio cultural (bienes tangibles), pérdidas económicas asociadas a flujos cesantes de negocios de gran influencia en la economía, riesgos sociales (heridos y muertos) y riesgos por incendios post sismo. La evaluación de afectaciones a viviendas se considera el primer paso en la evaluación del riesgo sabiendo que las viviendas representan la mayoría de las edificaciones en las principales ciudades colombianas, como se ha demostrado en investigaciones previas (González, 2017; Yamin, Ghesquiere, Cardona & Ordaz, 2013).

Evaluar el riesgo sísmico de viviendas en Barrancabermeja tiene la finalidad de dar parámetros que permitan a entidades gubernamentales y de gestión del riesgo tomar acciones de prevención, preparación y respuesta ante la ocurrencia de un terremoto y, de este modo, buscar al máximo la mitigación del riesgo. Para esta evaluación, el presente estudio aborda los tres parámetros principales del riesgo sísmico: la amenaza sísmica (probabilidad de que se presenten terremotos en la zona bajo estudio), la exposición (bienes físicos: residencias) y la vulnerabilidad (capacidad de las estructuras para resistir cargas sísmicas).

El desarrollo del modelo de exposición se da a partir de información cartográfica y encuestas que dan como resultado un inventario de estructuras residenciales con información de número de pisos, sistema de resistencia lateral, área construida y costo de reposición de cada edificio. Uno de los inconvenientes a la hora de realizar un modelo de exposición es la incertidumbre que existe al determinar el tipo de estructura a partir de la interpretación de atributos observados en la fachada de los edificios, por tal razón, este trabajo considera la posible variabilidad de los parámetros del modelo de exposición debido a la incertidumbre del encuestador. Una vez definida la exposición, se seleccionan curvas de fragilidad (desarrolladas por otros autores) que mejor describan el comportamiento de cada estructura en términos de daños por intensidades sísmicas, al asociar daños con pérdidas económicas, es posible determinar el riesgo con métricas económicas.

Este estudio presenta los resultados del riesgo sísmico en términos de daños a edificaciones y pérdidas económicas. Para ello se realiza un análisis de eventos estocásticos con el fin de dar métricas del riesgo como la pérdida promedio anual (que es el promedio anual de las pérdidas de eventos estocásticos considerando la frecuencia de ocurrencia de cada sismo) y la curva de tasa de excedencia de pérdidas. Para el análisis de daños se seleccionaron 6 escenarios sísmicos asociados a periodos de retorno de pérdidas de 250, 500 y 1,000 años y relacionados a las zonas sísmicas de mayor influencia para la ciudad en estudio.

El desarrollo del trabajo se presenta en 6 capítulos, el primero menciona la justificación de la investigación y los objetivos de la misma, en el segundo se da el marco teórico de todos los componentes usados para la evaluación del riesgo, en el tercero se da el desarrollo del modelo de exposición considerando la incertidumbre, el cuarto justifica la selección de curvas de fragilidad para cada estructura encontrada en el modelo de exposición, en el quinto se muestra la evaluación del riesgo sísmico bajo el análisis de eventos estocásticos, el análisis de escenarios, y por último, en el sexto capítulo se dan las conclusiones del estudio.

2. RIESGO SÍSMICO

Una de las definiciones ampliamente aceptadas del riesgo es *el producto entre la probabilidad de ocurrencia de un evento y el daño causado por el mismo* (Zio, 2006). El riesgo sísmico se puede comprender como un modelo de pérdidas económicas o humanas (Calvi et al., 2006) que resulta de asociar tres componentes principales: la amenaza sísmica (probabilidad de que se presenten terremotos en la zona bajo estudio), la exposición (bienes físicos y población expuesta) y la vulnerabilidad (también definida como susceptibilidad de daño y pérdidas por efectos sísmicos). En este capítulo se abordan las investigaciones previas, antecedentes, teoría y conceptos que fundamentan los tres componentes del riesgo sísmico.

2.1. AMENAZA SÍSMICA

La amenaza sísmica representa los efectos producidos por los terremotos tales como: el movimiento fuerte del terreno, rupturas en el suelo o efectos secundarios como licuación y movimientos de masas. La amenaza sísmica se podría definir entonces como la síntesis de los efectos potenciales de muchos posibles escenarios sísmicos y de la cuantificación de efectos particulares que se esperan que ocurran con diferentes frecuencias (Bommer & Boore, 2005). El presente trabajo define la amenaza únicamente en función del movimiento fuerte del terreno, sin considerar fenómenos de licuación, rupturas superficiales de fallas ni movimientos en masa.

La amenaza sísmica se puede cuantificar en términos de la aceleración, velocidad y desplazamiento generado en el suelo. Es común realizar estudios amenaza sísmica probabilísticos, en donde se cuantifica la amenaza para un periodo de tiempo determinado, indicando la probabilidad de excedencia de un nivel de movimiento fuerte del terreno durante dicho periodo. Para una correcta cuantificación de la amenaza es necesario conocer el proceso generador de sismos de la región, tener información de sismos pasados, contar con ecuaciones que relacionen el movimiento fuerte esperado y cuantificar los efectos de sitio (modificación del movimiento fuerte del terreno debido a la presencia de suelos y efectos topográficos).

Los estudios de amenaza sísmica requieren de catálogos sísmicos, los cuales compilan información sobre registros sísmicos según la ubicación espacial, magnitud, fecha y características de rupturas, además de caracterizar las fuentes sismogénicas (o sea, el origen y causa de los sismos) alrededor de la zona de estudio. Los catálogos sísmicos permiten conocer la distribución espacial de la actividad sísmica, la magnitud de los eventos y la frecuencia de ocurrencia. La Figura 2.1 presenta la compilación de un catálogo sísmico para la zona bajo estudio: la ciudad de Barrancabermeja. Si bien para la cuantificación de la amenaza sísmica en esta investigación se realizó con un catálogo diferente (ver sección 2.1.1), el presente catálogo permite comprender la sismicidad del sitio de estudio. Las fuentes utilizadas para la compilación del catálogo de la Figura 2.1 son: National Centers for Environmental Information (NOAA), Servicio Geológico Colombiano (SGC), U.S Geological

Survey (USGS), International Seismological Center (ISC) e “Historia de terremotos” de José Emilio Ramírez (1995).

Las figuras 2.1 y 2.2 ilustran la distribución espacial de los eventos sísmicos recopilados en el catálogo junto con las fallas identificadas por Gómez et al., (2015). Se observa gran cantidad de eventos con magnitud M_w entre 3.7 y 4.3 ubicados a profundidades entre los 131 y 166 km. Zarifi, Havskov & Hanyga (2007) definen esta zona como “Nido de Bucaramanga”. En la investigación de Zarifi & Havskov (2003) y Carr & Stoiber (1973) se observó que algunas zonas de subducción y a profundidades intermedias, existe actividad sísmica densa que se cataloga como “Nido sísmico”, el cual se define por la alta concentración de actividad sísmica comparada con sus alrededores. Dentro de esta definición, dos tipos de nidos pueden ser definidos: (a) nidos relacionados a zonas de subducción, caracterizados por autores como Zarifi & Havskov (2003), y (b) nidos localizados en placas descendentes y asociadas a actividad volcánica, encontrados por ejemplo en América Central (Carr & Stoiber, 1973).

El mecanismo focal de los terremotos ubicados en el Nido de Bucaramanga está a profundidades promedio de 150 km tal como se evidenció en el catálogo compilado. Zarifi et al. (2007) describe la naturaleza de este Nido como un posible campo de concentración de esfuerzos de contacto entre dos placas en subducción.

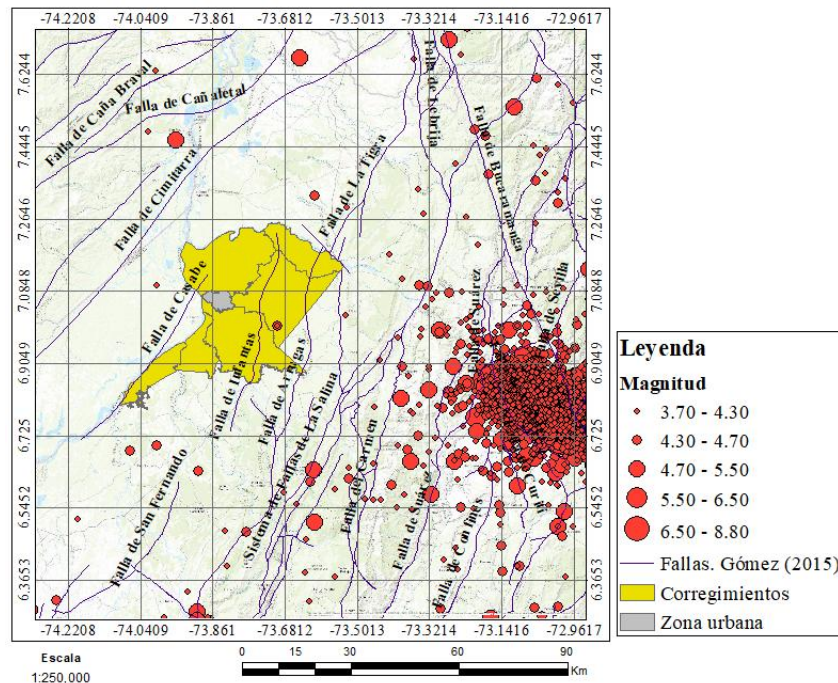


Figura 2.1 Distribución espacial de catálogo de eventos sísmicos alrededor de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

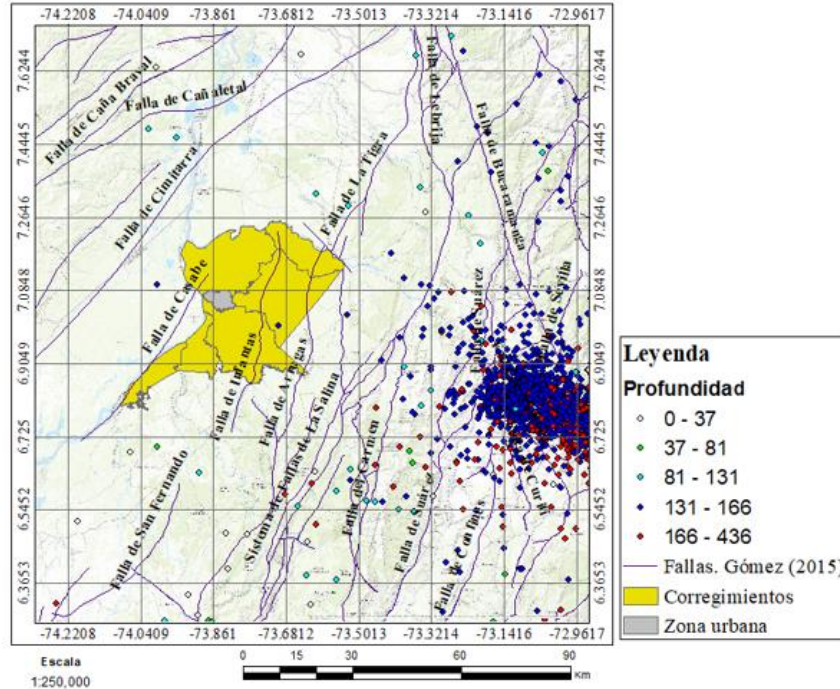


Figura 2.2 Eventos sísmicos según la profundidad (km)
Fuente: Elaboración propia.

Aunque el centro urbano de Barrancabermeja se encuentra aproximadamente a 90 km del Nido de Bucaramanga (zona de alta actividad sísmica), el estudio de amenaza sísmica del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NRS-10: AIS, 2010) indica que la ciudad se encuentra en una zona de sismicidad intermedia en una escala de alto, intermedio y bajo.

La zona de estudio no solo es influenciada por el Nido de Bucaramanga sino también por fallas geológicas activas que producen sismos que han alcanzado magnitudes de 6.5 M_w . Aunque hasta la fecha no se han registrado colapsos totales ni pérdidas humanas debidas a sismos, es evidente el gran potencial sísmico que existe alrededor de la ciudad.

A continuación, se describe el modelo de amenaza sísmica usado en el presente trabajo para la estimación del riesgo sísmico.

2.1.1. MODELO DE AMENAZA SÍSMICA.

El cálculo probabilístico del riesgo sísmico requiere de la utilización de modelos probabilísticos de la amenaza sísmica para la determinación de las intensidades esperadas. El presente estudio plantea la aplicación del modelo de amenaza sísmica usado en la evaluación del riesgo sísmico de Sur América dentro del proyecto South America Risk Assessment (SARA; Global Earthquake Model, 2015).

El proyecto SARA fue desarrollado por la fundación Global Earthquake Model (GEM) y Swiss Re entre los años 2013 y 2015. Para la estimación del riesgo del proyecto SARA se desarrolló un modelo de análisis probabilístico de la amenaza sísmica (PSHA) que cubre todo el continente suramericano. Adicionalmente, dentro del proyecto se crearon bases de datos de zonas de exposición, curvas de vulnerabilidad y diversos parámetros necesarios para la cuantificación del riesgo.

Se decidió utilizar este modelo por sus características innovadoras en la definición de los parámetros de la amenaza. El desarrollo del modelo de amenaza del proyecto SARA requirió la compilación de diversos catálogos sísmicos los cuales se procesaron con métodos estadísticos para determinar su completitud y eliminar réplicas de eventos sísmicos. En el proyecto se generó una base de datos de fallas activas para el continente al igual que se compiló información sobre registros de movimiento fuerte. Las fuentes sismogénicas fueron definidas como polígonos o volúmenes que acotan regiones con características homogéneas de actividad sísmica, tectónica y geodinámica. La sismicidad de superficie se modeló como una distribución de área que integra eventos de corteza superficial, regiones continentales estables y fallas de corteza. La sismicidad de subducción se modeló como volúmenes 3D de rupturas. Las características de distribución de sismicidad están basadas en los datos estadísticos obtenidos del catálogo. Los parámetros principales que definen las fuentes sismogénicas son:

- **Máxima magnitud observada en la fuente sismogénica.**
- **Espesor de la fuente sismogénica:** Este parámetro permite diferenciar la profundidad focal de la sismicidad superficial y los eventos de subducción.
- **Profundidad focal:** Se refiere a la distribución de la profundidad hipocentral y su probabilidad de ocurrencia.
- **Orientación y tipos de planos de ruptura:** Se usó la información asociada a las fallas ubicadas dentro de la fuente sismogénicas y el mecanismo focal para determinar las orientaciones más probables de los planos de falla.
- **Frecuencia de la actividad sísmica:** Usando el catálogo sísmico, se representó la distribución frecuencia-magnitud con el método *Distribución truncada de Gutenberg-Richter*.

La base de datos de registros de movimiento fuerte tomados en las principales regiones tectónicas de Suramérica (subducción del Pacífico, subducción intraplaca, corteza superficial activa y corteza superficial estable) fue usada para la selección de ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE por sus siglas en inglés) también llamadas ecuaciones de atenuación. Al comparar los registros de acelerogramas con los resultados de las ecuaciones de atenuación para cada región, fue posible determinar las ecuaciones que mejor se adaptan a cada región tectónica y su influencia. Las ecuaciones usadas en el proyecto SARA se ilustran en Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE) usadas en el modelo de amenaza sísmica del proyecto SARA.

Tipo de región tectónica	Ecuación de predicción de movimiento (GMPE)	Influencia
Subducción interface	Zhao et al. (2006)	33.3%
	Abrahamson et al. (2015)	33.3%
	Montalva et al. (2016)	33.4%
Subducción intraplaca	Abrahamson et al. (2015)	50.0%
	Montalva et al. (2015)	50.0%
Corteza superficial activa	Akkar et al. (2014)	33.3%
	Bindi et al. (2014)	33.3%
	Boore et al. (2014)	33.4%
Corteza superficial estable	Atkinson & Boore (2006)	25.0%
	Tavakoli & Pezeshk (2005)	50.0%
	Drouet & Brazil (2015)	25.0%

Fuente: GEM (2015)

Para estimar la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno es necesario considerar los efectos de sitio que influyen en la variación de las intensidades sísmicas. Este tema se trata a continuación.

2.1.2. EFECTOS DE SITIO

Se conoce como efecto de sitio aquellas diferencias observadas entre valores de intensidad de movimiento registrados en los acelerógrafos instalados en condiciones geológicas y topográficas diferentes (Borcherdt, 1996). Se ha observado que los suelos blandos tienen gran influencia en la propagación de la onda sísmica: no solo es posible obtener una amplificación de la intensidad de movimiento, sino también obtener posibles reflexiones y refracciones de onda que incrementan la duración del evento sísmico (Celebi, Prince, Dietel, Onate, & Chavez, 1987). Estos fenómenos dependen principalmente del tipo de suelo, sus características y el espesor del depósito (Celebi et al., 1987).

Los estudios de efectos de sitio en Colombia, también llamados estudios de microzonificación sísmica, son investigaciones realizadas para proyectos particulares (hidroeléctricas, puentes, edificios etc.) o centros urbanos los cuales buscan definir las condiciones geológicas y topográficas que inciden en la vulnerabilidad sísmica de los bienes expuestos. Cuando se trata de ciudades, el reglamento NSR-10 exige únicamente que las capitales de departamentos y ciudades con más de 100,000 habitantes, ubicadas en zonas de sismicidad alta e intermedia, desarrollen estudios de microzonificación sísmica. Aunque Barrancabermeja posee las características para que se deba desarrollar un estudio de microzonificación sísmica según el alcance del numeral A.2.9.3 de la NSR-10, actualmente no posee un estudio que permita conocer los valores de amplificación de onda sísmica en

todo su territorio, lo que conlleva a buscar metodologías que, sin mucha inversión de tiempo y dinero, permitan dar un valor aproximado de los efectos de sitio.

El promedio de la velocidad de onda de corte a los 30 m de profundidad (V_{s30}) es un parámetro que ha demostrado aproximarse a los efectos de sitio generado por un sismo de superficie. El cálculo del V_{s30} por medio de gradiente topográfico es un método útil cuando se carece de mediciones o estudios directos en el sitio de análisis (Wald & Allen, 2007).

La metodología propuesta por Wald & Allen (2007) se basa en la hipótesis que las zonas con inclinaciones bajas son propensas a acumular depósitos de suelos, a su vez, las características de estos suelos se asocian a velocidades de onda de corte bajas. Las zonas de altas pendientes de asocian a suelos en roca con altas velocidades de onda de corte.

Para la estimación de la velocidad de onda de corte es necesario contar con un modelo digital de elevación (DEM). Algunos de estos modelos son generados por la Misión del Transbordador Espacial Para Topografía por Radar (SRTM, por sus siglas en inglés) con resoluciones de 30, 7.5 y 3 arcosegundos. Estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano, SGC, demostraron con criterios estadísticos que el modelo de resolución de 7.5 arcosegundos es adecuado para definir la velocidad de onda de corte (Eraso, 2015). La Figura 2.3 muestra como varía la velocidad de onda de corte según la topografía de todo el territorio colombiano según Eraso, (2015). El valor de V_{s30} alcanza niveles altos (>760 m/s) en zonas con altas pendientes y niveles bajos en planicies (<300 m/s).

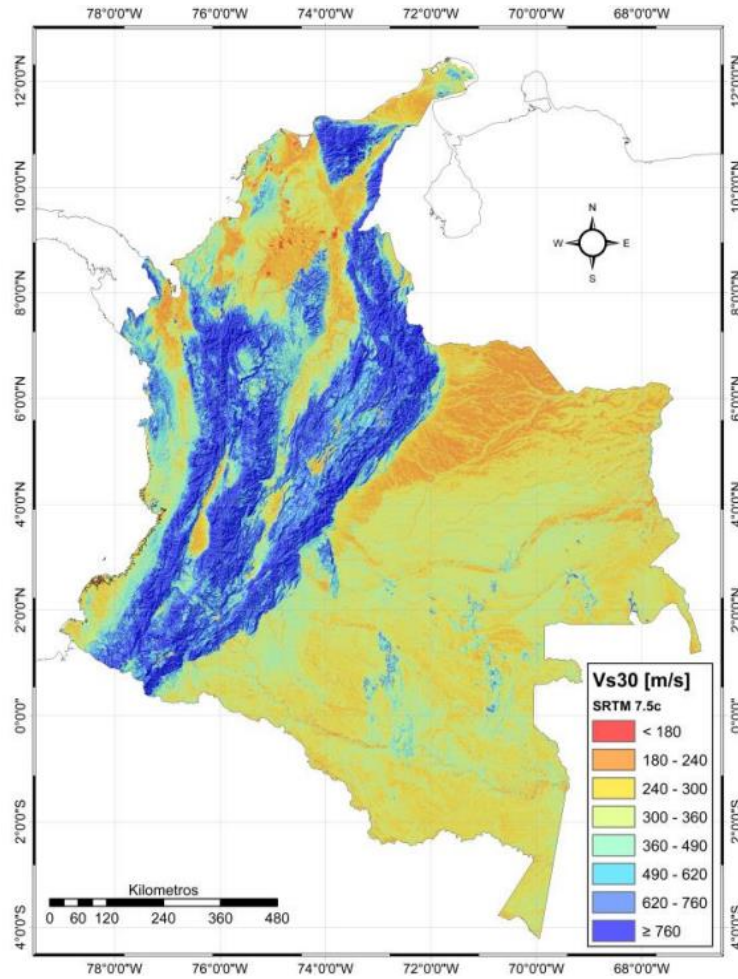


Figura 2.3 Mapa de velocidad de onda de corte a 30 m de profundidad para Colombia, basado en el gradiente topográfico a partir de un SRTM de 7.5 arcosegundos. Fuente: (Eraso, 2015)

Debido a la dificultad de obtener el modelo digital desarrollado por el SGC, se optó por usar el modelo de *United States Geological Survey* (USGS), el cual está disponible en su plataforma web con resolución de 30 arc segundos. El modelo fue desarrollado como parte de la investigación desarrollada por Wald & Allen (2007).

Barrancabermeja se encuentra situada sobre una zona de topografía predominantemente plana. Usando el modelo de V_{s30} del Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS, se determinó la velocidad de onda para el territorio de estudio la cual se ilustra en la Figura 2.4.

La velocidad de onda de corte se puede correlacionar con el perfil de suelo. La NSR-10 en la tabla A.2.4-1 clasifica los tipos de suelos en 6 categorías, (A, B, C, D, E y F) siendo la categoría A y B perfiles en roca, en donde el V_{s30} supera los 760 m/s; el perfil C es un tipo de suelo muy denso o roca blanda, con velocidades V_{s30} entre 360 y 760 m/s; el perfil tipo D es un suelo blando con V_{s30} entre 180 y 360 m/s y los perfiles E y F son suelos muy blandos y susceptibles a fallas por excitaciones sísmicas, tales como suelos licuables, arcillas

sensitivas etc., cuyas velocidades son inferiores a los 180 m/s. Aplicado este criterio de la norma NSR-10 y al observar la Figura 2.4 se puede concluir que en la ciudad de estudio predominan los tipos de suelos semirrígidos y blandos (perfiles D, E).

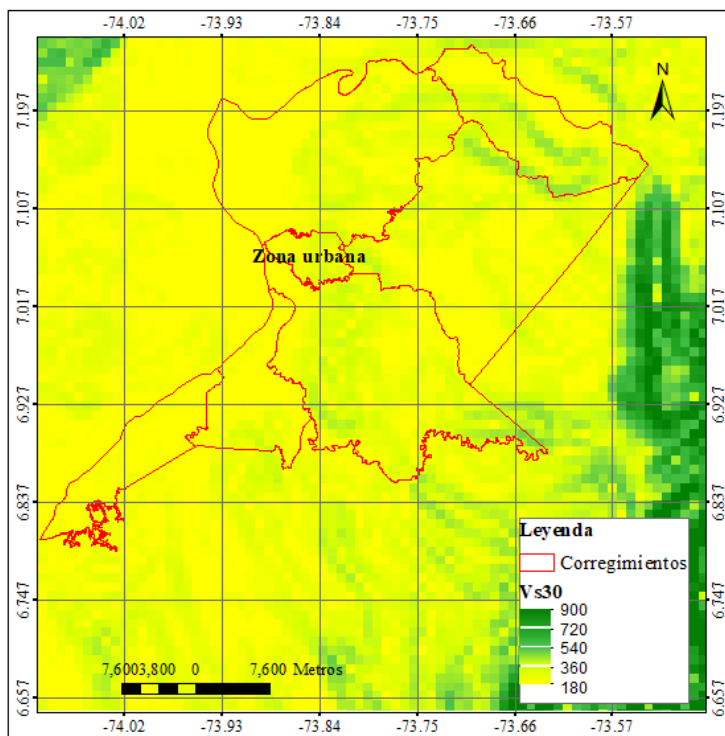


Figura 2.4 Vs30 (m/s) de corregimientos de Barrancabermeja.
Fuente: Información del USGS adaptada.

Esta investigación realizó el modelo de efectos de sitio usando un valor promedio de Vs30 para cada polígono de la resolución del modelo de exposición. Estos valores de Vs30 son integrados en las ecuaciones de atenuaciones consideradas en el estudio.

2.2. MODELO DE EXPOSICIÓN

El modelo de exposición tiene como finalidad estudiar las características principales de los bienes físicos de la ciudad. Para este fin se realizan inventarios de edificaciones que permitan conocer sus características de material, sistema de resistencia sísmica, número de pisos, ubicación geográfica y costo de reposición. Para realizar el modelo de exposición fue necesario conocer la zona de estudio, la cultura constructiva de la ciudad e identificar distribuciones socioeconómicas de la población. En esta sección se abarcan investigaciones previas sobre la información de interés en el modelo de exposición, se ilustran propuestas para la recopilación de información requerida en el desarrollo del modelo y se expone la clasificación de estructuras que se usará en el inventario de edificios.

2.2.1. RECOPIACIÓN DE DATOS

La exposición de edificaciones de una ciudad se puede expresar en términos de la cantidad de edificios según su tipología estructural, número de pisos, área construida y costos de reposición. Los parámetros de los modelos de exposición son, en su mayoría, obtenidos por fuentes de entidades oficiales como Catastro o Planeación, quienes, por medio de sus mecanismos de control, logran medir el crecimiento urbanístico. Según Dell'Acqua, Gamba y Jaiswall (2013) algunos de los desafíos que presentan los investigadores al realizar modelos de exposición son:

- Realizar un inventario detallado de edificaciones requiere de una alta inversión de tiempo y dinero.
- Hay dificultades para obtener información precisa sobre las edificaciones debido al acceso limitado a información como planos estructurales, memorias de cálculo y estudios de suelos.
- Al realizar inspecciones de campo detalladas, es difícil tener acceso a las viviendas por asuntos de privacidad.
- Existen errores e incertidumbre al interpretar los atributos observados en las inspecciones.
- La información pública en ocasiones está incompleta, posee diversos formatos de presentación y está repartida en múltiples entidades.

Para dar solución a los diversos desafíos que presenta la investigación, se usaron metodologías que permitieran recopilar datos de manera ágil y asertiva, se planteó una metodología para medir la incertidumbre al interpretar atributos de edificaciones y cuantificar sus efectos en los resultados del riesgo sísmico, y se solicitó información pública sobre el urbanismo de la ciudad.

Para la presente investigación se logró obtener información cartográfica de la zona urbana la cual se describe en la Tabla 2.2. Estos datos cartográficos fueron fundamentales para la investigación puesto que permitieron conocer de manera precisa la cantidad de predios existentes en la ciudad y área construida en planta. Dicha información cartográfica no posee información sobre número de pisos de los edificios, tipologías estructurales ni costos de reposición. Fue necesario entonces usar métodos que permitieran recopilar los datos faltantes de manera ágil.

Tabla 2.2 Información cartográfica provista por catastro

Polígonos	Formato del documento	Contenido
Predios	Shape.shp	Contiene algunos de los polígonos de los lotes construidos y vacíos de la ciudad.

Polígonos	Formato del documento	Contenido
Equipamientos	Shape.shp	Contiene todos los polígonos de los centros de salud pública, parques públicos, estaciones de bomberos, policía entre otras instituciones gubernamentales para el servicio del área urbana de Barrancabermeja.
Espacios Públicos	Shape.shp	Contiene zonas verdes públicas, plazoletas, zonas deportivas y parques del centro urbano.
Cartografía de barrios, comunas y corregimientos	Shape.shp	Contiene los polígonos que delimitan los barrios, las comunas, y los corregimientos.
Áreas de actividad	Shape.shp	Contiene los polígonos de las zonas del centro urbano según el uso: Residencial, comercial industrial, dotación y protección ambiental.

Las formas descritas para recopilar información se pueden dividir en dos: encuestas remotas y encuestas de campo. Osorio (2015) y González (2017) plantean una metodología para recopilar información de manera remota. Estos autores proponen el uso de la plataforma digital Google Street View, herramienta que permite recorrer las calles de la ciudad de manera virtual, facilitando recopilar información a partir de la observación externa de las edificaciones. Para la evaluación económica de edificaciones de la ciudad, los autores proponen que el cálculo monetario de activos esté basado en el estrato socioeconómico al que pertenezca la construcción.

Al realizar la recolección de la información de manera digital, existen diversos factores que limitan la capacidad del ingeniero en acertar sobre cuál es la estructura del edificio ya que la observación externa de una edificación es limitada y no deja ver en detalle cómo se configura la estructura. Existe entonces incertidumbre al definir una tipología estructural realizando solo una inspección visual externa de la edificación. El nivel de incertidumbre se reduce cuando el encuestador es un ingeniero con alta experiencia en ingeniería estructural y está familiarizado con las costumbres de la construcción colombiana. Una herramienta que permite capacitar al encuestador es la guía FEMA (2015a), la cual propone algunos aspectos importantes para la correcta identificación del sistema de resistencia lateral de los edificios comunes en Estados Unidos. De los criterios de la guía se resaltan aquellos que son aplicables al presente estudio:

- **Tamaño de aberturas en fachada:** El tamaño de las ventanas en la fachada permiten entender la proporción de los vanos en la estructura. Generalmente en los edificios donde predominan las columnas se observan espacios más abiertos con grandes aberturas, mientras que los edificios donde predominan los muros, las aberturas tienden a ser más pequeñas.

- **Material predominante en fachada:** Es común que las fachadas principales del edificio posean acabados que esconden la estructura. En algunos casos es posible identificar en las fachadas el material principal que compone la estructura, siendo el concreto y la mampostería los materiales más comunes en Barrancabermeja.
- **Irregularidades en altura:** Algunas irregularidades mencionadas por la NSR-10, tales como como pisos débiles, pisos flexibles y columnas cortas se logran evidenciar al observar la elevación del edificio. Esta información es útil cuando se busca determinar el nivel de ductilidad de una estructura.
- **Antigüedad:** Determinar la antigüedad de un edificio resulta útil cuando se quiere verificar si la estructura posee los requisitos de la norma más actual en Colombia (NSR-10) o si posee normativas desactualizadas. Se considera que un edificio construido antes de 1998, es decir, sin requisitos de la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente de 1998 (NSR-98; AIS, 1998), tiene un nivel de ductilidad más bajo que aquellos edificios construidos después de 1998.

Para recopilar información de campo, se usó la propuesta dada por el SGC, quien elaboró un formato para el levantamiento detallado de información que permite conocer la vulnerabilidad de una estructura: Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa (Ávila et al., 2016). Esta guía propone la recolección de datos precisos tales como:

- **Identificación de la edificación:** Ubicación, coordenadas, dirección y registro fotográfico.
- **Clasificación de la edificación:** Uso predominante, número de pisos, dimensiones en planta, estado y calidad de la construcción, tipos de servicios domiciliarios que posee, parámetros socioeconómicos y número de ocupantes.
- **Descripción de sistema estructural:** Tipo de cimentación, sistema de entrepiso, sistema estructural, tipo de cubierta, fecha de construcción, reformas y adiciones, irregularidades en planta y en altura.
- **Evaluación y diagnóstico de daños de la edificación:** Causa de daños presentes, consecuencia de daños, cuantificación de daños y tipos de reparaciones.

Se buscó una estrategia que permitiera recopilar la información de manera asertiva, ágil y sin gran inversión de tiempo y dinero. Para ello se definió primero el nivel de resolución del modelo de exposición y luego se precisó la estrategia para obtener la mayor efectividad en las encuestas. Un modelo de exposición se puede presentar en diversas resoluciones: localidades, comunas, corregimientos, barrios, manzanas y construcciones individuales. El modelo de exposición ideal sería aquel que estudia cada construcción de la ciudad, dando el mayor nivel de resolución posible, aun así, esto conllevaría gran inversión de dinero y tiempo. González (2017) propone recopilar la información tomando muestras estadísticas de zonas con igual estrato socioeconómico y con características similares en altura de edificios. Ese método consiste en asignar un código correspondiente según su estrato y a la predominancia de número de pisos de los edificios. Los barrios que posean características similares se les llama *zona homogénea*. En cada zona homogénea de la ciudad se toma una muestra

estadística representativa que permita valorar cada aspecto del modelo de exposición. Las zonas homogéneas podrían caracterizarse no solo por su estrato y predominancia en número de pisos de edificios sino por cualquier otro parámetro único que diferencie sus edificaciones, por ejemplo, el uso predominante del suelo (comercial, residencial, industrial, etc.).

Dividir el lugar de estudio en zonas homogéneas tiene la bondad de permitir tomar muestras estadísticas a grandes grupos poblacionales con características muy homogéneas, lo cual reduce el porcentaje de error. Este método es útil en regiones con amplio inventario de edificaciones, siendo inviable realizar encuestas a cada una de las edificaciones de la ciudad.

Se indagó sobre estadísticas relacionadas al modelo de exposición con la finalidad de tener datos de referencia e información base para construir el inventario de bienes expuestos. Dichas estadísticas se mencionan a continuación.

2.2.2. ESTUDIOS PREVIOS

La fuente principal de donde se obtuvo estadísticas relacionadas al modelo de exposición proviene del libro “Cifras para el futuro, Barrancabermeja en cifras 2012-2014” (Alcaldía de Barrancabermeja, 2015). Este documento se desarrolló por medio de la administración municipal la cual recolectó, clasificó y actualizó datos estadísticos de diversas fuentes locales, regionales, departamentales y nacionales con referencia al municipio de Barrancabermeja. Entidades como el DANE, Instituto Agustín Codazzi (IGAC), las curadurías, notarias, entre otras entidades públicas y privadas, contribuyeron con información para la elaboración de dicho documento. Del libro en mención se exponen únicamente los resultados de interés referentes al modelo de exposición: Número de predios, área construida, área de lotes y avalúos catastrales.

Según el IGAC y la Unidad Operativa de Catastro Barrancabermeja, se obtuvo la cantidad de predios, área de lotes, áreas construidas y avalúos catastrales de edificaciones de diversos usos, los cuales se presentan en la Tabla 2.3. Si bien el enfoque del presente estudio está en las viviendas, los datos obtenidos en esta fuente sirven como punto de referencia para el desarrollo del modelo de exposición.

Tabla 2.3 Estadísticas generales de cantidad de predios, áreas y avalúos catastrales.

DESCRIPCIÓN	AÑO		
	2012	2013	2014
Total de predios urbanos	63,456	63,511	63,908
Total de predios rurales	5,343	5,477	5,525
Área total predios (hectáreas)	1,248,516,461	1,240,303,434	1,245,034,597
Área total construida (m²)	6,055,950	6,109,308	6,129,556

DESCRIPCIÓN	AÑO		
	2012	2013	2014
Valor avalúos catastrales urbanos (COP)	\$ 3,427,798,282,600	\$ 3,289,393,777	\$3,400,178,559,500
Valor avalúos catastrales rurales (COP)	\$ 284,804,899,200	\$ 287,847,766,400	\$ 300,220,803,600

Fuente: Alcaldía de Barrancabermeja (2015)

Una vez definidas las estadísticas base para la elaboración del modelo de exposición, se determinó la manera de clasificar la estructura de la ciudad usando las características principales que definen la vulnerabilidad de un edificio: Material, número de pisos, sistema de resistencia sísmica y ductilidad. A continuación, se describe la nomenclatura usada en el inventario de estructuras.

2.2.3. CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS EXPUESTAS.

Brzev et al. (2013) desarrollaron una nomenclatura llamada “*GEM Building Taxonomy*” que uniformiza la manera de clasificar los diversos parámetros que describen la taxonomía de un edificio. La Tabla 2.4 muestra las tipologías estructurales más representativas para la ciudad de estudio junto con los códigos correspondientes a la nomenclatura GEM. Algunas tipologías estructurales no mencionadas en la Tabla 2.4, tales como los pórticos de acero y sistemas prefabricados, son tipologías escasamente usadas en la construcción de viviendas en Barrancabermeja.

Tabla 2.4 Nomenclatura GEM de las tipologías más comunes de edificios residenciales.

Tipología	Código
Construcción improvisada	UNK
Muros de bahareque	UNK
Muros de tapia pisada	UNK
Mampostería confinada	MCF/LWAL+DUC
Mampostería confinada sin ingeniería	MCF/LWAL+DNO
Mampostería no reforzada	MUR/LWAL+DNO
Mampostería reforzada	MR/LWAL+DUC
Muros estructurales en concreto reforzado	CR/LWAL+DUC
Pórtico de concreto reforzado	CR/LFINF+DUC
Pórticos de concreto reforzado sin ingeniería	CR/LFINF+DNO
Sistema combinado en concreto reforzado	CR/LDUAL+DUC

Fuente: Elaboración propia.

La nomenclatura de GEM usada en el presente trabajo se compone de tres características principales: *(i) Material:* concreto reforzado (CR), mampostería confinada (MCF), mampostería reforzada (MR) y mampostería simple (MUR), *(ii) Sistema de resistencia*

lateral: UNK (abreviación de la palabra en inglés “*Unknown*”) , hace referencia a construcciones cuyo comportamiento y configuración estructural es desconocido, LWAL hace referencia a los sistemas de muros, LFINF indica pórticos con mampostería adosada y LDUAL indica sistemas duales. En general la ductilidad de los sistemas de resistencia sísmica se divide en dos categorías: dúctil (DUC) y no dúctil (DNO). **(iii) Número de pisos:** La nomenclatura para indicar la cantidad de niveles del edificio se compone del indicativo “HEX:” seguido con la cantidad de pisos. Por Ejemplo, un edificio de mampostería confinada No-dúctil de 3 pisos se identifica con el código “MCF/LWAL/DNO/HEX:3”.

Seguidamente, se describe brevemente cada uno de los sistemas estructurales presentes en las viviendas de Barrancabermeja.

- **Construcción improvisada (UNK).**

Las construcciones improvisadas se caracterizan por poseer materiales livianos (madera o láminas metálicas) de baja calidad y tienen configuraciones poco convencionales, generando alta incertidumbre sobre su comportamiento estructural frente a un sismo. La mayoría poseen un solo nivel y fueron construidas en modalidad de “autoconstrucción”, es decir, las han edificado personas con mínimos conocimientos en ingeniería estructural. La Imagen 2.1 presenta un ejemplo de este sistema estructural en la ciudad de estudio.



Imagen 2.1 Construcción improvisada (UNK)
Fuente: Elaboración propia.

- **Muros bahareque y tapia pisada (UNK).**

El bahareque (pared de cañas y tierra) y la tapia pisada (muros de tierra) han sido a lo largo de la historia una solución al hábitat constructivo de muchas culturas. El bahareque se conforma por muros en entramados en madera a los cuales se rellenan con agregados de tierra y material cementante. Por otro lado, los muros de tapia pisada están construidos con tierra compactada en moldes de madera.

Los muros de bahareque y de tapia pisada se caracterizan por ser muros de gran grosor (más de 30 cm) y por poseer solo un nivel de altura. La construcción con estos materiales obedece a métodos de construcción antiguos y poco usados en la actualidad. Para efectos del cálculo de la vulnerabilidad, estas tipologías se asociaron al grupo “UNK” debido al desconocimiento del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas. La Imagen 2.2 muestra un ejemplo de vivienda de bahareque en Barrancabermeja.



Imagen 2.2 Muros de Bahareque
Fuente: Elaboración propia.

- **Mampostería confinada (MCF/LWAL).**

El sistema estructural compuesto por mampostería confinada funciona como diafragmas de mampostería que trabajan en conjunto con marcos de concreto reforzado ubicados alrededor del muro. Esta clase de estructura es permitida por la NSR-10 y se limita su altura dependiendo de la zona de amenaza sísmica. Cuando la mampostería confinada se construye usando los requerimientos de la NRS-10, se considera que es mampostería confinada dúctil (DUC); cuando la estructura se construye bajo procesos de autoconstrucción y sin cumplir con la mayoría de los requisitos exigidos por la NSR-10, se cataloga como mampostería confinada sin ingeniería o no dúctil (DNO). La Imagen 2.3 (derecha) ilustra una casa aislada de mampostería confinada que, aunque posee vigas de amarre y columnas de confinamiento, no alcanza a cumplir todos los requisitos de la NSR-10, por ende, no es dúctil. Por otro lado, la imagen de la izquierda muestra una casa de mampostería confinada dúctil ubicada dentro

de un bloque de casas residenciales de estrato 3 y 4. Generalmente en las casas de altos estratos se invierten más recursos para diseños acordes a las normativas y en buena calidad de materiales, lo cual es un indicio de una ductilidad alta.



Imagen 2.3 Casa de mampostería confinada dúctil (Izquierda). Casa en mampostera confinada no dúctil (Derecha).

Fuente: Google Streetview Barrancabermeja (2018).

- **Mampostería reforzada (MR/LWAL).**

El sistema de mampostería reforzada se fundamenta en la construcción de muros con piezas de mampostería de perforación vertical, unidas por medio de mortero, reforzadas internamente con barras y alambres de acero, cumpliendo los requisitos de análisis, diseño y construcción establecidos en el título D de la NSR-10. Este sistema permite la inyección con mortero de relleno o inyectar sólo las celdas verticales que llevan refuerzo. La Imagen 2.4 muestra un edificio de mampostería reforzada que resulta evidente por el tamaño reducido en sus ventanas, el espesor de la losa y el margen de los bloques que se alcanza a observar en los muros pintados de la fachada.

En la ciudad de estudio es común encontrar esta tipología en edificios de Interés Prioritario o Social (VIP o VIS), los cuales son proyectos construidos por el gobierno para favorecer a comunidades de bajos recursos. Generalmente estas edificaciones se construyen con supervisión técnica y obedecen a los requisitos dados por la NSR-10.



Imagen 2.4 Edificio en mampostería reforzada dúctil en Barrancabermeja.
Fuente: Google Streetview, Barrancabermeja (2018).

- **Mampostería no reforzada (MUR/LWAL+DNO).**

Los sistemas estructurales en mampostería no reforzada son aquellas construcciones donde los muros de mampostería carecen de refuerzo y no poseen elementos de confinamiento según indica la NRS-10. Esta tipología también es llamada mampostería simple. Aunque la mampostería no reforzada podría tener viga de amarre inferior y superior, no alcanza a ser mampostería confinada puesto que requiere de elementos de confinamiento vertical (columnas en concreto). La mampostería no reforzada se considera frágil y no dúctil. La Imagen 2.5 muestra una casa de muros de mampostería de adobe macizo sin reforzamiento.



Imagen 2.5 Mampostería no reforzada.
Fuente: Google Streetview, Barrancabermeja (2018).

- **Muros estructurales en concreto reforzado (CR/LWAL).**

Este sistema estructural se compone de muros de concreto reforzado vaciado in situ. Se caracteriza por tener gran densidad de elementos estructurales verticales, poseer luces cortas, ventanas y aberturas pequeñas en las fachadas y carecer de columnas. Se utiliza para edificios de gran altura y aquellos ubicados en zonas de amenaza sísmica alta, donde la rigidez de los muros permite controlar eficientemente las derivas. La Imagen 2.6 muestra un conjunto residencial de edificios de muros de concreto vaciado in situ en la ciudad bajo estudio. Similar a la mampostería reforzada, en Barrancabermeja es común que los edificios de muros de concreto reforzado sean usados en conjuntos residenciales de torres de más de 5 pisos, en donde se puede evidenciar mayor supervisión técnica en construcción y por consiguiente, no son estructuras asociadas a la “Autoconstrucción”.



Imagen 2.6 Muros vaciados en concreto reforzado.
Fuente: Google Streetview, Barrancabermeja (2018).

- **Pórtico de concreto reforzado (CR/LFINF).**

Este sistema se compone por entramados de columnas y vigas de concreto reforzado vaciado in situ. Los pórticos de concreto reforzado se caracterizan por poseer grandes vanos, dejando amplios espacios libres de columnas, lo cual permite mayor libertad a la propuesta arquitectónica; además, las losas de esta tipología tienden a ser más robustas y de mayor peralte a comparación de los edificios de muros de concreto.

En Colombia es común observar en edificios residenciales que las divisiones en mampostería no posean una correcta separación con las columnas y las vigas. Cuando la mampostería esta adosada a la estructura, el comportamiento estructural del pórtico de concreto es afectado por

la mampostería, por lo que fue necesario categorizar esta tipología como pórticos de concreto con mampostería adosada.

Los pórticos de concreto se pueden dividir en dos categorías: Pórticos de concreto reforzado dúctiles (aquellos construidos con buenas prácticas de diseño, construcción y normativas actuales) y pórticos de concreto reforzado no dúctiles (aquellos edificios construidos con malas prácticas constructivas, configuraciones estructurales deficientes y provisiones sísmicas no adecuadas). La Imagen 2.7 (izquierda) muestra un edificio recién construido, compuesto de pórticos de concreto reforzado, dúctil y con mampostería adosada, por otra parte, la imagen derecha muestra otro edificio de pórticos de concreto el cual por su aspecto de antigüedad que refleja la fachada, se entiende que posiblemente no cumple con los requisitos de ductilidad de la NSR-10 y por ende no es dúctil.

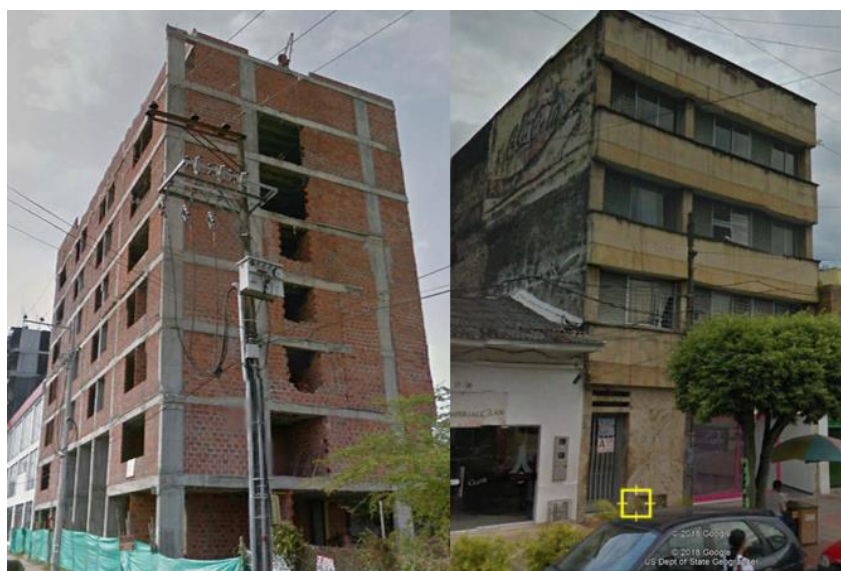


Imagen 2.7 Pórticos de concreto reforzado con mampostería adosada dúctil (Izquierda), Pórticos de concreto reforzado con mampostería adosada no dúctil (Derecha)
Fuente: Google Streetview, Barrancabermeja (2018)

- **Sistema combinado en concreto reforzado (CR/LDUAL).**

Una estructura dual es una combinación de los mencionados sistemas de pórticos de concreto reforzado y muros de concreto reforzado. Se utilizan comúnmente en edificios de gran altura, donde los muros aportan gran rigidez lateral, permitiendo controlar eficientemente las derivas y el sistema de columnas permite tener grandes vanos.

Esta tipología estructural se asocia a edificios de gran altura, donde existe mayor exigencia y control de calidad de diseños, materiales y métodos constructivos, por tal razón, para la ciudad de estudio, es común que esta estructura se relacione a sistema dúctiles. La Imagen 2.8 ilustra un edificio combinado de pórticos y muros de concreto reforzado en Barrancabermeja.

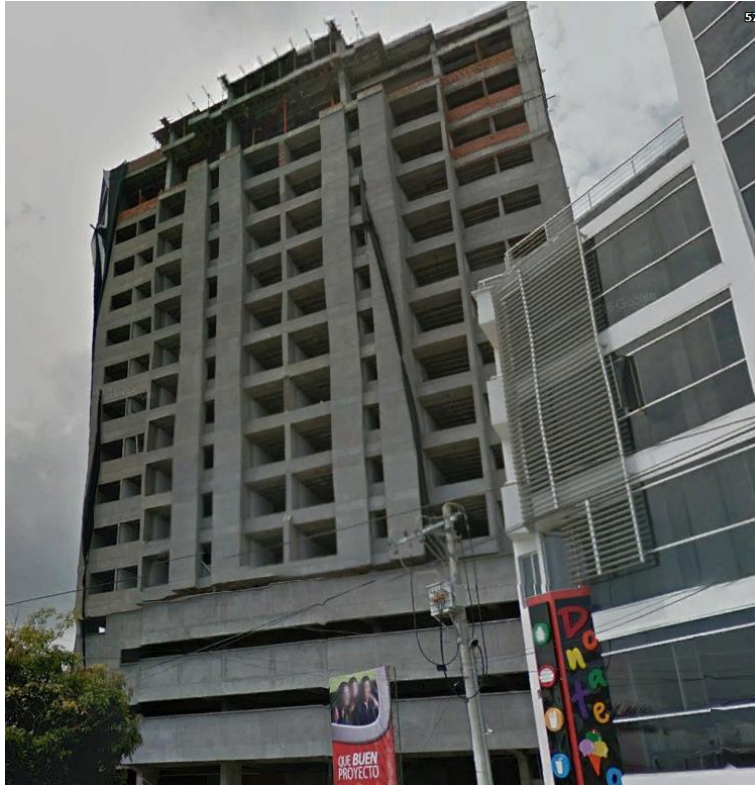


Imagen 2.8 Edificio con estructura dual.
Fuente: Google Streetview Barrancabermeja (2018)

Una vez identificadas las tipologías estructurales más comunes de la ciudad de estudio, se procedió a determinar las funciones que indiquen el nivel de daño y pérdidas esperado de cada sistema estructural cuando es sometido a solicitaciones sísmicas. A continuación, se hace referencia a las curvas de fragilidad y modelos de consecuencias utilizados en el presente estudio.

2.3. VULNERABILIDAD

Diversos autores han definido la fragilidad de estructuras como la probabilidad de excedencia de estados límites de daños en función de intensidades sísmicas (Acevedo et al., 2017; FEMA, 2015b; Villar-Vega et al., 2016) las cuales, al asociarse con modelos de consecuencias, permiten calcular métricas de vulnerabilidad como las pérdidas económicas (Durukal, Erdil, Sestyan & Fahjan, 2006).

Calvin et al. (2006) describe diversas metodologías para definir la vulnerabilidad las cuales se dividen en dos grupos principales:

- **Método empírico:** Son modelos de vulnerabilidad basados en la experimentación, observación y análisis estadístico. Se define la vulnerabilidad como el resultado de un análisis empírico de terremotos históricos, opinión de expertos, observación a estructuras afectadas, registros de acelerógrafos y análisis de estadísticas obtenidas en diversos escenarios sísmicos. Los resultados de análisis de vulnerabilidad empírico pueden ser expresados de manera cualitativa y cuantitativa usando matrices de probabilidad de daños, índices de vulnerabilidad y curvas de fragilidad continuas (Calvi et al., 2006).
- **Método analítico:** Se construyen curvas por medio de modelaciones matemáticas a partir de criterios de ensayos de laboratorio, ecuaciones que describen el comportamiento estructural dinámico y criterios de expertos en ingeniería estructural. Las curvas de fragilidad analíticas se elaboran en su mayoría usando métodos de análisis estructural estáticos o dinámicos, no lineales. La no linealidad considera la degradación de la rigidez de la estructura a medida que se somete a mayores esfuerzos. El método de empuje progresivo también llamado “pushover” es un método ampliamente usado para considerar la no-linealidad de los materiales y a partir de esto, definir los estados límites de daño de una estructura a partir de desplazamientos y distorsiones de pisos (derivadas).

Como menciona Calvi et al., (2006), la vulnerabilidad sísmica de una estructura es influenciada por las características mecánicas de los materiales (tipo y calidad de material), la configuración estructural (geometría en planta y en altura), tipo de fundación, estado de conservación, tipos de elementos no estructurales, y las provisiones sísmicas que podrían hacer a los elementos más o menos resistentes y dúctiles a excitaciones sísmicas. Las curvas de fragilidad deberán entonces considerar dichos aspectos y su variabilidad.

Debido a que el alcance del presente documento no es desarrollar curvas de fragilidad específicas para la ciudad de estudio, se optó por escoger aquellas curvas desarrolladas por otros investigadores.

La validez de los resultados del riesgo sísmico depende de que tan adecuadas sean las curvas de fragilidad usadas en el contexto donde se están aplicado, para ello fue necesario definir los criterios que justifiquen su aplicabilidad. Las curvas de fragilidad seleccionadas deberían ser preferiblemente de edificaciones residenciales en Colombia y los autores deben coincidir con la misma caracterización de estados límites de daños. En vista de que no todas las estructuras poseen curvas desarrolladas para el contexto colombiano, se decidió seleccionar curvas desarrolladas para otros países, cuyos métodos de diseño y construcción sean similares a los colombianos. La justificación de la aplicabilidad de las curvas de fragilidad se hará en el Capítulo 4 una vez se expongan los resultados del inventario de edificaciones. A continuación, se exponen los autores que han desarrollado curvas de fragilidad para las tipologías expuestas en la Tabla 2.4.

2.3.1. ACEVEDO et al. (2017).

Las curvas de fragilidad desarrolladas por Acevedo et al. (2017) hacen parte de un trabajo de investigación del riesgo sísmico para viviendas de mampostería no reforzada en el departamento de Antioquia, Colombia. Los autores desarrollaron curvas de fragilidad para mecanismos de falla en el plano del muro, usando un análisis push-over simplificado según Borzi et al. (2008). La curva de capacidad se definió usando tres parámetros: desplazamiento de fluencia, desplazamiento último y un coeficiente de colapso derivado de la relación entre la fuerza necesaria para generar el colapso y el peso del edificio. A partir de información estadística recolectada de encuestas se generaron curvas de capacidad para estructuras de mampostería simple de 1 a 6 pisos.

Los estados de daño se definieron en función del desplazamiento de fluencia y colapso. Se definieron cuatro estados de daños: Leve, moderado, grave y colapso. Cada estructura simulada fue sometida a 300 acelerogramas representativos de la sismicidad del país, con el fin de identificar el desplazamiento máximo observado para cada registro, el cual se comparó con los estados límites previamente definidos.

Finalmente se generaron curvas de fragilidad para mampostería de 1 a 6 pisos. La Figura 2.5 ilustra las curvas para mampostería no reforzada de un nivel (MUR/ LWAL+DNO/HEX:1).

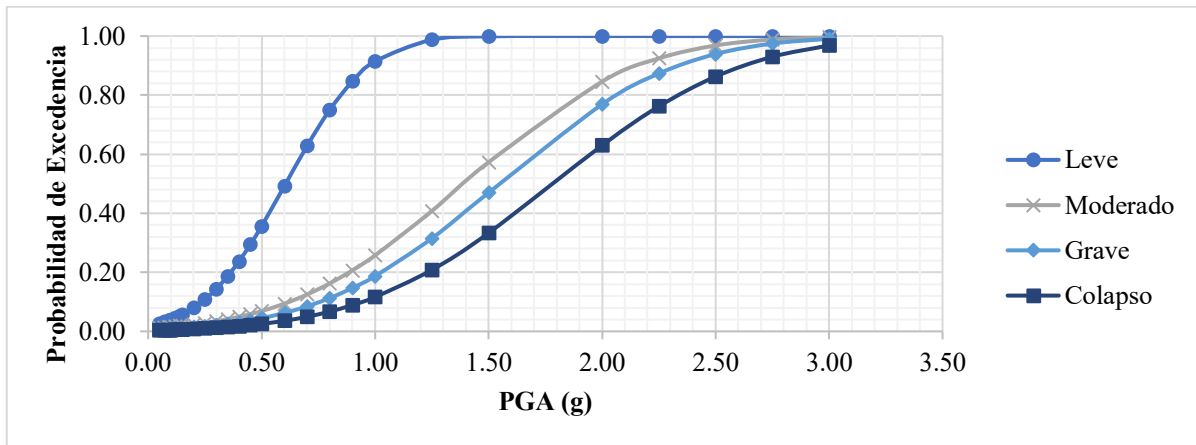


Figura 2.5 Curva de fragilidad de mampostería no reforzada de un nivel (MUR/LWAL+DNO/HEX:1).

Fuente: Adaptado de Acevedo et al. (2017)

2.3.2. VILLAR-VEGA et al. (2017).

Villar-Vega et al. (2017) desarrollaron curvas de fragilidad de diversas estructuras residenciales representativas de Chile, Colombia, Perú y Venezuela.

La capacidad estructural se representó por medio de oscilares de un solo grado de libertad los cuales se sometieron a intensidades sísmicas de 300 registros de movimiento del terreno. Se realizó un análisis no-lineal de tiempo-historia (NLTHA por sus siglas en inglés) dando como resultado una distribución de daños para diferentes intensidades de movimiento. Se desarrollaron curvas para pórticos de concreto resistentes a momento dúctiles y no dúctiles entre 1 y 7 pisos (con y sin mampostería adosada), muros de concreto reforzado de 5 a 10 pisos, mampostería confinada dúctil y no dúctil entre 1 y 3 pisos, mampostería no reforzada de 1 a 6 pisos, estructuras en madera liviana y estructuras desconocidas (cuya información de resistencia es insuficiente).

Para pórticos de concreto no dúctiles se asumieron dos tipos de mecanismo de falla: daños distribuidos en las vigas o rotulación en vigas y fallas por piso débil o rótulas en las columnas. Para pórticos de concreto con muros de mampostería adosada y mampostería confinada, se asumió una curva de capacidad trilineal con el propósito de considerar los efectos de la interacción entre los elementos de concreto y los muros de mampostería adosados.

Se usó una simulación de Monte-Carlo para generar 150 muestreos aleatorios de curvas de capacidad para cada clase de estructura analizada, esto permitió considerar la variabilidad en la curva de capacidad. Luego, se seleccionaron registros de movimiento fuerte compatibles con la sismicidad de la región. Para la construcción de las curvas de fragilidad se consideraron tres medidas de intensidad del movimiento fuerte del terreno: Aceleración pico efectiva, PGA, y aceleraciones espectrales, S_a , para periodos de 0.4 y 1 s.

Se definieron cuatro estados de daño en función de desplazamiento de fluencia y colapso: Leve, moderado, grave y colapso. En la Figura 2.6 se ilustra la curva de fragilidad de pórticos de concreto reforzado No-dúctiles de 3 niveles.

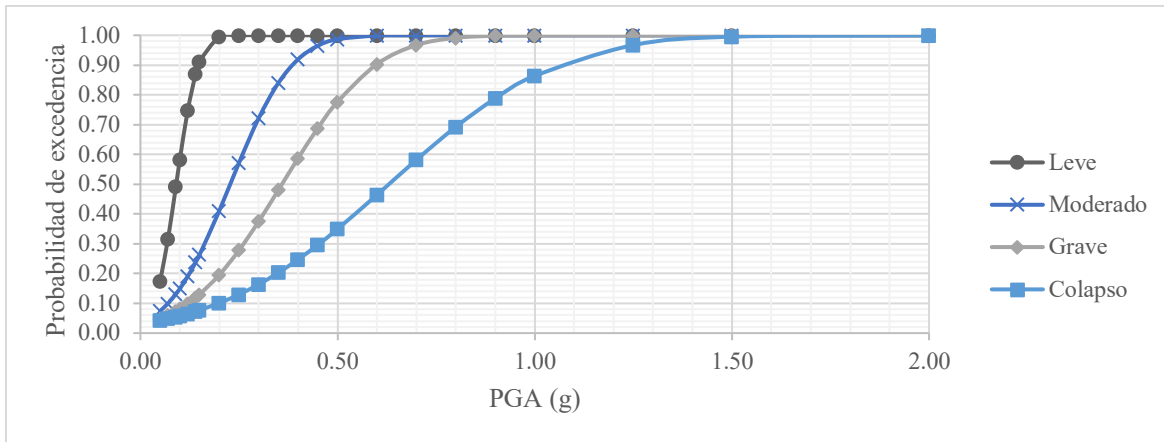


Figura 2.6 Curva de fragilidad de pórticos de concreto reforzado, no dúctiles, de 3 niveles (CR/LFINF+DNO/HEX:3).

Fuente: Adaptado de Villar-Vega et al. (2017)

2.3.3. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA), HAZUS–MH 2.1. (2015)

Hazus es un proyecto de investigación impulsado por FEMA, agencia encargada de investigar el riesgo de desastres alrededor del territorio estadounidense. La misión de esta organización es investigar y desarrollar estrategias para preparar, prevenir y mitigar los efectos de amenazas naturales y antrópicas.

En el proyecto de investigación FEMA (2015b) se desarrollaron curvas de fragilidad de las estructuras más representativas de Estados Unidos. Para el desarrollo de las curvas se usó la metodología de análisis estático no-lineal (Pushover). Las curvas están definidas por dos puntos de control: Capacidad de fluencia y capacidad última. La capacidad de fluencia representa la resistencia por cargas laterales según las provisiones sísmicas, la redundancia de elementos estructurales, conservatismo en los diseños y resistencia esperada de los materiales; la capacidad última (plástica) representa la máxima resistencia que posee una edificación una vez alcanzados los mecanismos de falla de los elementos estructurales (rótulas).

Las tipologías de estructuras investigadas por FEMA (2015b) se discriminan por tres factores: Tipo de material, número de pisos y nivel de diseño sismo-resistente. Los materiales más representativos se dividen en cuatro grupos: Concreto, acero, madera y mampostería; según la altura se dividen en: “Low-Rise” el cual incluye edificios entre 1 y 3 pisos, “Mid-Rise” para edificios entre 4 y 7 pisos y “High Rise” para edificios de más de 8 pisos” FEMA (2015b) considera tres niveles de diseño sismo resistente: “High-code”, “Moderate-Code” y “Low-Code”. Los edificios construidos sin códigos de sismo resistencia se catalogan como “Pre-code”

Los límites de daño propuestos son: Leve, moderado, grave y colapso. La Figura 2.7 ilustra la curva de fragilidad de edificios de muros de concreto reforzado entre 8 y 19 pisos.

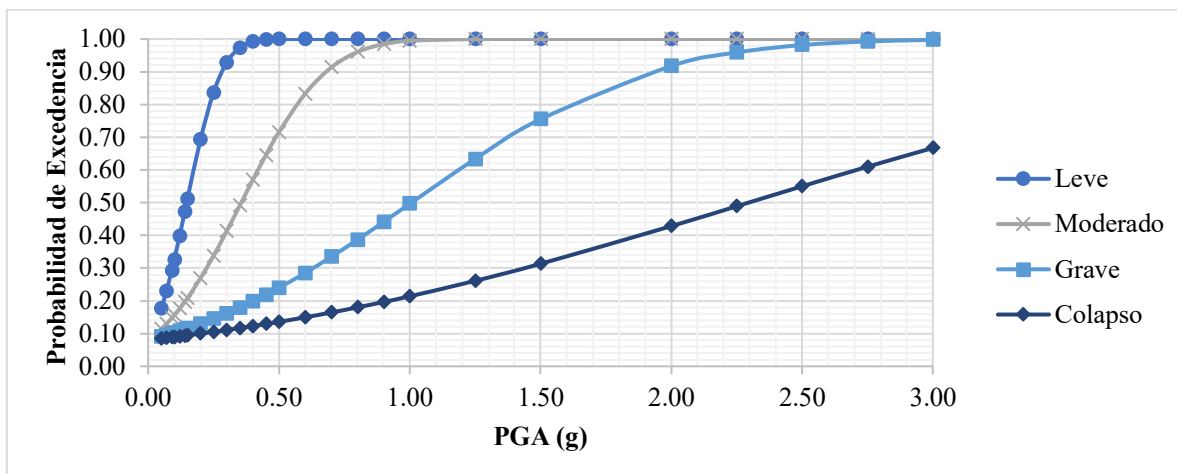


Figura 2.7 Curva de fragilidad de edificios de muros de concreto reforzado entre 8 y 19 pisos.

Fuente: Adaptado de FEMA (2015b)

Una vez definidas las curvas de fragilidad para las estructuras más comunes, se indagó sobre investigaciones que permitan al autor asociar los diversos estados de daños con pérdidas económicas. En la sección 2.3.4 siguiente se indica el modelo de consecuencias adoptado.

2.3.4. MODELO DE CONSECUENCIAS

Los modelos de consecuencias transforman los estados de daños en pérdidas económicas. Generalmente estos modelos provienen de opinión de expertos al observar y analizar los estados de daños de estructuras afectadas por eventos sísmicos ocurridos y asociando luego los costos requeridos para reparar, rehabilitar o reponer la edificación.

Durukal, Erdil, Sestyan & Fahjan (2006) crearon un modelo de consecuencias basado en la observación de edificios dañados por sismos en Estambul. El modelo está fundamentado en opinión de expertos en el mercado de seguros, se estimaron los niveles de daños según la escala macro sísmica europea (EMS) y los costos de reposición asociados para cada estado de daños. El modelo propone los siguientes porcentajes de pérdidas: Grado 1 (10% de pérdidas), grado 2 (20% de pérdidas), grado 3 (40% de pérdidas), grado 4 (90% de pérdidas), y grado 5 (100% de pérdidas). Por otro lado, DiPasquale & Goretti (2008) proponen un modelo de consecuencias basado en observación de daños en edificios residenciales por eventos sísmicos ocurridos en Italia. Los investigadores proponen 6 estados de daños: Ninguno (no hay pérdidas), leve (4.1% de pérdidas), moderado (21.8% de pérdidas), fuerte (41% de pérdidas), muy fuerte (78.1% de pérdidas) y colapso (81.4% de pérdidas). Tanto Durukal et al. (2006) como DiPasquale & Goretti (2008) proponen promedio de pérdidas considerando la desviación estándar.

Con la finalidad de coincidir con los estados límites de daños propuestos por Acevedo et al. (2017), Villar-Vega et al. (2017) y FEMA (2015b), el presente trabajo propone un nuevo modelo de consecuencias basado en los estudios de Durukal et al. (2006), DiPasquale & Goretti (2008) y opinión de expertos. Este modelo considera cinco estados de daños: Ninguno, leve, moderado, fuerte y colapso, con porcentajes de pérdidas: 0%, 5%, 20%, 60% y 100% respectivamente (no se considera desviación estándar). La Figura 2.8 muestra las curvas de vulnerabilidad obtenidas para edificios de mampostería simple luego de asociar las curvas de fragilidad de Acevedo et al. (2017) y el modelo de consecuencias propuesto. Es importante considerar que para el caso específico de Colombia el autor de este trabajo desconoce la existencia de un modelo de pérdidas desarrollado para el país, razón por la cual se utilizan en el análisis de riesgo los valores indicados previamente.

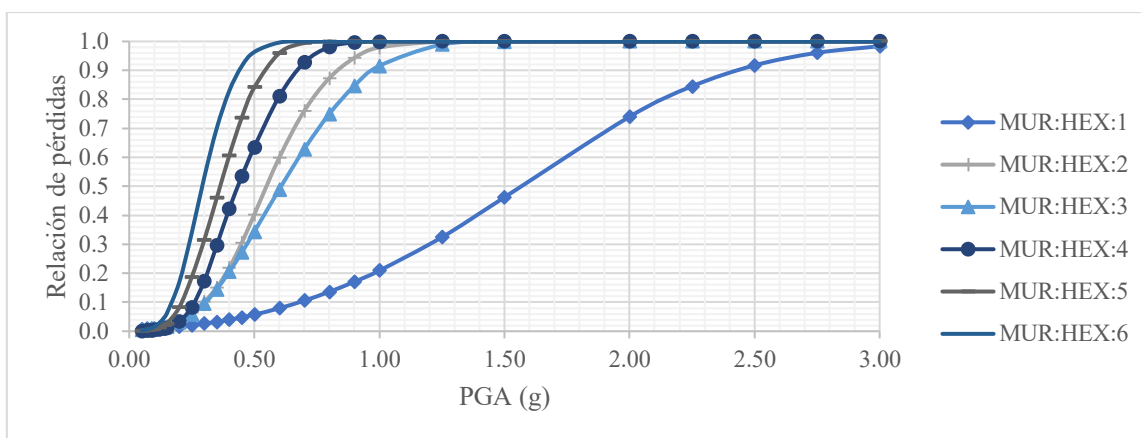


Figura 2.8 Curva de vulnerabilidad de mampostería simple de 1 a 6 pisos.
Fuente: Curvas de fragilidad de Acevedo et al. (2017) transformadas a curvas de vulnerabilidad usando el modelo de consecuencia propuesto.

2.4. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DEL RIESGO SÍSMICO

Para integrar los parámetros del modelo de exposición, vulnerabilidad y amenaza, y calcular así el riesgo sísmico, se usó el programa OpenQuake desarrollado por GEM, el cual se ha programado con base al estado del arte en riesgo sísmico (GEM, 2018; Pagani et al. 2014; Silva et al. 2014). Este programa es de uso libre y de código abierto, permitiendo que desarrolladores de software puedan contribuir en pruebas y mejoramientos del código. A continuación, se exponen las principales características del programa:

- **Integración del modelo de amenaza sísmica.**

OpenQuake integra el modelo de amenaza sísmica del proyecto SARA. Usando este modelo de amenaza es posible desarrollar análisis de eventos estocásticos el cual da como resultado métricas del riesgo como la pérdida promedio anual, la curva de tasa de excedencia de pérdidas y da parámetros para la selección de escenarios sísmicos que reflejen la realidad del potencial sísmico alrededor de Barrancabermeja

- **Integración del modelo de exposición.**

El modelo de exposición que integra OpenQuake debe contener como mínimo la siguiente información: las coordenadas del centroide del polígono de análisis, las tipologías estructurales asociadas a ese polígono, la cantidad de edificaciones de cada tipología y sus costos de reposición. Dependiendo del nivel de detalle del modelo de exposición, este polígono mencionado podría ser un predio, manzana, barrio, comuna, ciudad o como lo defina el usuario. El programa también permite incluir información sobre costos asociados a flujos cesantes de negocios, deducibles de seguros, costos de elementos no estructurales, costo de contenidos, ocupantes de la edificación en escenario de día, noche y ocupantes transitorios.

- **Consideración de efectos de sitio.**

OpenQuake permite integrar modelos que consideren los efectos de sitio basados en la velocidad de onda de corte en los últimos 30 metros (V_{s30}) asociado a un polígono con coordenadas específicas. El tamaño del polígono dependerá del nivel de resolución que desee el usuario.

- **Integración de la fragilidad.**

El programa permite incluir curvas de fragilidad de: Estructuras, elementos no estructurales, ocupantes, contenidos e interrupción de negocios. La plataforma de Openquake cuenta con una amplia base de datos de curvas de fragilidad para estructuras las cuales son accesibles al usuario, además permite incluir curvas desarrolladas por el usuario para algún fin específico.

- **Integración de la vulnerabilidad.**

Por medio del modelo de consecuencias es posible pasar de estados de daños a pérdidas económicas. El programa permite incluir el modelo de consecuencias que mejor se adapte al estudio de usuario.

- **Análisis estocástico de eventos sísmicos.**

Para el cálculo de eventos estocásticos, OpenQuake permite generar rupturas en fuentes sismogénicas de manera aleatoria, teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada fuente. El análisis estocástico muestra las estimaciones más probables de pérdidas económicas, así como un rango de valores en donde es más o menos probable que se presenten pérdidas de un valor y periodo de retorno específico.

El análisis estocástico da como resultado la curva de tasa de excedencia de pérdidas, el promedio de esta curva distribución se denomina pérdida promedio anual (AAL por sus siglas en inglés), resultado del promedio de pérdidas considerando la frecuencia de ocurrencia de cada evento. El AAL es útil para conocer cuál es el valor por el que una propiedad o grupo de bienes deberían asegurarse anualmente para alcanzar las pérdidas económicas que puedan generar los terremotos durante varios años.

Los parámetros principales que definen la amenaza en el análisis estocástico son:

- ❖ Modelo de amenaza: Estudio probabilístico de la amenaza sísmica de la zona de estudio. Para este estudio se usó el modelo del proyecto SARA.
- ❖ Influencia de las ecuaciones de atenuación: Contiene la influencia de las diversas ecuaciones de predicción de movimiento del terreno las cuales se muestran en la Tabla 2.1. Se le llama Árbol lógico a las posibles combinaciones entre GMPE:
- ❖ Efectos de sitio: Se expresan en términos de la velocidad de onda de corte a los 30 metros de profundidad.
- ❖ Nivel de truncamiento: Es usado para considerar la distribución lognormal de las GMPE.
- ❖ Distancia máxima entre la fuente sismogénica y el lugar de estudio.
- ❖ Periodo de tiempo en el cual se hará el estudio de amenaza.
- ❖ Cantidad de eventos estocásticos por rama del “Árbol lógico”: Este parámetro define la cantidad de eventos que van a ser generados para cada rama del árbol lógico. Cada evento representa el potencial de la fuente sísmica durante el tiempo de investigación de la amenaza.
- ❖ Tiempo de investigación del riesgo: Periodo en el cual el valor AAL y la curva de excedencia de pérdidas serán calculados.

- **Análisis de escenarios sísmicos.**

Si bien el análisis estocástico incluye una amplia cantidad de eventos sísmicos que anualmente generan un conjunto de pérdidas económicas, es conveniente analizar escenarios en específico para conocer en detalle cual es la distribución geográfica de los daños y pérdidas que podría generar un solo evento en particular. OpenQuake permite crear escenarios sísmicos con base en características de magnitud, profundidad focal, epicentro y geometría de la ruptura.

El análisis de los escenarios permite obtener parámetros que pueden usarse para orientar la respuesta de las entidades gubernamentales de atención de desastres, desarrollar planes de atención de emergencia, etc., dando prioridad a las zonas que se determinen como las más vulnerables.

3. DESARROLLO DEL MODELO DE EXPOSICIÓN

En este capítulo se expone el procesamiento de la información provista por entidades públicas, la aplicación de las metodologías de recopilación de información y el procesamiento de datos para obtener el modelo de exposición. Se muestra el desarrollo de encuestas y el procesamiento de éstas; se expone también como se consideró la incertidumbre en las encuestas y finalmente se muestran los resultados del modelo de exposición de la ciudad de estudio. El modelo da como resultado la siguiente información: cantidad de edificios residenciales, tipología estructural, número de pisos, área construida y costo de reposición.

3.1. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

La información provista por catastro, mostrada en la Tabla 2.2, es la base para el cálculo de la cantidad de edificaciones residenciales y área construida. Esta información debe ser procesada para obtener los datos precisos que requiere el modelo de exposición. A continuación, se expone la metodología para la manipulación de la información cartográfica, la identificación de zonas homogéneas en la ciudad, el área construida y el costo reposición.

3.1.1. ZONAS HOMOGÉNEAS.

Para definir las zonas homogéneas de la ciudad se determinó primeramente el nivel de resolución del modelo. Barrancabermeja está compuesta por 6 corregimientos y el centro urbano, este último se divide en 7 comunas las cuales suman un total de 234 barrios residenciales. El modelo de exposición para la zona urbana se desarrolló por barrios, mientras que para los corregimientos (zona rural con gran dispersión de viviendas) se generó a nivel de corregimientos.

El propósito de las zonas homogéneas es generar grupos de barrios con características similares. En cada zona se toman muestras estadísticas de cada uno de los parámetros del modelo de exposición.

El presente estudio planteó definir las zonas homogéneas de acuerdo a tres parámetros: Estratos económicos, altura de edificios y usos del suelo. Los aspectos urbanísticos propios de cada barrio de la ciudad están regulados por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT). El POT es la norma que define como se desarrolla el urbanismo de la ciudad, regula aspectos como el área construida máxima para cada predio, estratos socioeconómicos, usos del suelo y altura máxima permitida en las edificaciones. La información provista por catastro refleja el POT en cuanto a usos del suelo. Fue necesario consultar otros aspectos como la distribución en altura de las edificaciones en la ciudad y los estratos socioeconómicos.

- **Estrato socioeconómico**

Los estratos socioeconómicos en Barrancabermeja varían entre 1 y 6, siendo 1 el estrato donde residen las personas de menores recursos económicos y 6 donde residen las personas de mayores ingresos. El estrato influye en los métodos y calidad de la construcción, se entiende que entre mayor estrato posea una edificación, habrá más recursos destinados a diseños, materiales de calidad, y supervisión técnica en obra. Investigadores como Gonzalez (2017) y Osorio (2015) proponen calcular el costo de reposición de cada edificio en función de su estrato económico.

Para generar el mapa socioeconómico de Barrancabermeja se usó la información secundaria de la Alcaldía de Barrancabermeja (2015) en el cual se describen los estratos de cada comuna y sus barrios pertenecientes.

La Figura 3.1 muestra el mapa socioeconómico de la zona urbana de Barrancabermeja. Se observa que un gran porcentaje de la ciudad pertenece a estratos 1 y 2. Cerca de las instalaciones de refinería de petróleo (Ecopetrol), se emplazan los barrios de mayor estrato. En los corregimientos predominan los estratos 1 y 2.

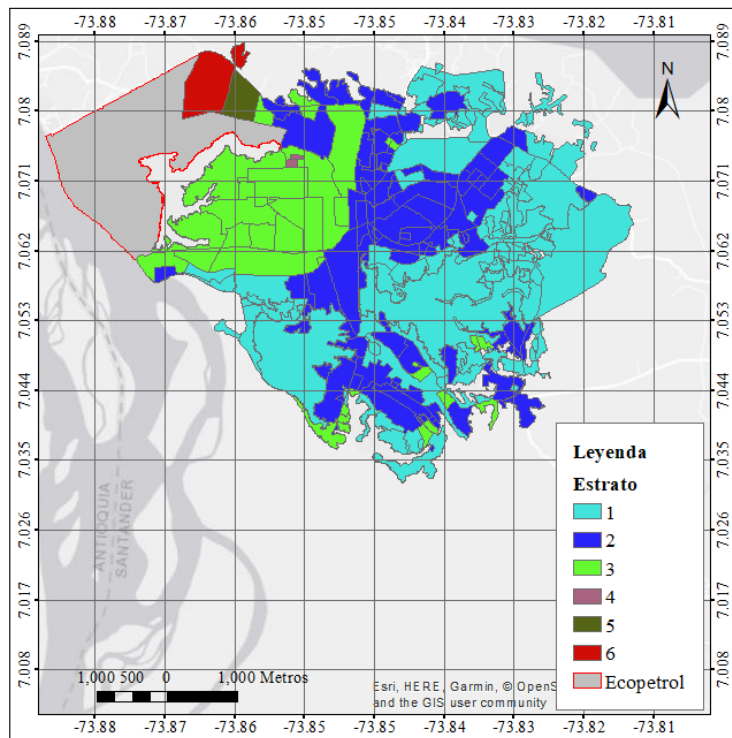


Figura 3.1 Distribución de estratos socioeconómicos de los barrios de la zona urbana.
Fuente: Elaboración propia.

Si bien los barrios se caracterizaron usando los seis niveles socioeconómicos, para las zonas homogéneas únicamente se definieron 3 niveles como lo ilustra la Tabla 3.1. Se agruparon

los estratos ya que, en Barrancabermeja, las zonas de estratos 1 y 2, presentan características homogéneas en sus construcciones al igual que los estratos 3-4 y 5-6.

Tabla 3.1 Código de estratos socioeconómicos

Nivel Socioeconómico	Código
Estrato 1 y 2	E1,2
Estrato 3 y 4	E3,4
Estrato 5 y 6	E5,6

- ***Distribución en altura***

El número de niveles de una edificación esta correlacionada a la tipología estructural. Desde el diseño estructural, la NSR-10 limita en altura algunas tipologías estructurales. Al analizar la cultura de construcción en la ciudad de estudio, se entiende que la tendencia de uso de mampostería, concreto reforzado u otros materiales depende de la cantidad de niveles que posea la edificación.

Para caracterizar Barrancabermeja según el número de pisos de los edificios fue necesario conocer muy bien los barrios de la ciudad. Durante varios meses se recorrió las calles de la ciudad de manera virtual y física, identificando las características principales de sus edificaciones. Al observar la ciudad, se encontró que sus edificaciones son en su mayoría de 1 y 2 niveles; se observó además que el centro de la ciudad posee la mayoría de los edificios entre 2 y 15 pisos. Por criterio del investigador se generaron dos códigos que pretenden diferenciar la predominancia en altura de sus edificaciones, éstos se muestran en la Tabla 3.2. Al asignar estos códigos a cada barrio se obtiene el mapa de distribuciones en altura mostrado en la Figura 3.2. Este mapa fue un primer acercamiento para comprender la distribución de estructuras de la ciudad y la base para tomar la muestra estadística de edificios. Los corregimientos se trataron como zonas tipo A1.

Tabla 3.2 Tipos de distribuciones en altura.

Altura > 50%	Código
1 nivel	A1
2 o más niveles	A2

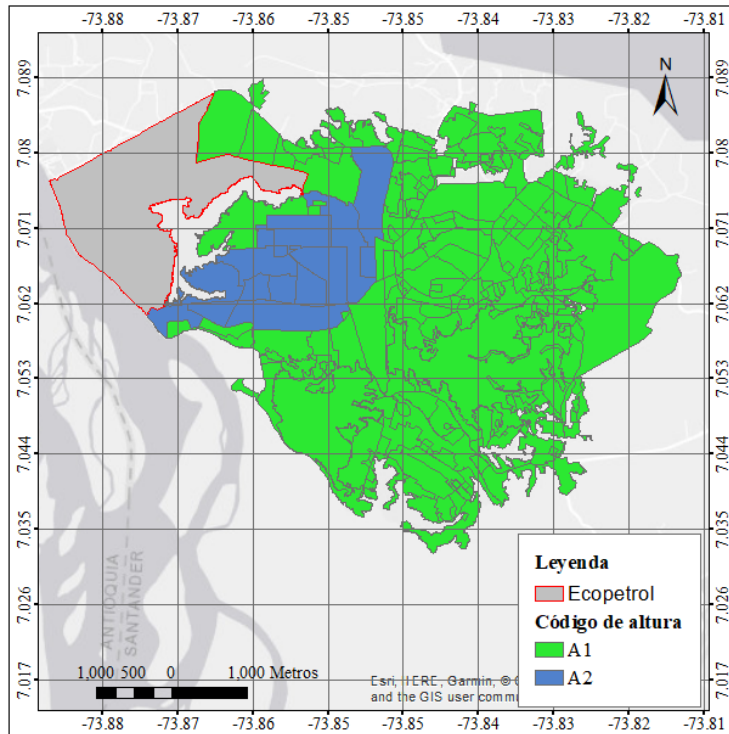


Figura 3.2 Distribuciones en altura de los barrios.
Fuente: Elaboración propia.

- **Uso predominante del suelo.**

El uso de una edificación influye en los diseños y métodos de construcción. Desde el diseño estructural, las cargas de diseño varían según el uso, además la NSR-10 exige incrementar las intensidades sísmicas por un factor llamado *Coficiente de importancia* en aquellas edificaciones indispensables como hospitales, estaciones de bomberos entre otras. Se entiende entonces que la resistencia sísmica de edificios residenciales es menor a la de edificios de alta importancia. Desde los métodos de construcción también existen diferencias notables en cuanto a configuración estructural y materiales empleados para cada uso. Por ejemplo, en centros comerciales generalmente existen mayores alturas de entrepiso, vanos más largos, hay mayor uso de divisiones livianas y las divisiones en mampostería no están adosadas a la estructura. Se concluye entonces que el uso influye directamente en la resistencia de la estructura y su curva de fragilidad.

El uso predominante en un barrio está relacionado a las normativas urbanísticas de la ciudad las cuales regulan el uso de los predios de la ciudad. Algunos barrios se caracterizan por tener algún uso exclusivo.

La Figura 3.3 muestra las actividades predominantes de la zona urbana de la ciudad: Comercio liviano y servicios de bajo impacto urbanístico, comercio y servicios de escala

urbana, servicios empresariales, industria de bajo impacto urbanístico, industria de refinación del petróleo, residencial con actividad económica, residencial especial y residencial neto.

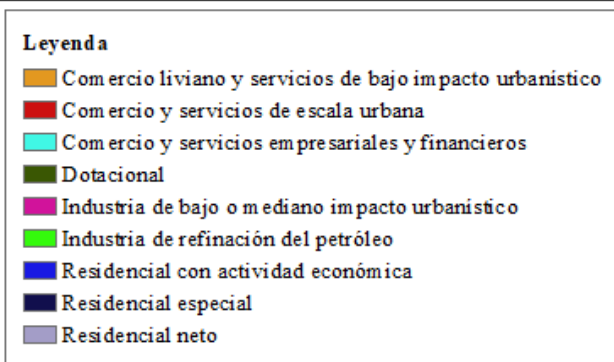
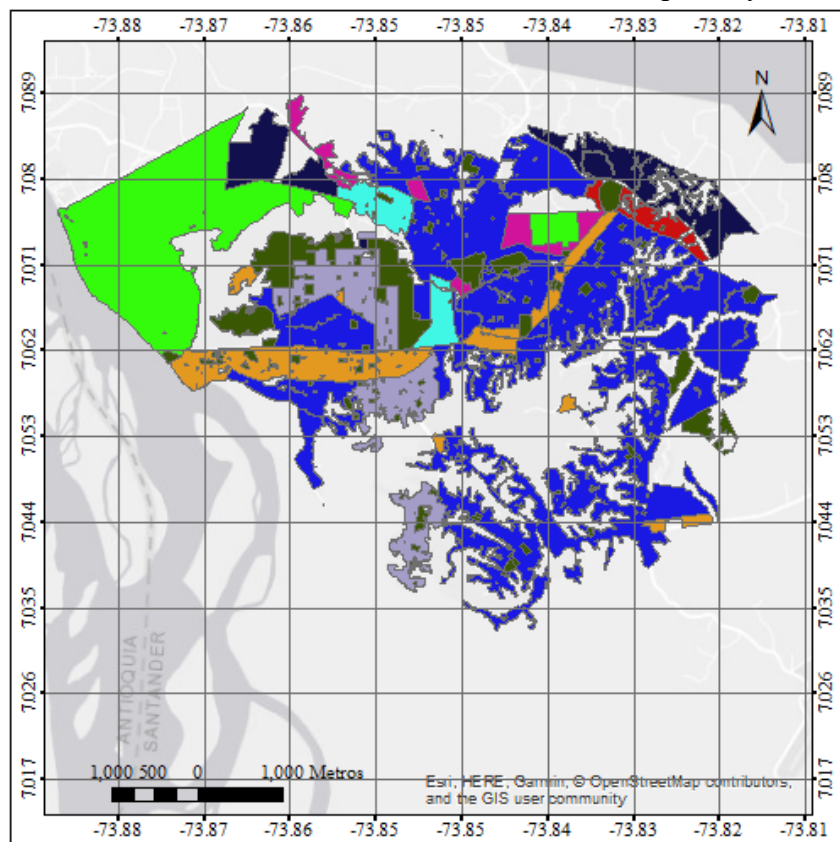


Figura 3.3 Usos de suelo de cada barrio.

Fuente: Elaboración propia.

Por fines de simplicidad en la definición de zonas homogéneas, se agruparon las actividades en los cinco grupos expuestos en la Tabla 3.3. Se determinó la predominancia del uso de acuerdo al porcentaje de área en cada barrio.

Tabla 3.3 Códigos de usos de suelo.

Usos de suelo.	Código
Residencial (100% Área)	RES
Mixto (Residencial y otros)	MIX
Comercial (>50% Área)	COM
Industrial (100% Área)	IND
Dotación (100% Área)	DOT

- ✓ **Residencial (RES):** Agrupa los usos *residencial especial* y *residencial neto* las cuales son zonas de uso exclusivo de viviendas.
- ✓ **Mixto (MIX):** Representa las zonas residenciales con actividad económica.
- ✓ **Comercial (COM):** Incluye las zonas de actividad de comercio liviano y servicios empresariales y servicios de bajo impacto urbanístico. Posee algunas zonas residenciales.
- ✓ **Industria (IND):** Incluye la industria de bajo y mediano impacto urbanístico y de refinación de petróleo. No contiene zonas residenciales.
- ✓ **Dotación (DOT):** Zonas de equipamientos públicos como instalaciones deportivas, estaciones de bomberos, centros de salud, entidades gubernamentales entre otras. No contiene zonas residenciales.

A cada barrio se le asignó un código dependiendo de la actividad que predomina en su área. Aquellos barrios que no poseen zonas residenciales, no se consideraron en el cálculo del riesgo sísmico. Los asentamientos o barrios de invasión que no se encuentran bajo alguna de las zonas de actividad mostradas en la Figura 3.3 se trataron como zonas residenciales. Los corregimientos son área de uso mixto debido a que poseen zonas residenciales que se complementan con zonas de diversos usos: Comerciales, industriales e institucionales. Finalmente se obtuvo el mapa mostrado en la Tabla 3.4 el cual muestra los barrios caracterizados por su uso predominante.

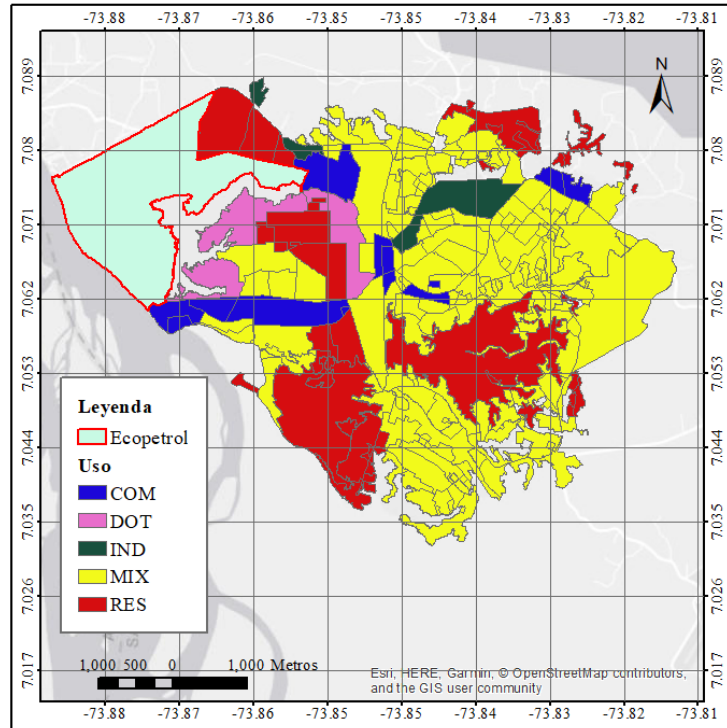


Figura 3.4 Códigos de usos predominantes en cada barrio.
Fuente: Elaboración propia.

- **Zonas homogéneas.**

El código de las zonas homogéneas se compone de sus tres características principales: Estrato *socioeconómico* / *Altura* / *Uso*. Luego de caracterizar cada barrio, se obtuvo un total de 13 zonas homogéneas las cuales se ilustran en el mapa de la Figura 3.5. Las zonas de uso industrial y de dotación se omitieron en el presente estudio ya que carecen de construcciones residenciales, finalmente se obtuvo un total de 9 zonas de interés para el presente estudio, las cuales se describen en la Tabla 3.4.

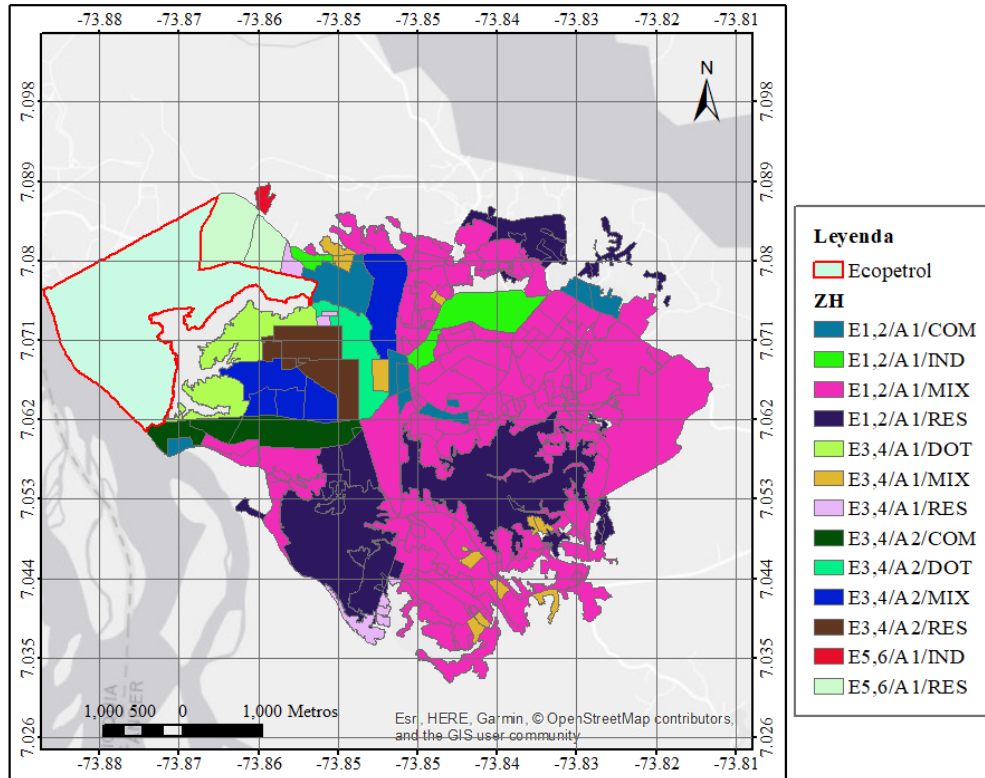


Figura 3.5 Mapa de zonas homogéneas.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4 Zonas homogéneas de interés

Zonas estudiadas	Descripción
E1,2/A1/COM	Zona de estrato 1 y 2, cuyas edificaciones son en su mayoría de un piso y se caracteriza por ser una zona comercial principalmente.
E1,2/A1/MIX	Zona de estrato 1 y 2, cuyas edificaciones son en su mayoría de un piso y se caracteriza por ser una zona residencial con actividad comercial.
E1,2/A1/RES	Zona de estrato 1 y 2, cuyas edificaciones son en su mayoría de un piso y se caracteriza por ser una zona únicamente residencial.
E3,4/A2/COM	Zona de estrato 3 y 4, cuyas edificaciones en su mayoría son de 2 pisos o más y se caracteriza por ser una zona comercial principalmente.
E3,4/A1/MIX	Zona de estrato 3 y 4, cuyas edificaciones son en su mayoría de un piso y se caracteriza por ser una zona residencial con actividad comercial.
E3,4/A1/RES	Zona de estrato 3 y 4, cuyas edificaciones son en su mayoría de un piso y se caracteriza por ser una zona únicamente residencial.
E3,4/A2/MIX	Zona de estrato 3 y 4, cuyas edificaciones en su mayoría son de 2 pisos o más y se caracteriza por ser una zona residencial con actividad comercial.
E3,4/A2/RES	Zona de estrato 3 y 4, cuyas edificaciones en su mayoría son de 2 pisos o más y se caracteriza por ser una zona únicamente residencial.
E5,6/A1/RES	Zona de estrato 5 y 6, cuyas edificaciones en su mayoría de un piso y se caracteriza por ser una zona únicamente residencial.

La Figura 3.6 muestra la cantidad de barrios que fueron asignados a cada zona homogénea, se observa que la zona E1,2/A1/MIX representa el 68.33% de los barrios de la ciudad, seguido de zona E1,2/A1/RES con un 12.92%, lo cual indica que más de un 80% las construcciones de la ciudad son casas un piso, de estrato 1 y 2.

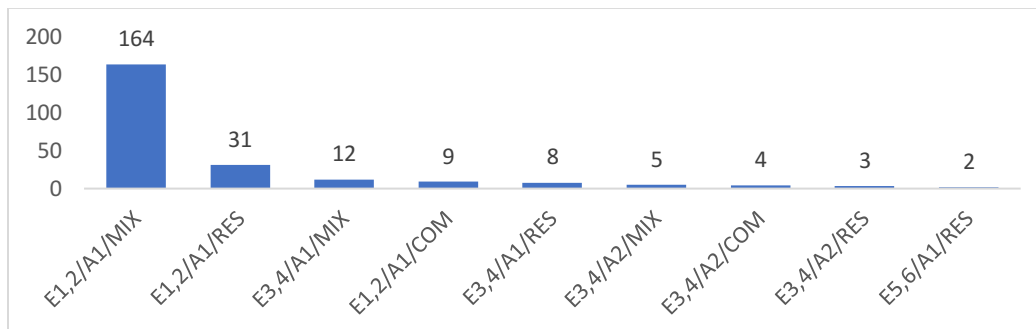


Figura 3.6 Cantidad de barrios asignados para cada zona homogénea.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. ÁREA CONSTRUIDA

El área construida es uno de los parámetros más influyentes en el resultado de la evaluación de pérdidas económicas cuando se asocia el costo de reposición con el área construida, por tal razón este parámetro se calculó con la mayor precisión posible.

Usando los polígonos de espacios e instituciones públicas se pudo identificar fácilmente los predios correspondientes a hospitales públicos, centros de salud, instituciones educativas, zonas verdes, edificios gubernamentales, estaciones de bomberos, estaciones de policía, zonas militares e instalaciones deportivas. Estos predios al no ser residenciales se omitieron en el modelo de exposición.

Para identificar predios privados con uso diferente al residencial, se usó ortofotos de alta resolución de todo el centro urbano. Generalmente los predios industriales, bodegas, centros comerciales, poseen grandes áreas a comparación de los predios residenciales. En la Figura 3.7 se ilustra que la proporción del área de algunos polígonos de uso No residencial (señalados con círculos) es mayor al promedio del área de lotes residenciales.

No todos los predios No-residenciales se identificaron usando la ortofoto, por lo que se usaron encuestas para determinar distribución de usos. El procesamiento de encuestas se describe en el capítulo 3.2.1



Figura 3.7 Identificación de lotes no residenciales.
Fuente: Elaboración propia

El inconveniente a la hora de calcular el área construida usando los polígonos de los predios fue que estos contienen tanto área construida como zonas verdes de antejardines y patios traseros; en otras palabras, los predios también incluyen área sin construir. Otro inconveniente fue que el área obtenida usando los polígonos de predios es área en planta y no tiene en cuenta el área construida de las losas áreas de los edificios de 2 o más niveles. Por estas razones se creó una metodología para ajustar el área de predios (información base) para obtener el área construida real, ésta se expone a continuación.

- **Invasiones y lotes no construidos.**

Usando la herramienta ArcGIS y una ortofoto a escala 1:500, se generaron nuevos polígonos para aquellas áreas construidas que no poseían predios registrados por catastro, posiblemente por ser invasiones o construcciones no legalizadas. De manera contraria, se eliminaron aquellos predios de lotes vacíos (sin construir). En la Figura 3.8 se ilustra como algunas construcciones no poseen polígonos; también se observa que existen polígonos asignados a zonas sin construir.



Figura 3.8 Lotes vacíos e invasiones.
Fuente: Elaboración propia

- **Uniformidad de predios**

Para considerar el área no construida en los lotes, se clasificaron las manzanas de los barrios según la uniformidad de los lotes. Durante el análisis de la información cartográfica se observó que aquellos barrios cuyos lotes poseen tamaños similares entre sí y formas geométricas regulares (rectángulos y cuadrados), tienden a tener mayor porcentaje de área construida en el lote, mientras que aquellos barrios con manzanas y lotes de tamaños irregulares y formas geométricas atípicas, poseen más zonas verdes (sin construir).

La Figura 3.9 muestra a manera de ejemplo lo que sería un barrio con lotes uniformes (LU), con tamaños similares y zonas verdes pequeñas, la Figura 3.10 muestra un barrio con manzanas irregulares (IR) y la Figura 3.11 exhibe un barrio que posee gran cantidad de zonas verdes y lotes muy irregulares (LMIR)



Figura 3.9 Barrio con manzanas y predios uniformes (LU)
Fuente: Elaboración propia



Figura 3.10 Barrio con manzanas y predios irregulares (LIR)
Fuente: Elaboración propia

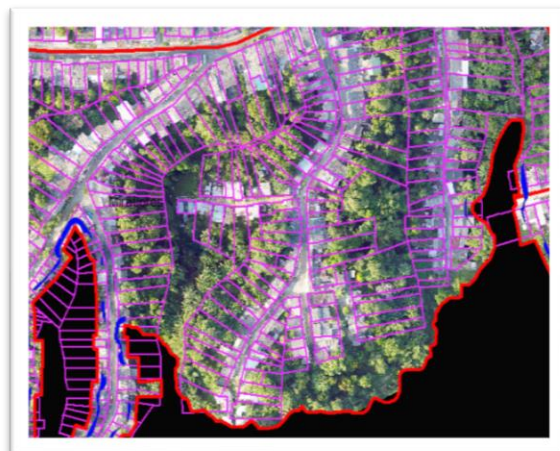


Figura 3.11 Barrio con manzanas y predios muy irregulares (LMIR)
Fuente: Elaboración propia

Para crear un índice que revelara el área ocupada del lote, se seleccionó los barrios Alcazar, Esperanza y Miraflores, los cuales se asumieron como lotes uniformes, irregulares y muy irregulares respectivamente. A cada uno se le dibujo los polígonos correspondientes al área real construida. Al comparar el área construida con el área los predios de los lotes de cada barrio, se obtuvo el porcentaje promedio ocupado de los predios. La Tabla 3.5 muestra los porcentajes de área ocupada obtenidos para los barrios analizados.

Tabla 3.5 Índice de área ocupada del predio (Ioc).

Tipo de predios	Código	Porcentaje ocupado (Ioc)
Lotes Uniformes	LU	90%
Lotes Irregulares	LIR	84%

Tipo de predios	Código	Porcentaje ocupado (Ioc)
Lotes Muy Irregulares	LMIR	48%

A cada barrio se le identifico el tipo de lote que posee en cuanto a uniformidad o irregularidad. Para calcular entonces el área construida total se sumó el área de todos los predios del barrio en análisis y se multiplicó por su correspondiente porcentaje de área ocupada. Para considerar el área construida de edificios de dos o más pisos, se determina la proporción de área correspondiente a una tipología “E_i” y se multiplica por la cantidad de pisos que posea (N_i), tal como lo muestra la Ecuación (1).

$$Ac = Ab * Ioc * E_i * N_i \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

- Ac: área construida real (m²)
- Ioc: Índice de área ocupada en planta.
- Ab: Área de todos los lotes de un barrio (m²)
- E_i: Porcentaje de edificios de una tipología estructural “i” (%)
- N_i: Número de pisos que posee la tipología estructural” “i”

La ecuación (1) asume como hipótesis que la proporción de edificios de cierta tipología se mantiene igual a la proporción de área ocupada en planta. Por ejemplo, si para una zona homogénea el 77% de las construcciones son de una tipología estructural (E_i), entonces el 77% del área ocupada en planta también será de esa tipología y ésta se multiplica por el número de pisos que posea (N_i) para obtener el área total construida. Los parámetros E_i y N_i se exponen en el capítulo 3.2

3.1.3. COSTOS DE REPOSICIÓN DE VIVIENDAS.

El costo de reposición se refiere al costo requerido para construir un edificio (diseños, administración, mano de obra y materiales). El valor comercial de un inmueble no solo incluye los costos mencionados, sino también el valor del lote y la valorización del inmueble (plusvalía). Para el presente estudio, es de interés conocer el costo de reposición puesto que es el valor por el cual habría que reponer las construcciones dañadas o colapsadas sin incluir costo de lote y su valorización. Por opinión de constructores de la ciudad y usando como base el trabajo de Gonzalez (2015), se determinó el costo de reposición por cada m², para la ciudad de estudio, estos se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Costo de reposición por estrato y por metro cuadrado (COP).

Estrato	Costo de reposición/m ²
1	\$ 600,000
2	\$ 700,000
3	\$ 1,100,000
4	\$ 1,400,000

Estrato	Costo de reposición/m²
5	\$ 1,800,000
6	\$ 2,200,000

3.2. PROCESAMIENTO DE ENCUESTAS

Usando la información cartográfica de catastro fue posible determinar el área construida, número de predios y costos de reposición. Por medio de las encuestas digitales y presenciales se estudió como se distribuyen las tipologías estructurales en la ciudad y como se asocia el número de predios (lotes) con el número de construcciones en la ciudad. Esta sección expone entonces las metodologías para llevar a cabo las encuestas remotas y en campo, y se expone el procesamiento de éstas para obtener la información de interés.

3.2.1. DESARROLLO DE ENCUESTAS

Conociendo las zonas homogéneas de la ciudad se procedió a calcular la cantidad de encuestas necesarias para la investigación. Usando la metodología descrita por Spiegel & Stephens (2005), se calculó la cantidad de encuestas (muestras) requeridas para obtener un nivel de confianza del 95% (asumiendo una distribución normal y las constantes “p” y “q” iguales a 0.5), un porcentaje límite de error del 1.1% y una población total de 70,000 correspondiente a la cantidad aproximada de predios de la ciudad según (Alcaldía de Barrancabermeja, 2015). Con ello se obtuvo un tamaño muestral de 7,397 encuestas, lo cual es cercano al 10% de los predios de la ciudad.

A continuación, se describe la metodología para el desarrollo de encuestas digitales y de campo.

- **Encuestas digitales**

Las encuestas digitales o remotas se realizaron usando la herramienta Google Street View, la cual permite recorrer gran porcentaje de las vías de la ciudad y se consige, analizar las edificaciones, tomar registros fotográficos y tener georreferencia de las encuestas.

Para conocer cuales zonas se visitarían remotamente, se estudió el alcance que tiene la plataforma de Google Street View. La Figura 3.12 muestra las vías de la ciudad que poseen visualización. Más del 80% de las vías urbanas de la ciudad pueden ser recorridas con esta plataforma lo cual es bastante amplio para tomar el muestreo requerido. Por otro lado, las vías rurales en su mayoría no poseen visualización de Google Street View.

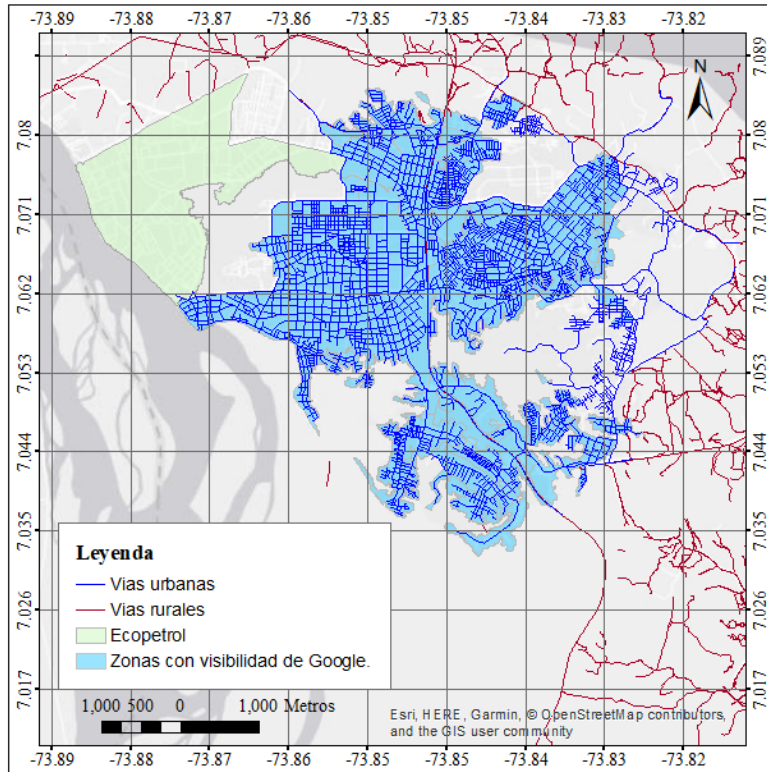


Figura 3.12 Visualización de Google Street View.
Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a recorrer las calles con la idea de encuestar al menos el 10% de los predios de cada zona homogénea. En total se realizaron 5,234 encuestas remotas en donde se recolectó la siguiente información: Nivel de incertidumbre al seleccionar la tipología estructural, los dos sistemas estructurales más probables de la edificación, coordenadas en WGS-1984, número de pisos y uso predominante.

- **Encuestas de campo**

Para la recolección de la información primaria por medio de encuestas de campo, se partió de la platilla de levantamiento detallado propuesta por la guía de Ávila et al. (2016). Para esto se hizo uso de las tecnologías de la información y la comunicación con el propósito de facilitar el diligenciamiento de la información en campo y su procesamiento. En este orden de ideas, se configuró una encuesta digital, en donde los profesionales haciendo uso de un celular, tableta electrónica, o cualquier elemento con conexión a internet pudieran llenar los datos de interés para el estudio.

Para este proceso se contó con seis cuadrillas de profesionales, en donde cada equipo estaba integrado por un ingeniero civil y un profesional social. El trabajo del profesional social iba encaminado a brindarle confianza a las personas que colaboraban con la encuesta, así como determinar aspectos socioeconómicos de la vivienda. En cuanto al ingeniero civil, su tarea iba encaminada a indagar las condiciones técnicas del interior y exterior de la edificación. La

Imagen 3.1 ilustra algunos de los momentos de interacción entre el ingeniero, el profesional social y el propietario de la edificación.

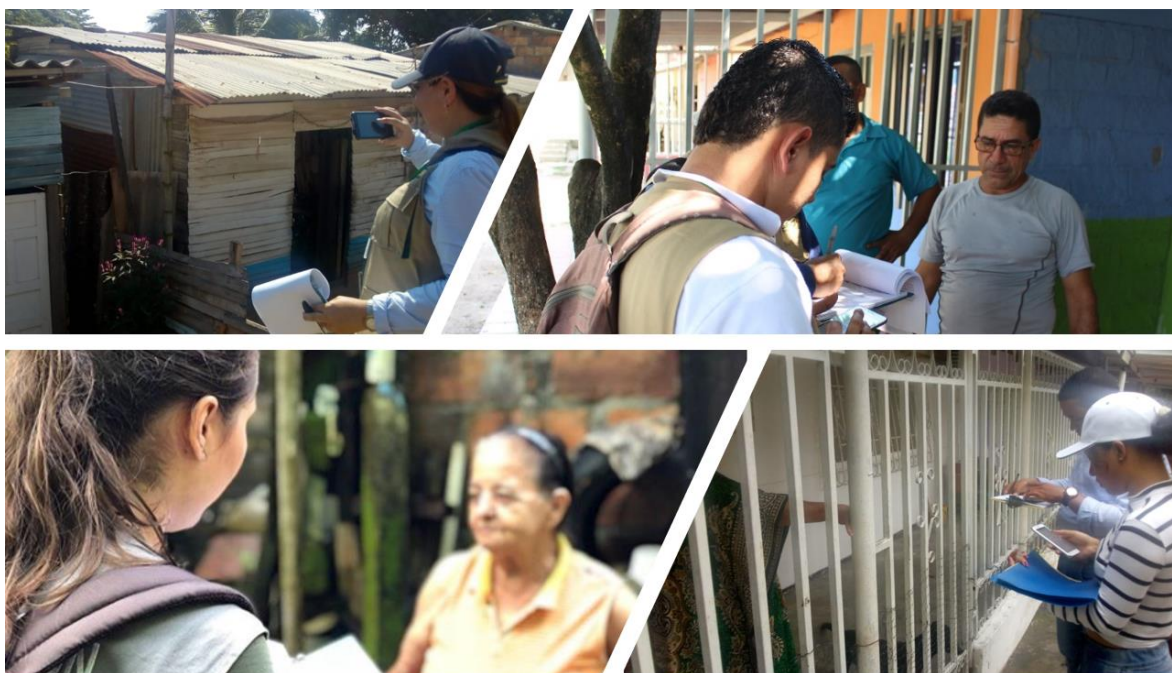


Imagen 3.1 Ingenieros realizando encuestas de campo.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron un total de 2,423 encuestas de campo en las cuales se obtuvo información de los dos sistemas estructurales más probables de la edificación, número de pisos, uso predominante, antigüedad de construcción, modalidad de construcción (autoconstrucción o supervisión técnica), estado de conservación (evaluación y diagnóstico de daños), existencia de servicios públicos en la vivienda, estrato socioeconómico, valor catastral y comercial de inmueble.

La Tabla 3.7 muestra la proporción de encuestas obtenidas para cada zona homogénea. La única zona homogénea a la cual no se tuvo acceso físico ni virtual fue la E5,6/A1/RES correspondiente al conjunto residencial de las instalaciones de Ecopetrol. Para conocer las características de las tipologías estructurales de esta zona se optó por encuestar a ingenieros concedores de las instalaciones de Ecopetrol quienes ayudaron a definir la distribución de tipologías estructurales de la zona E5,6/A1/RES. En la Figura 3.13 se ilustra la distribución espacial de las encuestas digitales y de campo.

Tabla 3.7 Número de encuestas por zonas homogéneas.

Zonas Homogéneas	Número de encuestas (digitales y de campo)	Número de predios	Muestra (%)
E1,2/A1/COM	233	2,262	10%
E1,2/A1/MIX	5,490	36,860	15%
E1,2/A1/RES	426	6,984	6%
E3,4/A2/COM	386	1,867	21%
E3,4/A1/MIX	82	1,713	5%
E3,4/A1/RES	64	612	10%
E3,4/A2/MIX	466	3,910	12%
E3,4/A2/RES	322	2,068	16%
TOTAL	7,657	56,276	100%

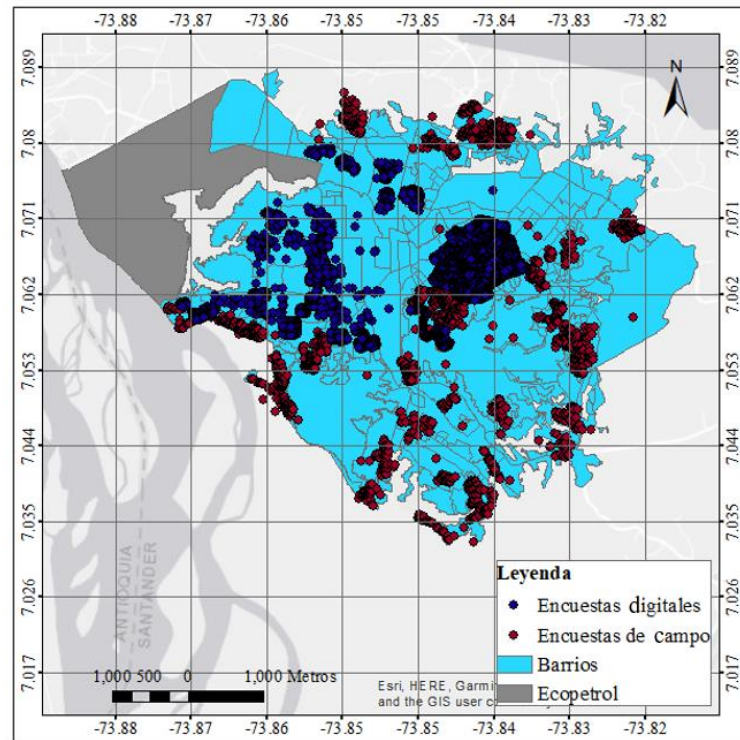


Figura 3.13 Distribución geográfica de encuestas en zona urbana.

Fuente: Elaboración propia

Como el acceso a los corregimientos usando Google Street View fue muy limitado, las encuestas obtenidas en estas zonas son únicamente de campo. La Figura 3.14 ilustra la ubicación espacial de las encuestas realizadas.

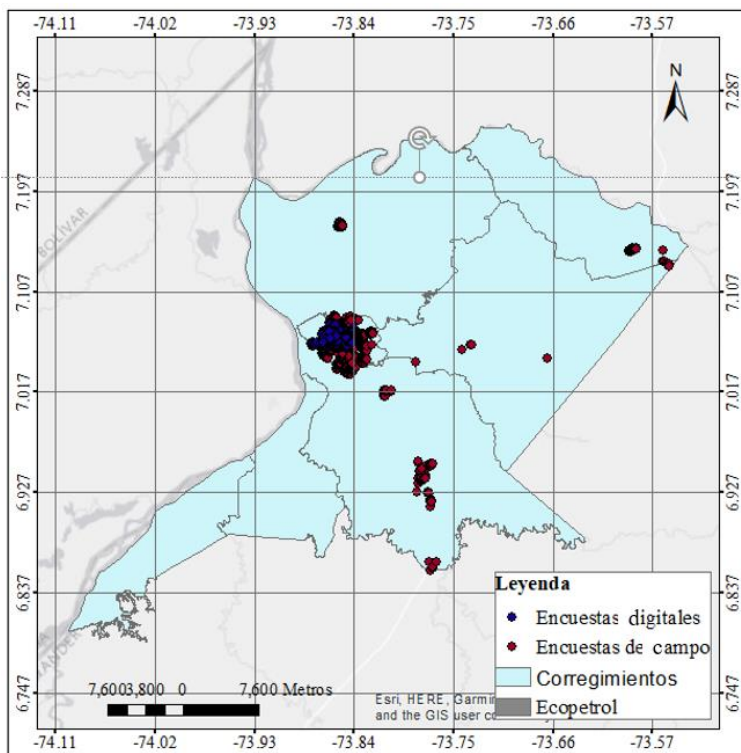


Figura 3.14 Encuestas de campo en los corregimientos
Fuente: Elaboración propia

Una vez ejecutadas las encuestas en las zonas de interés, se procedió a determinar cómo se distribuye el inventario de estructuras en cada barrio, de acuerdo a las muestras estadísticas que indican las encuestas. La distribución de tipologías según los resultados de las encuestas se define como “*Matriz de distribución de tipologías estructurales*” lo cual se describe a continuación.

3.2.2. MATRIZ DE DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES.

Una vez caracterizados los barrios según el tipo de zona homogénea a la que pertenecen, se determinó la distribución de las taxonomías en cada zona, haciendo uso de las encuestas. Teniendo la cantidad total de construcciones de las zonas homogéneas, se le asigna una tipología estructural de acuerdo al porcentaje dado en la matriz.

La Tabla 3.8 muestra los resultados de las encuestas remotas y de campo de la zona homogénea E1,2/A1/MIX. Si por ejemplo un barrio de esta zona homogénea posee 100 construcciones, 78 serán de mampostería no reforzada de 1 piso (MUR/LWAL+DNO/HEX:1), 3 edificios de mampostería no reforzada de 2 pisos (MUR/LWAL+DNO/HEX:2) y así sucesivamente hasta alcanzar el 100%. Los decimales se redondean a cero si son menores a 0.5 o a 1 si son mayores o iguales 0.5, siguiendo el ejemplo de los 100 edificios, los pórticos de concreto dúctiles de 4 pisos (CR/LFINF+DUC/HEX:4) representan 0.2 construcciones, por lo que se asumen como cero.

Tabla 3.8 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E1,2/A1/MIX

E1,2/A1/MIX	
Taxonomía	Ei (%)
CR/LFINF+DNO/HEX:1	0.18%
CR/LFINF+DNO/HEX:2	0.24%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	2.60%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	2.19%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	0.42%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	0.22%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	0.02%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	0.07%
CR/LWAL+DUC/HEX:1	0.23%
CR/LWAL+DUC/HEX:5	0.23%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	0.08%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	0.27%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	4.74%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	1.59%
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	0.07%
MR/LWAL+DUC/HEX:1	0.29%
MR/LWAL+DUC/HEX:5	0.07%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	77.50%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	3.20%
MUR/LWAL+DNO/HEX:3	0.22%
UNK/HEX:1	5.56%

Las matrices de distribución de taxonomía de cada zona homogénea se podrán encontrar en el Anexo A.

Si bien la matriz de distribución indica cual es el peso porcentual de cada tipología estructural, fue necesario conocer la cantidad de construcciones que existen en la zona de análisis y que proporción corresponden a edificios residenciales, para calcular finalmente el inventario de estructuras. Las siguientes secciones abarcan estos temas.

3.2.3. CANTIDAD DE CONSTRUCCIONES.

Una vivienda según el DANE se define como un hogar donde viven (duermen) y comparten servicios un grupo de personas que podrían ser o no ser parientes. Por otro lado, un edificio (o construcción) residencial contiene varias viviendas en proporción a su área construida y número de pisos. Para definir la cantidad de construcciones residenciales en la ciudad fue necesario estudiar la información cartográfica y las encuestas.

Se seleccionaron los barrios El Alcázar, La Esperanza y Miraflores para calcular la cantidad de edificios que componen el barrio. Al comparar estos datos con la cantidad de predios de

catastro, se obtuvo que son más las construcciones identificadas por encuestas que la cantidad de predios, tal como muestra la Tabla 3.9. Esta diferencia se debe a que, al realizar las encuestas, se calificó como edificación aquella que posee una única fachada y una misma cantidad de pisos en toda su área, es decir que, cuando hay dos construcciones en un mismo predio, pero con fachadas y geometrías diferentes, se generaron dos encuestas en vez de una.

Tabla 3.9 Índice de construcciones por predio.

	Código	Número de construcciones identificadas	Número de predios de catastro	Índice (Construcción/predio)
El Alcázar	LIR	559	442	1.265
La Esperanza	LU	1079	987	1.093
Miraflores	LMIR	534	437	1.222

En la ciudad es común ver que los edificios posean adiciones y ampliaciones en las construcciones que, aunque hacen parte de un mismo lote y/o propietario, poseen aspectos diferentes. También se observó que las construcciones de un nivel podrían tener 2 o más viviendas que cambian de fachada entre sí.

Las encuestas remotas difícilmente pueden demostrar cuando una edificación posee dos fachadas diferentes pero un único sistema estructural o si se trata de dos construcciones totalmente independientes. El presente estudio planteó entonces como hipótesis que únicamente se puede asociar una taxonomía estructural por predio; en este orden de ideas, la cantidad de predios puede ser igual a la cantidad de construcciones en la ciudad y, aunque existan más construcciones en un solo predio, las áreas construidas (principal factor para determinar el costo de reposición) tienen en cuenta todas las construcciones dentro del predio, pero se representan con una sola tipología estructural.

3.2.4. ÍNDICE DE CONSTRUCCIONES NO RESIDENCIALES (Iu)

Como se mencionó al inicio del informe, es de interés evaluar el riesgo de las viviendas de la ciudad, para ello fue necesario discriminar las construcciones según el tipo de uso. Durante el procesamiento de información cartográfica fue posible eliminar algunos lotes que se identificaron como No residenciales, aun así, no se alcanzó a identificar por completo todas las construcciones No residenciales. Usando entonces las encuestas digitales y físicas fue posible calcular la proporción entre edificios residenciales y edificios con otros usos.

La Tabla 3.10 muestra los índices de otros usos diferentes al residencial según los resultados de las encuestas. Este índice pretende restar a la cantidad de lotes de los barrios, la proporción correspondiente a usos No residenciales, como se muestra en la Ecuación 2.

Tabla 3.10 Índice de usos diferentes a residencias (Iu)

Uso de suelo que predomina en el Barrio	Índice de otros usos respecto al residencial
INDUSTRIAL (IND)	1.00
DOTACIÓN (DOT)	1.00
COMERCIO (COM)	0.30
MIXTO (MIX)	0.20
RESIDENCIAL (RES)	0.00

$$E = p * (1 - Iu) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

- E : Cantidad de edificios residenciales.
- p : Cantidad de predios.
- Iu : Índice de usos diferentes a vivienda.

Al compilar todas las encuestas se encontró que el 80% de las edificaciones encuestadas son residenciales, mientras que el 20% restantes pertenecen a otros usos.

3.3. RESULTADOS DEL MODELO DE EXPOSICIÓN INICIAL (M0)

El modelo de exposición describe las características de la infraestructura del lugar bajo estudio, entre ellas el sistema estructural de las edificaciones. Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se definió el sistema estructural mediante encuestas presenciales o remotas. En algunos casos la vista exterior de la edificación puede no ser suficiente para identificar claramente el sistema estructural, lo que genera una incertidumbre. Este trabajo buscó cuantificar el efecto de dicha incertidumbre en la evaluación del riesgo sísmico, como se detalla en el capítulo 5. Para tal fin, en el momento de realizar las encuestas se consignó para cada estructura los probables sistemas estructurales con su grado de confiabilidad.

Se definió entonces un modelo de exposición inicial (M0) en el cual se asignó a las edificaciones el sistema estructural definido como el más probable por el encuestador, es decir, un modelo de exposición que considere la *hipótesis inicial y más probable*.

La Figura 3.15 muestra que en las encuestas el 74% de los edificios encuestados se catalogaron como mampostería no reforzada en la opción más probable, siendo esta tipología la más usada en la ciudad. Los pórticos de concreto dúctil es la segunda tipología más usada con un 8%, seguida de la mampostería confinada dúctil con 8%. Las figuras 3.16 y 3.17 muestran el costo de reposición y el área construida de los grupos estructurales principales, respectivamente.

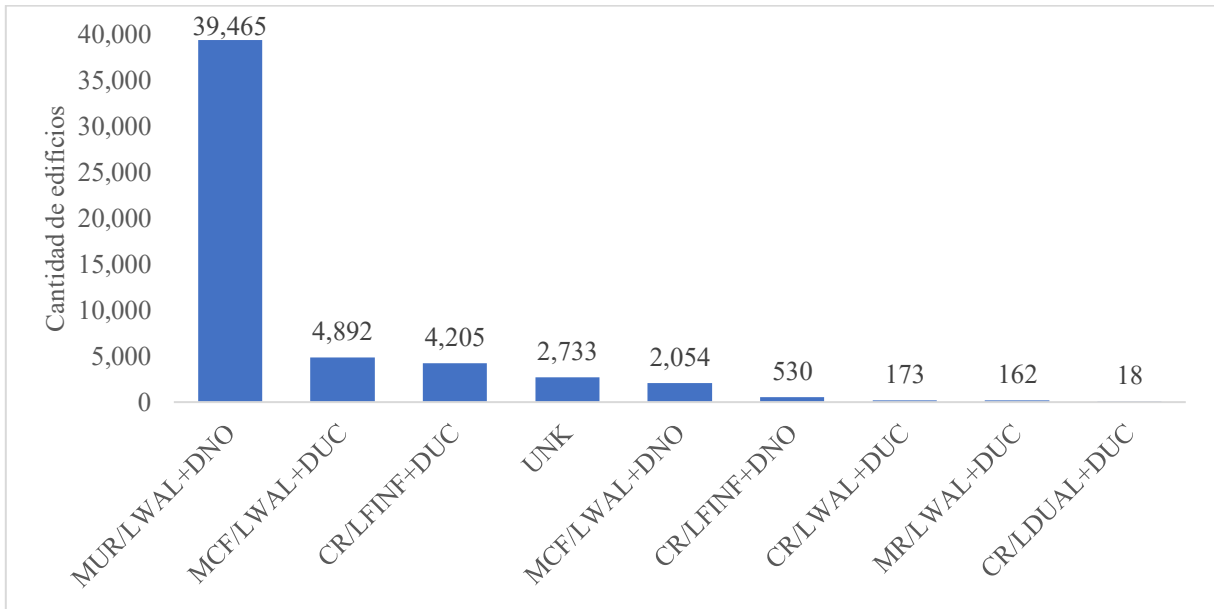


Figura 3.15 Tipologías estructurales seleccionadas en la opción más probable.
Fuente: Elaboración propia

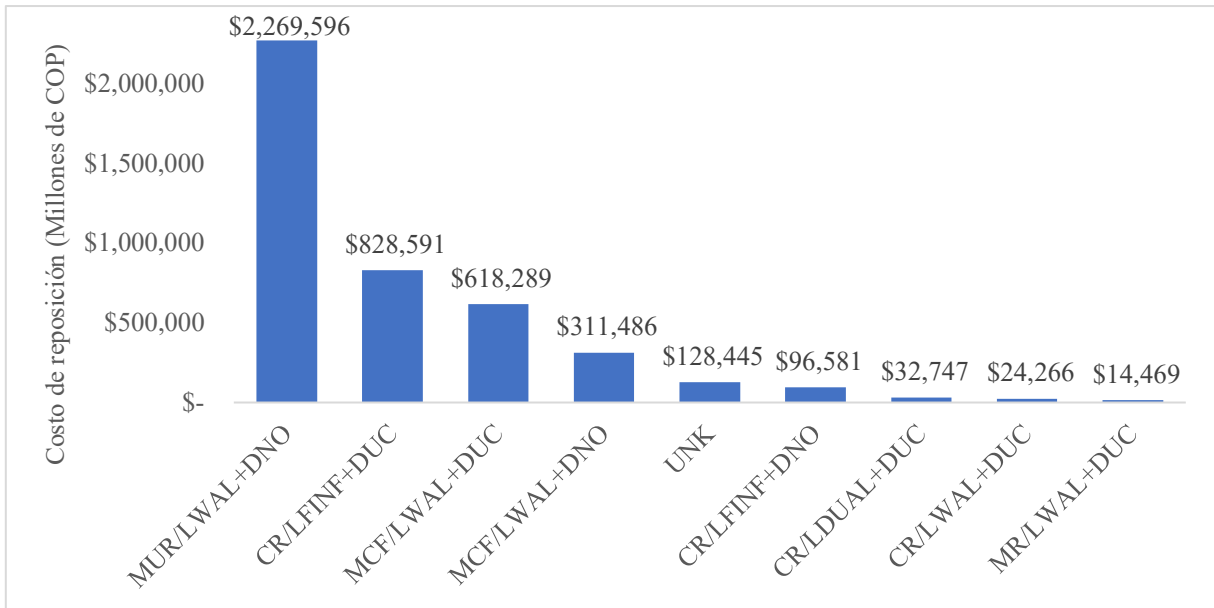


Figura 3.16 Costo de reposición (Millones de COP) del modelo de exposición M0.
Fuente: Elaboración propia

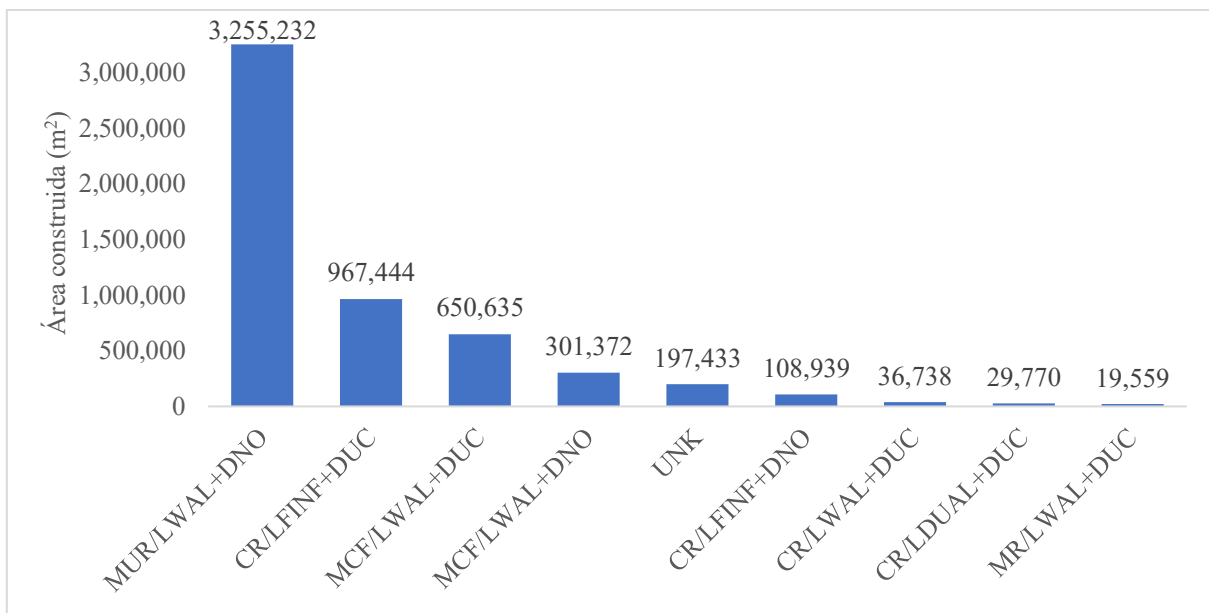


Figura 3.17 Área construida (m²) del modelo de exposición M0.

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de edificios, el área construida y los costos de reposición son valores constantes (son independientes de la tipología estructural). Estos valores dependen de la cantidad de predios, área de los predios y del estrato socioeconómico, respectivamente. Se obtuvo un total de 54,232 construcciones residenciales, un área construida de 5,567,123 m² y un costo de reposición de 4,324,469 millones pesos colombianos equivalentes a 4.32 billones de COP.

Estudios previos expuestos en la sección 2.2.2 arrojaron que para el 2014 Barrancabermeja poseía 69,433 predios y un área construida de 6,129,556 m². Considerando que dichos valores incluyen predios y área construida de todos los usos, al comparar este valor con los obtenidos en el modelo de exposición se encontró que las edificaciones residenciales calculadas presentan el 77% de los predios para el 2014, valor cercano al porcentaje de uso residencial medido en las encuestas, el cual fue del 80%.

3.4. VARIABILIDAD DEL MODELO DE EXPOSICIÓN.

Con el objetivo de considerar la variabilidad de las métricas del riesgo al incluir la incertidumbre del modelo de exposición, se generó una metodología que busca variar tipologías que suelen confundirse entre sí al realizar inspecciones externas. Al variar la cantidad de edificios de cada grupo estructural, es posible determinar cuáles taxonomías poseen mayor influencia en el resultado del riesgo y conocer el rango de valores que podría alcanzar las métricas del riesgo, en función del modelo de exposición.

3.4.1. CONFUSIÓN DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

Con la finalidad de analizar cómo influye la incertidumbre al seleccionar tipologías estructurales en los resultados del modelo de exposición y del riesgo sísmico, se crearon 13 modelos de exposición distintos al M0. Cada modelo considera la variación de una tipología estructural en específico. Se planteó usar los resultados estadísticos de la opción más probable elegida en las encuestas para crear el modelo inicial; a partir de éste, se varió cada tipología según las opciones más probables.

El análisis de las encuestas mostró que en el 21% de las encuestas no se estuvo seguro al asignar una tipología estructural. Esta incertidumbre se distribuye en las tipologías como muestra la Figura 3.18.

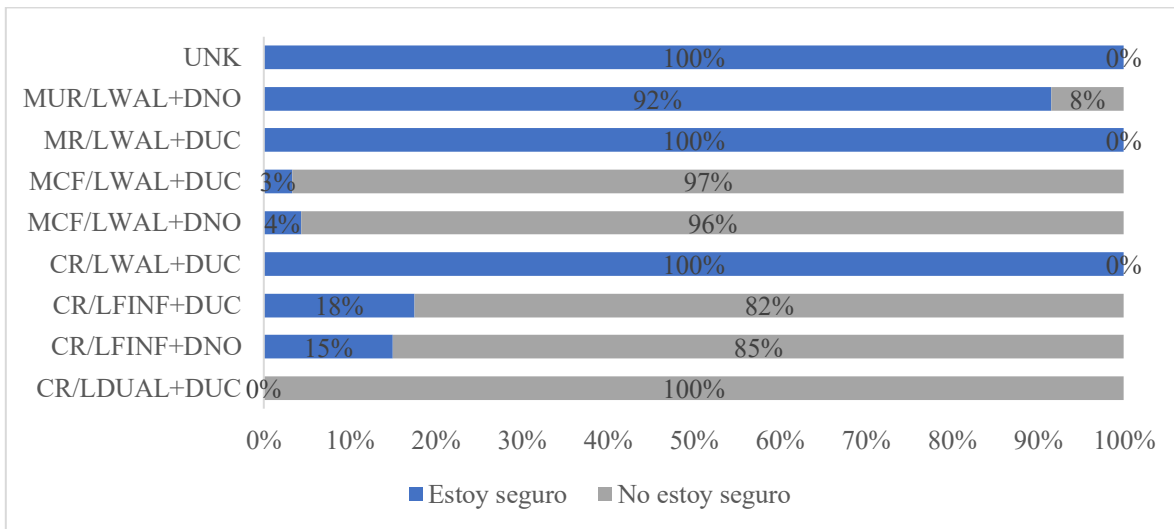


Figura 3.18 Nivel de incertidumbre de los principales grupos estructurales.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3.11 ilustra la matriz de las estructuras que más se confunden entre sí. En dicha tabla se muestra cuáles fueron los modelos de exposición creados a partir del modelo M0. Cada modelo considera la variación de una única tipología estructural, por ejemplo, el modelo M5, considera la variación únicamente de los pórticos de concreto dúctil (CR/LFINF+DUC) al ser confundidos en su totalidad por los pórticos de concreto no dúctiles (CR/LFINF+DNO). Al no variar simultáneamente todas las tipologías, es posible observar cual es la influencia de los pórticos de concreto en la variación de las métricas del riesgo. A continuación, se describe en detalle la razón de cada modelo de exposición.

Tabla 3.11 Matriz de confusión de tipologías estructurales

OTRAS OPCIONES PROBABLES									
TAX	CR LDUAL DUC	CR LFINF DNO	CR LFINF DUC	CR LWAL DUC	MCF LWAL DNO	MCF LWAL DUC	MR LWAL DUC	MUR LWAL DNO	UNK
OPCIÓN MÁS PROBABLE	CR LDUAL DUC		M1 (Desde 8 pisos)						
	CR LFINF DNO		M2			M3 (hasta 4 pisos)			
	CR LFINF DUC	M4 (Desde 8 pisos)	M5			M6 (hasta 4 pisos)			
	CR LWAL DUC								
	MCF LWAL DNO					M7		M8	
	MCF LWAL DUC		M9	M10		M11			
	MR LWAL DUC								
	MUR LWAL DNO					M12 (10% Única/)			
	UNK								

- Modelos M1 y M4

Las estructuras de sistemas combinados de concreto son estructuras asociadas generalmente a edificios altos (más de 8 pisos). Cuando existe incertidumbre en la identificación de la tipología CR/LDUAL/DUC, generalmente se confunde con pórticos dúctiles (CR/LFINF+DUC). Ambas tipologías tienen en común la presencia de columnas en su estructura. La NSR-10 exige que, para catalogar un sistema como dual, se debe demostrar que los muros estructurales asumen la responsabilidad de al menos el 75% de la cortante sísmica en la base; no es posible verificar este requisito solo con una inspección externa del edificio. A partir de esto se creó el modelo de exposición **M1** el cual se obtuvo al suponer que todas las taxonomías CR/LDUAL+DUC son en realidad CR/LFINF+DUC. De manera contraria el modelo **M4** supone la confusión entre pórticos de concreto dúctiles de más de 8 pisos (CR/LFINF+DUC) y sistemas combinados de concreto (CR/LDUAL+DUC).

- Modelos M2 y M5

Las estructuras de pórticos de concreto reforzado no dúctiles (CR/LFINF+DNO) se confunden con pórticos de concreto reforzado dúctiles (CR/LFINF+DUC). Cuando se realizan encuestas exteriores no siempre se obtienen evidencias que permitan justificar la ductilidad de los pórticos. Una de las características que permite categorizar la ductilidad es la antigüedad de la edificación, la cual se mide por el aspecto de la arquitectura y acabados de fachada; aun así, existe la posibilidad de que la arquitectura y los acabados sean modernos, pero que la edificación posea grandes déficits estructurales. El modelo **M2** intercambió entonces en la matriz de distribución la tipología CR/LFINF+DNO por CR/LFINF+DUC y, de manera contraria, el modelo **M5** intercambia los pórticos dúctiles (CR/LFINF+DUC) por pórticos sin ingeniería (CR/LFINF+DNO) para considerar la incertidumbre en las ductilidades.

- Modelo M3

Por otro lado, las tipologías CR/LFINF+DNO y MCF/LWAL+DUC tienen como factor común que la mampostería interactúa con los elementos estructurales de concreto. Los pórticos de concreto no dúctiles no cumplen con los requisitos de la NSR-10. En algunos casos es difícil diferenciar entre las columnas de confinamiento de la mampostería y las columnas de un pórtico que posee la mampostería adosada. Generalmente la confusión se genera para edificios entre 1 y 4 niveles, ya que es común que en la ciudad se construyan edificaciones de esta altura en mampostería confinada en vez de pórticos. Cuando los edificios superan los 4 niveles en la opción más probable predominan los pórticos. El modelo **M3** intercambió en la matriz de distribución la tipología CR/LFINF+DNO por MCF/LWAL+DUC

- Modelo M6

El modelo **M6** considera la confusión entre pórticos de concreto dúctiles (CR/LFINF+DUC) y mampostería confinada dúctil (MCF/LWAL+DUC). La confusión se da principalmente en edificios de 1 a 4 pisos. Los edificios de más de 4 pisos generalmente se relacionan a estructuras aporticadas.

- Modelo M7

La ductilidad de la edificación es quizás uno de los parámetros más difíciles de identificar en inspecciones externas. Las edificaciones en su mayoría poseen acabados que esconden la estructura y determinar la antigüedad de la edificación no siempre es exacto. La mampostería confinada sin ingeniería se confunde con la mampostería confinada dúctil cuando no hay evidencias en la fachada que justifiquen la ductilidad. El modelo **M7** cambió todas las tipologías MCF/LWAL+DNO por MCF/LWAL+DUC.

- Modelo M8

En algunos casos se confundió la mampostería confinada sin ingeniería (MCF/LWAL+DNO) con mampostería simple (MUR/LWAL+DNO). Es común

observar que las fachadas y paredes internas posean revoque en sus muros y otros recubrimientos que dificultan identificar el tipo de reforzamiento en la mampostería. El modelo **M8** consideró la confusión entre estas dos tipologías de mampostería mencionadas.

- Modelos M9, M10 y M11

Similar al modelo **M3**, la mampostería confinada dúctil (MCF/LWAL+DUC) se confunde con pórticos de concreto tanto dúctiles (CR/LFINF+DUC) como no dúctiles (CR/LFINF+DNO), esta incertidumbre se consideró en los modelos **M9** y **M10** respectivamente. Por otro lado, por la dificultad de determinar la ductilidad en las estructuras de mampostería confinada, se creó un modelo **M11** que supone que la mampostería confinada dúctil en realidad no es dúctil.

- Modelo M12

La mampostería no reforzada es la tipología más común en Barrancabermeja (ver Figura 3.15) Los resultados de las encuestas arrojaron que al determinar la tipología MUR/LWAL+DNO, únicamente se tiene incertidumbre en el 10% de las ocasiones, es decir que la mampostería simple no solo es la común sino de las que se posee mayor certeza en la ciudad. En las ocasiones en las que no se estaba seguro, la segunda opción más probable fue la mampostería confinada sin ingeniería. Con el fin de considerar la incertidumbre en el sistema estructural principal de la ciudad, se cambió el 10% de las tipologías MUR/LWAL+DNO por MCF/LWAL+DNO en el modelo **M12**.

- Modelo M13

Se creó un modelo que busca considerar simultáneamente la incertidumbre en todas las tipologías estructurales. Para esto se partió del modelo M0, el cual considera la primera opción más probable, y se cambiaron todas las tipologías estructurales por la segunda opción más probable mostrada en la Tabla 3.12 usando la proporción de incertidumbre que mostraron las encuestas, la cual se muestra en la Figura 3.18. Por ejemplo, si en la matriz de distribución el 77% corresponde MUR/LWAL+DNO, y según las encuestas se tiene incertidumbre del 8%, entonces el 70.84% corresponderá a MUR/LWAL+DNO, y el 6.16% corresponderá a MCF/LWAL+DNO.

Tabla 3.12 Primera y segunda opción de tipologías estructurales elegidas en las encuestas.

Primera opción	Segunda opción
CR/LDUAL+DUC	CR/LFINF+DUC
CR/LFINF+DNO	MCF/LWAL+DUC
CR/LFINF+DUC	CR/LFINF+DNO
CR/LWAL+DUC	-
MCF/LWAL+DNO	MUR/LWAL+DNO
MCF/LWAL+DUC	MCF/LWAL+DNO

Primera opción	Segunda opción
MR/LWAL+DUC	-
MUR/LWAL+DNO	MCF/LWAL+DNO
UNK	-

Como se demostró con las encuestas, los edificios de muros de concreto reforzado (CR/LWAL+DUC), mampostería reforzada (MR/LWAL+DUC) y las construcciones improvisadas (UNK) son estructuras atípicas en la ciudad y que se asignaron únicamente cuando existían suficientes evidencias, por ende, no hay incertidumbre registrada en las encuestas. Cuando no existen suficientes evidencias para elegir una tipología estructural, el ingeniero tiende a decidir entre aquellas tipologías más comunes que mejor se adaptan al edificio, estos son: Mampostería no reforzada, pórticos de concreto, mampostería confinada y mampostería no reforzada.

La mampostería reforzada (MR/LWAL+DUC) difícilmente se evidencia en las construcciones ya que poseen el refuerzo dentro de la mampostería. Las construcciones de mampostería de 1 y 2 pisos que mostraron mampostería sin columnas de confinamientos fueron seleccionadas en su mayoría como mampostería simple. Cuando se trata de construcciones de 3 o más pisos, la mampostería confinada es la opción más probable. En la mayoría de los casos se seleccionó mampostería reforzada cuando existían suficientes evidencias para probarlo, ya que es una estructura atípica.

Los edificios de muros de concreto (CR/LWAL+DUC) se evidencian por la dimensión reducida de las ventadas y demás aberturas; generalmente son edificios entre 5 y 10 pisos construidos como proyectos residencias de interés prioritario o social (VIP o VIS respectivamente). Las encuestas mostraron un nivel de certeza alto al seleccionar esta tipología.

Por otro lado, las construcciones improvisadas (UNK) son estructuras que fácilmente se identifican al ver su fachada. La madera y láminas de metal son los materiales que se evidencian en la mayoría de los casos.

Las estructuras de sistemas combinados de concreto son estructuras asociadas generalmente a edificios altos (más de 8 pisos). Cuando existe incertidumbre en la identificación de sistemas duales de concreto, generalmente se confunden con pórticos dúctiles y, de manera contraria, los pórticos de concreto dúctiles de más de 8 pisos (CR/LFINF+DUC) se confunden con sistemas combinados de concreto (CR/LDUAL+DUC).

3.4.2. RESULTADO DE LOS MODELOS DE EXPOSICIÓN

En las figuras 3.19 a 3.21 se ilustran los valores de cantidad de edificios, costos de reposición y área construída de cada sistema estructural (ignorando el número de pisos) del modelo M0 y trece posibles modelos de exposición. Dichas figuras muestran que la mampostería no

reforzada (MUR/LWAL+DNO) es la tipología más común en Barrancabermeja. La cantidad de edificaciones de dicha tipología varía entre 35,749 y 41,503, lo cual representa entre el 66% y 77% de edificaciones residenciales.

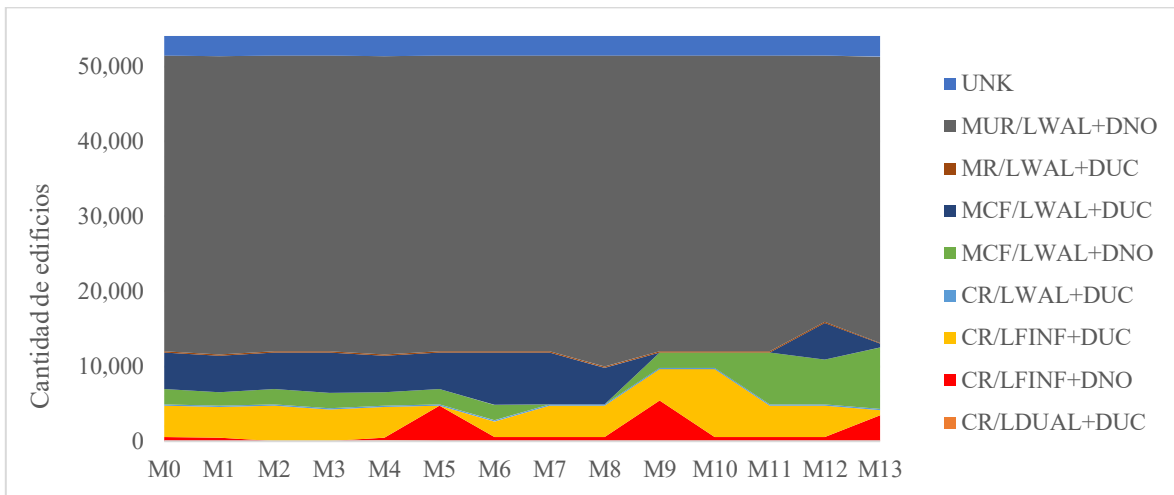


Figura 3.19 Cantidad de edificios de cada modelo de exposición.
Fuente: Elaboración propia.

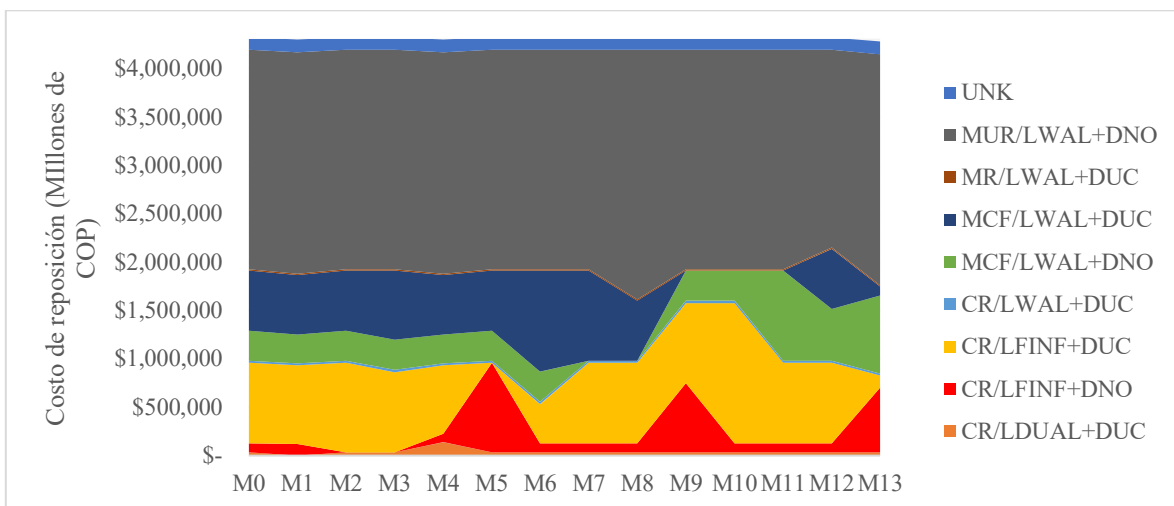


Figura 3.20 Costo de reposición de modelos de exposición
Fuente: Elaboración propia.

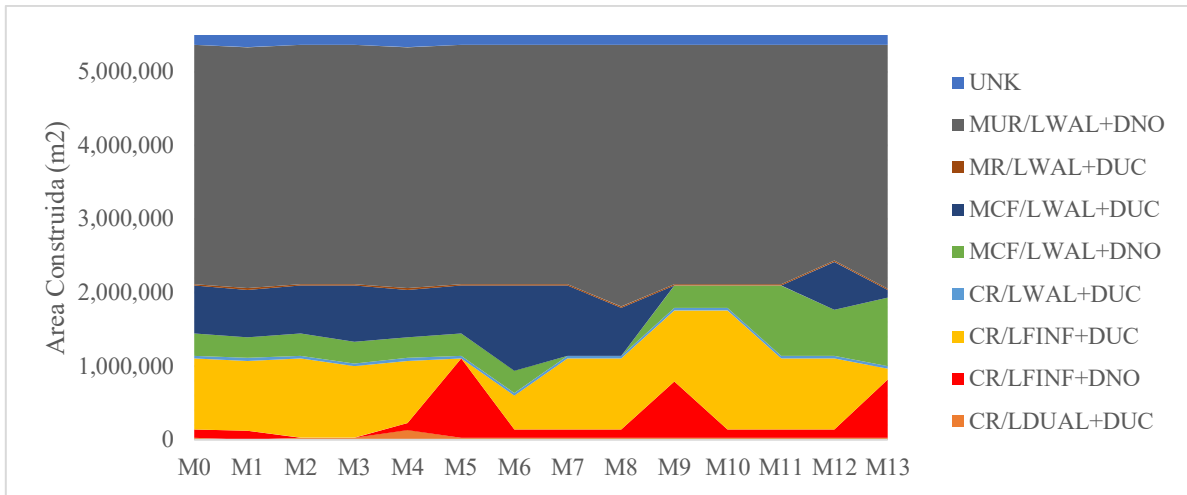


Figura 3.21 Área construida de modelos de exposición.
 Fuente: Elaboración propia.

4. SELECCIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD.

A partir del inventario de taxonomías obtenido en el modelo de exposición, se asignaron las curvas de fragilidad que mejor describen el comportamiento estructural ante intensidades sísmicas. La Tabla 4.1 muestra el inventario de estructuras de la ciudad junto con la curva de fragilidad asignada. A continuación, se justifica la asignación de cada curva de fragilidad.

Tabla 4.1 Asignación de curvas de fragilidad a las taxonomías de viviendas encontradas en Barrancabermeja.

Taxonomía	Nombre de curva de fragilidad.	Autor
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	MUR/HEX:1	Acevedo et al. (2017)
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	MUR/HEX:2	Acevedo et al. (2017)
MUR/LWAL+DNO/HEX:3	MUR/HEX:3	Acevedo et al. (2017)
CR/LDUAL+DUC/HEX:17	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:12	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:13	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:14	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:17	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:8	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:9	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:10	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:11	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:12	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:13	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LDUAL+DUC/HEX:14	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:10	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:8	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DUC/HEX:9	CR/LWAL+DUC/HBET:8,19	C2H-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:10	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:12	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:13	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:14	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:8	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:9	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:17	CR/LWAL+DNO/HBET:8,19	C2H-Pre Code, (FEMA, 2015b)
CR/LWAL+DUC/HEX:1	CR/LWAL+DUC/HBET:1,3	C2L-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LWAL+DUC/HEX:2	CR/LWAL+DUC/HBET:1,3	C2L-Moderate Code, (FEMA, 2015b)
CR/LFINF+DNO/HEX:1	CR/LFINF+DNO/HEX:1/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DNO/HEX:2	CR/LFINF+DNO/HEX:2/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DNO/HEX:3	CR/LFINF+DNO/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DNO/HEX:4	CR/LFINF+DNO/HEX:4/RES	Villar-Vega et al. (2017)

Taxonomía	Nombre de curva de fragilidad.	Autor
CR/LFINF+DNO/HEX:5	CR/LFINF+DNO/HEX:5/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DNO/HEX:6	CR/LFINF+DNO/HEX:6/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DNO/HEX:7	CR/LFINF+DNO/HEX:7/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:1	CR/LFINF+DUC/HEX:1/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:2	CR/LFINF+DUC/HEX:2/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:3	CR/LFINF+DUC/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:4	CR/LFINF+DUC/HEX:4/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:5	CR/LFINF+DUC/HEX:5/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:6	CR/LFINF+DUC/HEX:6/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LFINF+DUC/HEX:7	CR/LFINF+DUC/HEX:7/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	MCF/LWAL+DNO/HEX:1/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	MCF/LWAL+DNO/HEX:2/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DNO/HEX:3	MCF/LWAL+DNO/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DNO/HEX:4	MCF/LWAL+DNO/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DNO/HEX:5	MCF/LWAL+DNO/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	MCF/LWAL+DUC/HEX:1/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	MCF/LWAL+DUC/HEX:2/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	MCF/LWAL+DUC/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DUC/HEX:4	MCF/LWAL+DUC/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MCF/LWAL+DUC/HEX:5	MCF/LWAL+DUC/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MR/LWAL+DUC/HEX:1	MR/LWAL/HEX:1/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MR/LWAL+DUC/HEX:2	MR/LWAL/HEX:2/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MR/LWAL+DUC/HEX:3	MR/LWAL/HEX:3/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MR/LWAL+DUC/HEX:4	MR/LWAL/HEX:4/RES	Villar-Vega et al. (2017)
MR/LWAL+DUC/HEX:5	MR/LWAL/HEX:5/RES	Villar-Vega et al. (2017)
UNK/HEX:1	UNK	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LWAL+DUC/HEX:5	CR/LWAL+DUC/HEX:5/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LWAL+DUC/HEX:6	CR/LWAL+DUC/HEX:6/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LWAL+DUC/HEX:7	CR/LWAL+DUC/HEX:7/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LWAL+DUC/HEX:8	CR/LWAL+DUC/HEX:8/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LWAL+DUC/HEX:9	CR/LWAL+DUC/HEX:9/RES	Villar-Vega et al. (2017)
CR/LWAL+DUC/HEX:10	CR/LWAL+DUC/HEX:10/RES	Villar-Vega et al. (2017)

- Curvas de fragilidad de Acevedo et al. (2017)

Como se mencionó en el Capítulo 2, Acevedo et al. (2017) desarrollaron curvas de fragilidad para viviendas de mampostería no reforzada (MUR/LWAL+DNO) entre 1 y 6 pisos. Estas curvas se elaboraron a partir de las características comunes de viviendas en Antioquia (Colombia) y bajo el contexto de amenaza sísmica de Colombia. Es de interés para esta investigación incorporar curvas de fragilidad propias del contexto colombiano por lo cual se seleccionaron las curvas de fragilidad del autor en mención para la mampostería no reforzada

de Barrancabermeja. Conociendo que la tipología estructural MUR/LWAL+DNO representa el 74% de las viviendas en la ciudad de estudio, son estas curvas seleccionadas las que mayor influencia tienen en los resultados del riesgo sísmico de este estudio.

- Curvas de fragilidad de Villar-Vega et al. (2017)

Villar-Vega et al. (2017) desarrollaron curvas de fragilidad de las taxonomías más comunes de edificios en Sur América. Aunque no fueron desarrolladas únicamente para el contexto colombiano, estas curvas representan de manera adecuada un amplio inventario de estructuras con características similares a las estructuras colombianas.

Se asignaron curvas de fragilidad de Villar-Vega et al. (2017) a: Pórticos de concreto con mampostería adosada, dúctiles y no dúctiles (CR/LINFL+DUC y CR/LINFL+DNO, entre 1 y 7 pisos; muros de concreto reforzado (CR/LWAL) de 5 a 10 pisos, y mampostería confinada dúctil y no dúctil entre 1 y 3 pisos (MCF/LWAL+DUC y MCF/LWAL+DNO).

Se evidenció en el modelo de exposición la existencia de estructuras de mampostería confinada de 4 y 5 pisos las cuales no cuentan actualmente con curvas de fragilidad aplicables al contexto colombiano. Se optó por asignar para la mampostería confinada de 4 y 5 pisos la misma curva de fragilidad de edificios de mampostería de 3 pisos.

- Curvas de fragilidad de FEMA (2015b)

Los muros de concreto de 1 a 4 niveles y más de 11 niveles, los pórticos de concreto de más de 8 niveles y los sistemas duales de concreto son estructuras que no cuentan con una curva de fragilidad desarrollada propiamente para el contexto colombiano, sea porque que las curvas que existen no estuvieron al alcance del autor (por razones de confidencialidad de algunas investigaciones en vulnerabilidad sísmica de edificios) o porque actualmente no hay investigaciones de alguna taxonomía encontrada en Colombia. Así las cosas, se optó por usar las curvas presentadas en FEMA (2015b) donde se incluye un amplio espectro de taxonomías homologables a las colombianas. Aunque las estructuras en Estados Unidos pueden diferir en calidad de materiales y configuraciones estructurales, las curvas de FEMA (2015b) permitieron a la presente investigación generar una idea tentativa de la fragilidad del inventario de estructuras mencionadas al inicio de este párrafo.

Como se mencionó en el capítulo 2, FEMA (2015b) considera 3 tipos de diseño sismorresistente: Pre-Code (diseño sin código), Moderate-Code (diseño para zonas de amenaza moderada) y High-Code (diseño para zonas de amenaza alta). Para el presente estudio se determinó que el tipo de diseño Pre-Code representa las estructuras No-dúctiles, mientras que el tipo de diseño Moderate-Code representa las estructuras dúctiles y con provisiones sísmicas adecuadas para zonas de amenaza sísmica intermedia.

Se asignaron curvas de fragilidad de FEMA (2015b) a edificios de muros de concreto dúctiles (CR/LWAL), de 1 a 4 pisos y de 11 a 19 pisos. Los pórticos de concreto reforzado en Colombia de más de 8 niveles, generalmente hacen uso de columnas, muros o sistemas duales con la finalidad de controlar las derivas de piso; además, es común que las viviendas cuenten con mampostería adosada a la estructura, aportando rigidez al sistema, por dichas razones la

curva de fragilidad que FEMA (2015b) desarrolló para la taxonomía CR/LWAL de 8 a 19 pisos, se aplicó en este estudio para la taxonomía CR/LFINF de más de 8 pisos. Así las cosas, para este estudio, la curva de fragilidad de edificios de pórticos concreto y sistemas duales, de más de 8 pisos es la misma, por ende, queda sin efecto la variación de los modelos M1 y M4 (ver sección 3.4.1).

Luego de seleccionar las curvas de fragilidad que representen el inventario de estructuras, se utilizó el modelo de consecuencias propuesto en la sección 2.3.4, con el cuál se transformó los estados de daño en pérdidas económicas, para obtener así las curvas de vulnerabilidad. El siguiente capítulo aplica las curvas de fragilidad para determinar escenarios de daños y las curvas de vulnerabilidad para calcular pérdidas económicas de los diferentes modelos de exposición propuestos en el capítulo 3.4.

5. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

En este capítulo se exponen los resultados del riesgo sísmico en términos de pérdidas económicas y daños en edificios. Un análisis de eventos estocásticos permite representar las pérdidas económicas con dos parámetros: La pérdida promedio anual (AAL) y la curva de excedencia de pérdidas (CEP). Los daños y pérdidas económicas en edificios se representan además con seis escenarios sísmicos probables asociados a tres periodos de retorno de pérdidas: 250, 500 y 1,000 años. Cada periodo de retorno está asociado a las fuentes sismogénicas de mayor influencia en la ciudad de estudio. Este capítulo se divide en dos secciones: Resultados del riesgo sísmico usando el modelo de exposición más probable, y resultados del riesgo considerando variabilidad en el modelo de exposición. La primera sección tiene el objetivo de profundizar sobre los resultados del riesgo con la finalidad de brindar parámetros útiles para la toma de decisiones de entidades gestoras del riesgo, la segunda sección ilustra cómo pueden variar los resultados del riesgo al considerar la incertidumbre en el modelo de exposición.

5.1. RESULTADOS DEL RIESGO SÍSMICO USANDO EL MODELO DE EXPOSICIÓN MÁS PROBABLE

En esta sección se evalúa el riesgo usando el modelo de exposición M0, determinado a partir de la distribución más probable de taxonomías (ver sección 3.3). El resultado del análisis estocástico se da en términos de la pérdida promedio anual y la curva de tasa de excedencia de pérdidas. Los resultados de los escenarios dados para periodos de retorno de pérdidas de 250, 500 y 1,000 años se muestran por medio de mapas de zonificaciones de pérdidas y colapsos, y gráficas de resultados totales para los grupos estructurales principales.

5.1.1. ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE EVENTOS SÍSMICOS

Un análisis de eventos estocásticos permite representar todas las magnitudes y localizaciones de sismos (fuentes sismogénicas) alrededor de la zona de estudio. Cada evento que se genera en este análisis está asociado a una frecuencia de ocurrencia y genera intensidades sísmicas acordes a la naturaleza del evento. Para el análisis estocástico se determinó un tiempo de investigación del riesgo igual a un año, con la finalidad de determinar la pérdida promedio anual, y se generaron 50,000 eventos por cada combinación de las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte del terreno, GMPEs, usando el árbol lógico mostrado en la Tabla 2.1.

La Figura 5.1 presenta la curva de excedencia de pérdidas (CEP), en la cual se ilustra la variación de las pérdidas de la ciudad en función del periodo de retorno de las pérdidas (Trp). Las diferentes curvas mostradas ilustran las combinaciones de las GMPEs; se observa que para periodos de retorno de pérdidas de hasta 10 años hay una tendencia muy pareja entre las curvas debido a la gran cantidad de eventos sísmicos de periodos de retorno bajos que produce estabilidad numérica. Para el periodo de retorno de pérdidas de 100 años se comienza

a notar una dispersión de datos los cuales se dividen en dos ramificaciones principales: La rama superior hace referencia a eventos de corteza superficial y la rama inferior a eventos de subducción intraplaca. Entre más aumenta el periodo de retorno, menor es la cantidad de eventos producidos, por lo que existe gran dispersión de datos y poca estabilidad numérica.

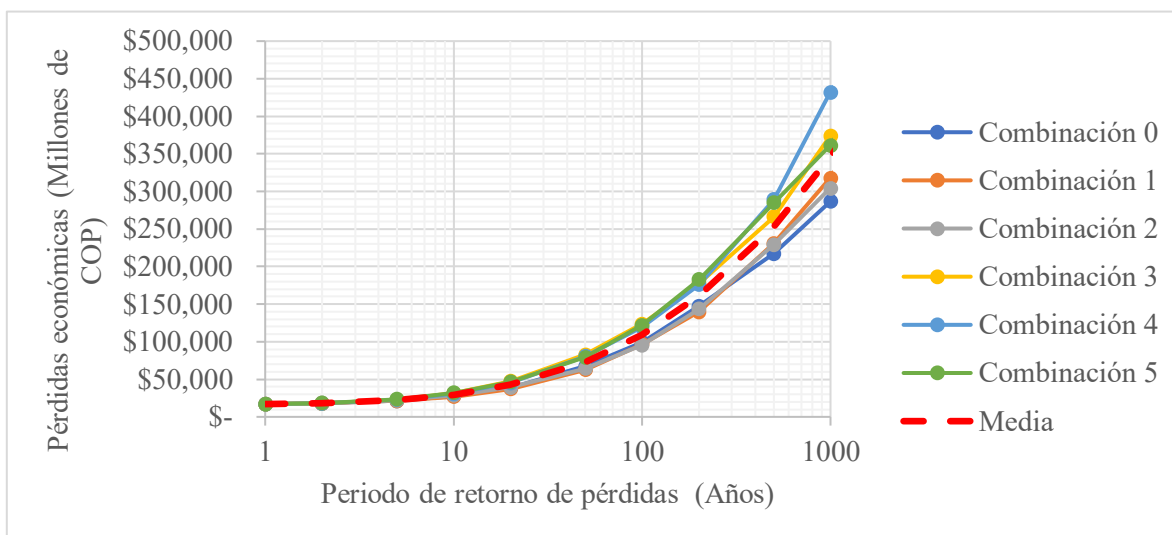


Figura 5.1 Curva de excedencia de pérdidas (CEP).

Fuente: Elaboración propia.

El valor de pérdida promedio anual esperada (AAL) para las viviendas de Barrancabermeja es de 13,753 millones de pesos, correspondiente al 0.32% del costo de reposición de todas las viviendas de Barrancabermeja. Este valor es de gran utilidad para definir acciones necesarias que preparen la economía local y la capacidad de respuesta ante un terremoto. Las acciones y decisiones que se deben tomar a partir de los resultados del valor AAL y la curva CEP mostrados, quedan a criterio de las entidades gestoras del riesgo.

5.1.2. ANÁLISIS DE ESCENARIOS SÍSMICOS.

El riesgo sísmico se puede comprender a partir de escenarios sísmicos específicos, con características de magnitud, ubicación y periodo de retorno que reflejen la amenaza sísmica probable y permitan entender el impacto potencial de los eventos. Generalmente es de interés conocer aquellos escenarios que sirven como referencia para cuantificar las pérdidas económicas y los daños causados en las edificaciones de la ciudad y, a partir de estos resultados, dar parámetros para mejorar la rapidez, eficiencia y efectividad de la respuesta de las entidades gubernamentales de atención de desastres. La consideración de escenarios permite el desarrollo de planes de atención de emergencia y contingencia, la generación de

diseños e implementación de sistemas de alerta temprana, el desarrollo de simulacros e identificación de sitios críticos (Yamin, Ghesquiere, Cardona & Ordaz, 2013).

La selección errónea de un escenario sísmico, tanto de intensidades muy bajas como de intensidades demasiado altas, podrían conllevar a la toma de decisiones innecesarias, no deseables o inconvenientes. Seleccionar un escenario de baja intensidad podría generar un falso concepto sobre la capacidad de respuesta de la ciudad; por otro lado, la selección de un escenario de muy alta intensidad implicaría generar un gran esfuerzo, en algunos casos inviable, para alcanzar la capacidad de respuesta necesaria para atender las demandas generadas por el evento sísmico, o podría llevar a no tomar una decisión de acción específica (Yamin et al., 2013).

El criterio de selección de escenarios está basado en las fuentes sísmicas de mayor influencia para la ciudad de estudio. Como se describió en el Capítulo 2, Barrancabermeja está influenciada por la subducción Intraplaca generada en el Nido de Bucaramanga y por sismos superficiales asociados a fallas activas cercanas a la ciudad tales como la Falla Arrugas, Falla Casabe, Falla Cimitarra, Falla Infantas, Falla La Salina, entre otras. Usando los resultados del análisis estocástico, se seleccionó aquellos eventos sísmicos asociados al Nido de Bucaramanga y a fallas locales.

Se definieron periodos de retorno de pérdidas de 250, 500 y 1,000 años con la finalidad de analizar tres niveles de impacto. Los escenarios fueron escogidos a partir del análisis de eventos estocástico calculado en el programa OpenQuake (Pagani et al. 2014). Para esto se recurrió a la curva de tasa de excedencia de pérdidas, donde se determinó la pérdida económica a la cual se asocia cada periodo de retorno, tal como lo ilustra la Figura 5.2, luego se procedió a identificar cuales eventos generados en el análisis estocástico produjeron las pérdidas de cada periodo de retorno. Para considerar las regiones tectónicas de influencia en la ciudad de estudio se seleccionaron tres eventos de fallas activas de corteza y tres eventos de subducción intraplaca con periodo de retorno de pérdida igual a 250, 500 y 1,000 años respectivamente. La Tabla 5.1 describe las características de los eventos seleccionados los cuales se ilustran en la Figura 5.3.

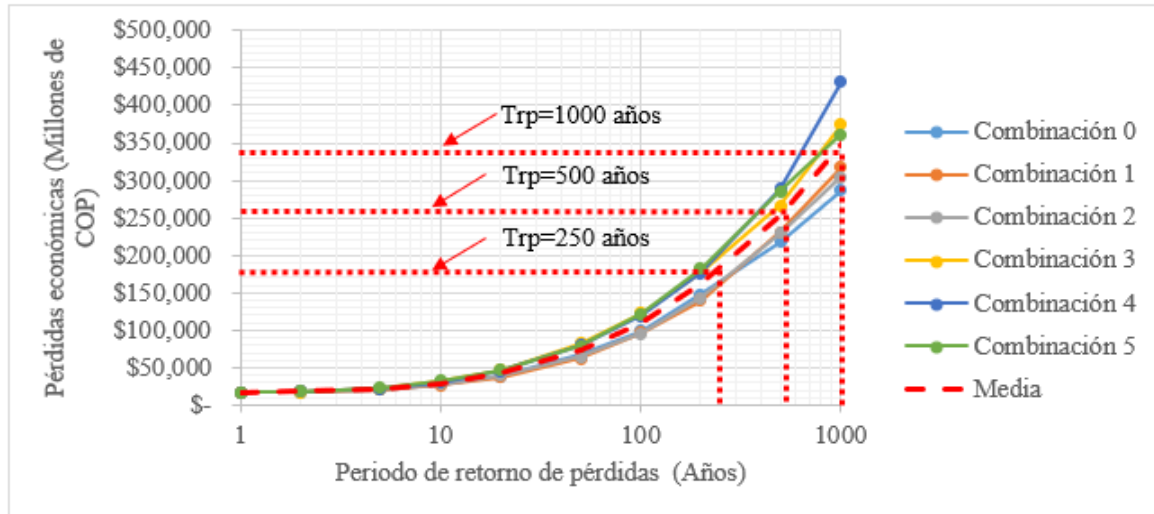


Figura 5.2 Pérdidas asociadas a los tres periodos de retorno.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.1 Escenarios seleccionados

Fuente sísmica	Coordenada	Distancia al centro urbano (km)	Magnitud	Profundidad (km)	Trp (años)
Subducción Intraplaca (Sub-250)	7.1390100, -73.808083	9	6.4	98.7	250
Fallas activas de corteza (Cort-250)	7.23913, -73.749771	22	6.25	25	250
Subducción Intraplaca (Sub-500)	7.088621, -73.754593	9	7	112.5	500
Fallas activas de corteza. (Cort-500)	7.1492000, -73.750519	13.5	6.75	5	500
Subducción Intraplaca (Sub-1000)	6.9770098, -73.835114	10	7.1	85.1	1000
Fallas activas de corteza. (Cort-1000)	7.0592699, -73.751266	10	6.75	15	1000

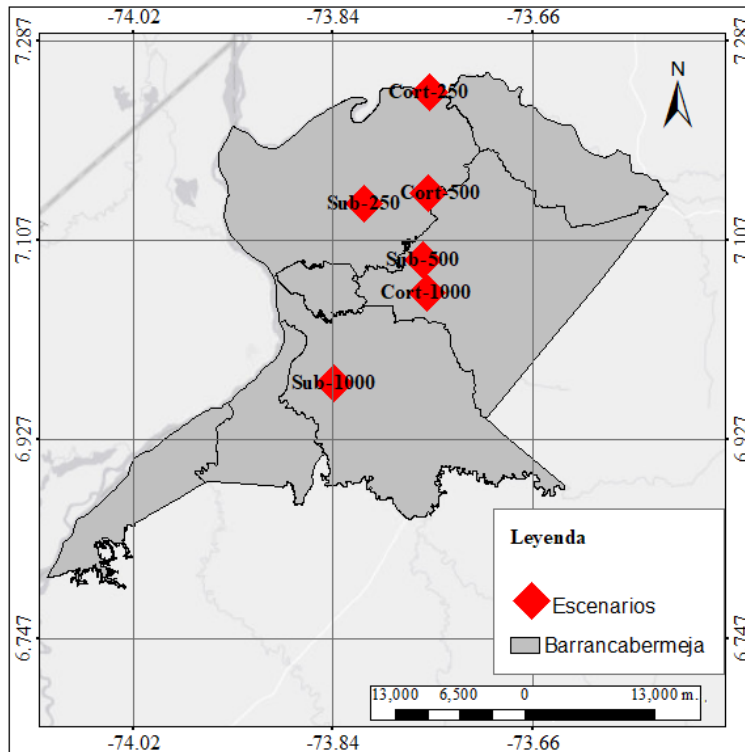


Figura 5.3 Mapa de localización de epicentros de escenarios.
Fuente: Elaboración propia.

Para analizar los escenarios se modelaron 500 campos de movimiento de terreno (GMF por sus siglas en inglés) con la finalidad de considerar la variación de las ecuaciones GMPE mostradas en la Tabla 2.1 (incertidumbre aleatoria). Es de aclarar que la pérdida económica evaluada en los diferentes eventos del análisis estocástico es calculada con un único valor de GMF, fuera de los cientos de posibles GMF que podría generar el evento, es decir, los valores de la CEP no consideran la variabilidad de las ecuaciones GMPE por lo que existe diferencia entre la pérdida promedio calculada en los escenarios, ilustrada en las figuras 5.4 y 5.5, y el valor de la pérdida estimada en la Figura 5.2. Por ejemplo, para el escenario con $Trp=1,000$ años, de corteza superficial, se obtuvo una pérdida promedio de 623,155 millones de COP la cual excede la pérdida estimada con la curva CEP para un $Trp=1,000$ años, donde se estimó de 345,826 millones de COP para la media de las curvas. Es importante entonces considerar la incertidumbre aleatoria en las GMPE con la finalidad de ilustrar los rangos en los que se estima que estará la pérdida económica de cada escenario específico.

Las figuras 5.4 y 5.5 muestran los resultados de pérdidas económicas para escenarios de corteza superficial y subducción intraplaca, respectivamente. Las figuras 5.6 y 5.7 muestran la cantidad de edificaciones residenciales colapsadas en escenarios de corteza superficial y subducción intraplaca, respectivamente. Las tablas 5.2 y 5.3 muestran las pérdidas como porcentaje del costo de la reposición de viviendas y, las tablas 5.4 y 5.5 muestran los colapsos como porcentaje de la cantidad de edificaciones residenciales de Barrancabermeja.

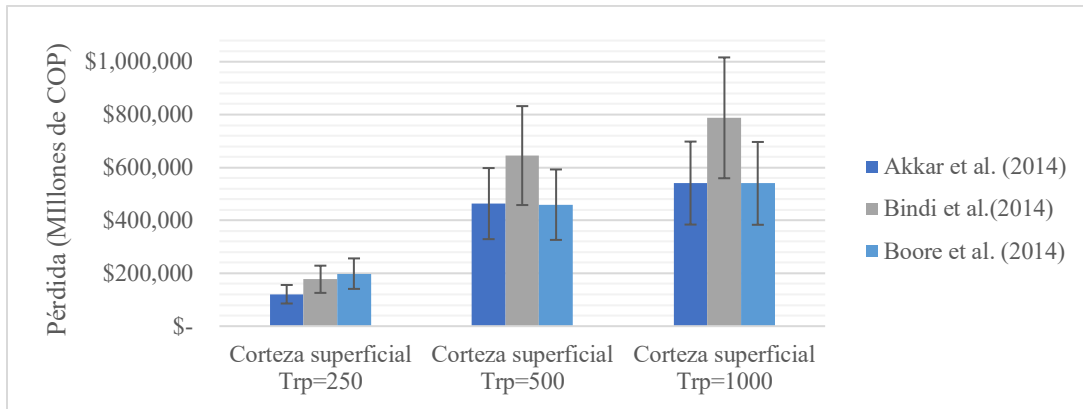


Figura 5.4 Pérdidas económicas para escenarios de Corteza superficial.
Fuente: Elaboración propia.

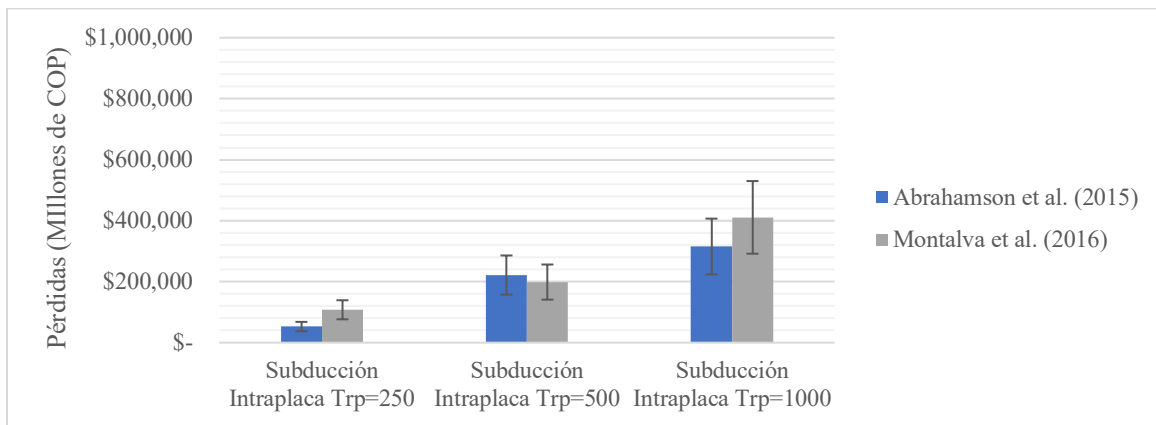


Figura 5.5 Pérdidas económicas de escenarios de subducción intraplaca.
Fuente: Elaboración propia.

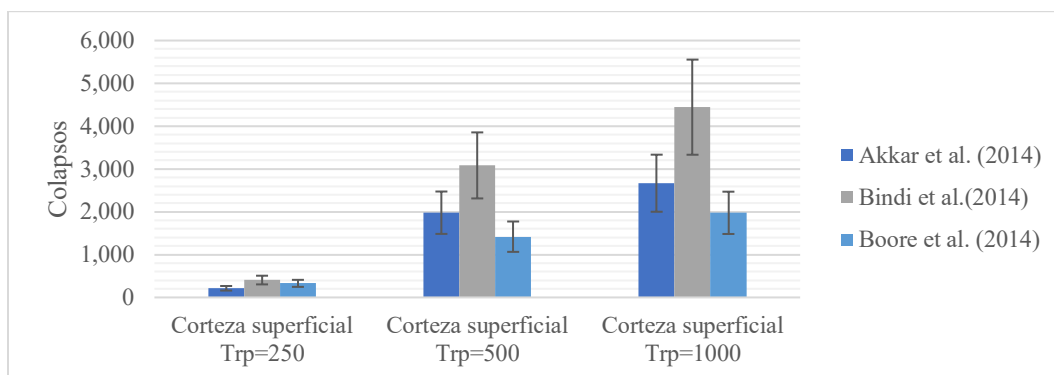


Figura 5.6 Cantidad de edificios residenciales colapsados en escenarios de Corteza superficial.
Fuente: Elaboración propia.

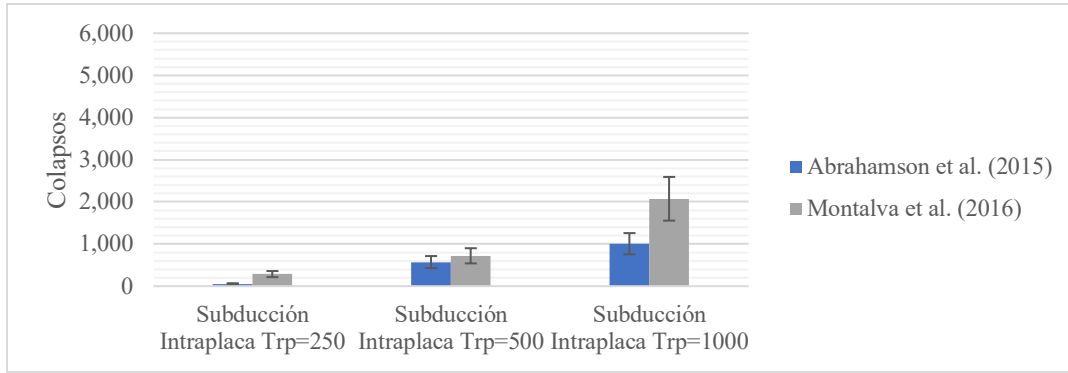


Figura 5.7 Cantidad de edificios residenciales colapsados en escenarios de subducción intraplaca.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2 Pérdidas como porcentaje del costo de reposición para escenarios de corteza superficial.

Escenario	Pérdidas como porcentaje del costo de reposición de viviendas			
	Akkar et al. (2014)	Bindi et al. (2014)	Boore et al. (2014)	Promedio
Cort. 250	2.79%	4.10%	4.59%	3.83%
Cort. 500	10.72%	14.92%	10.62%	12.09%
Cort. 1,000	12.51%	18.22%	12.49%	14.41%

Tabla 5.3 Pérdidas como porcentaje del costo de reposición para escenarios de subducción intraplaca.

Escenario	Pérdidas como porcentaje del costo de reposición de viviendas		
	Abrahamson et al. (2015)	Montalva et al. (2016)	Promedio
Sub. 250	1.22%	2.49%	1.86%
Sub. 500	5.12%	4.59%	4.86%
Sub. 1,000	7.29%	9.50%	8.39%

Tabla 5.4 Porcentaje de colapsos de edificaciones residenciales para escenarios de corteza superficial.

Escenario	Porcentaje de colapsos de edificaciones residenciales			
	Akkar et al. (2014)	Bindi et al. (2014)	Boore et al. (2014)	Promedio
Cort. 250	0.39%	0.75%	0.61%	0.58%
Cort. 500	3.65%	5.69%	2.62%	3.98%
Cort. 1000	4.92%	8.19%	3.64%	5.59%

Tabla 5.5 Porcentaje de colapsos de edificaciones residenciales para escenarios de subducción intraplaca.

Escenario	Porcentaje de colapsos de edificaciones residenciales		
	Abrahamson et al. (2015)	Montalva et al. (2016)	Promedio
Sub. 250	0.10%	0.53%	0.32%
Sub. 500	1.05%	1.33%	1.19%
Sub. 1000	1.86%	3.82%	2.84%

Con la finalidad de simplificar la manera de ilustrar los resultados, se agruparon las taxonomías según el tipo de material y sistema de resistencia lateral, ignorando así el número de pisos. La Figura 5.8 ilustra la cantidad de edificaciones afectadas según los estados de daños de las curvas de fragilidad y, la Figura 5.9, los porcentajes de estados de daños para cada grupo estructural.

En las figuras 5.10 y 5.11 se ilustra la zonificación de los colapsos y pérdidas (respectivamente) en los barrios de la ciudad. Debido a la gran dispersión de viviendas en los corregimientos no se realizó zonificación de colapsos. Para los corregimientos únicamente se exponen en la Figura 5.12 las pérdidas acumuladas.

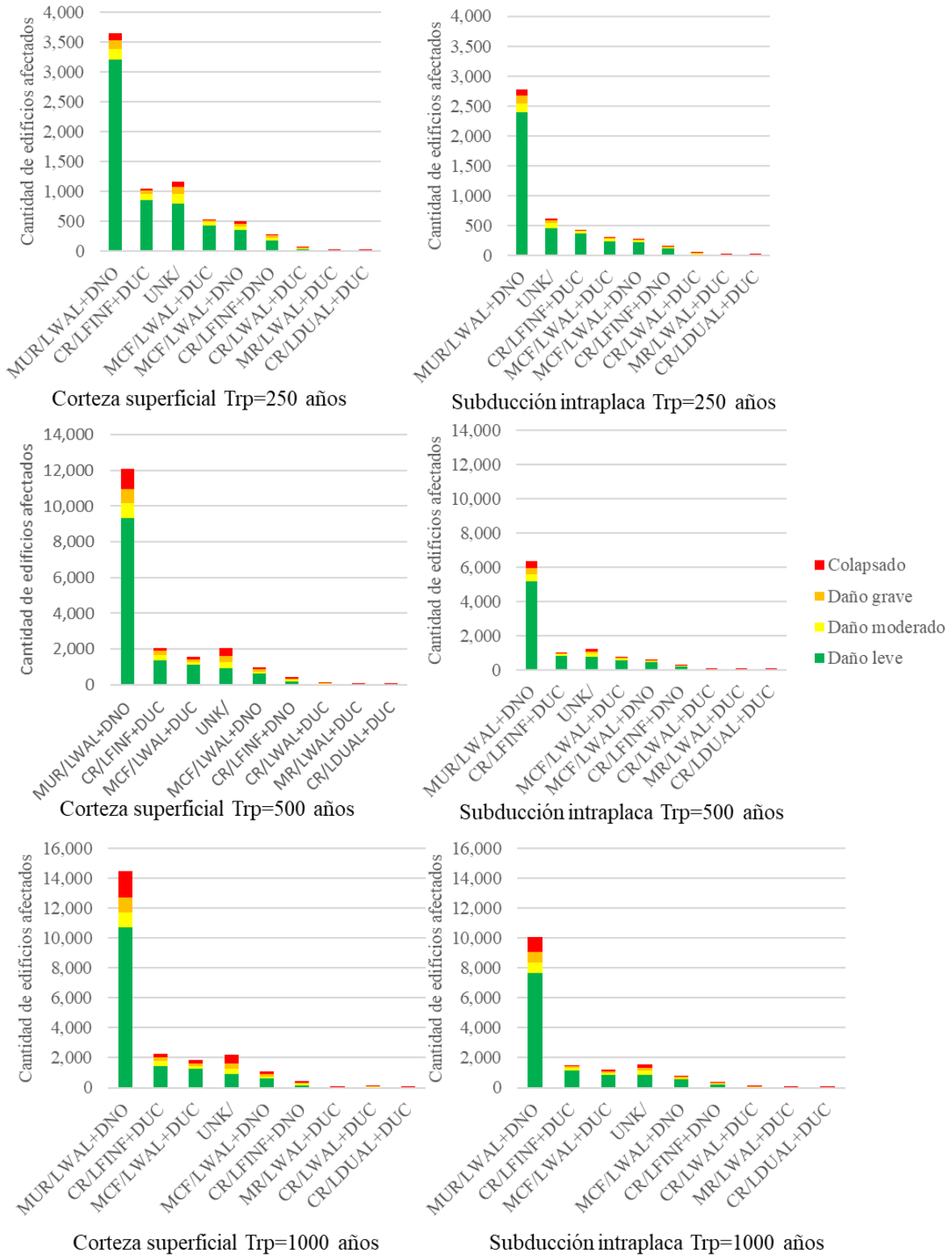


Figura 5.8 Cantidad de edificios con daños.
Fuente: Elaboración propia.

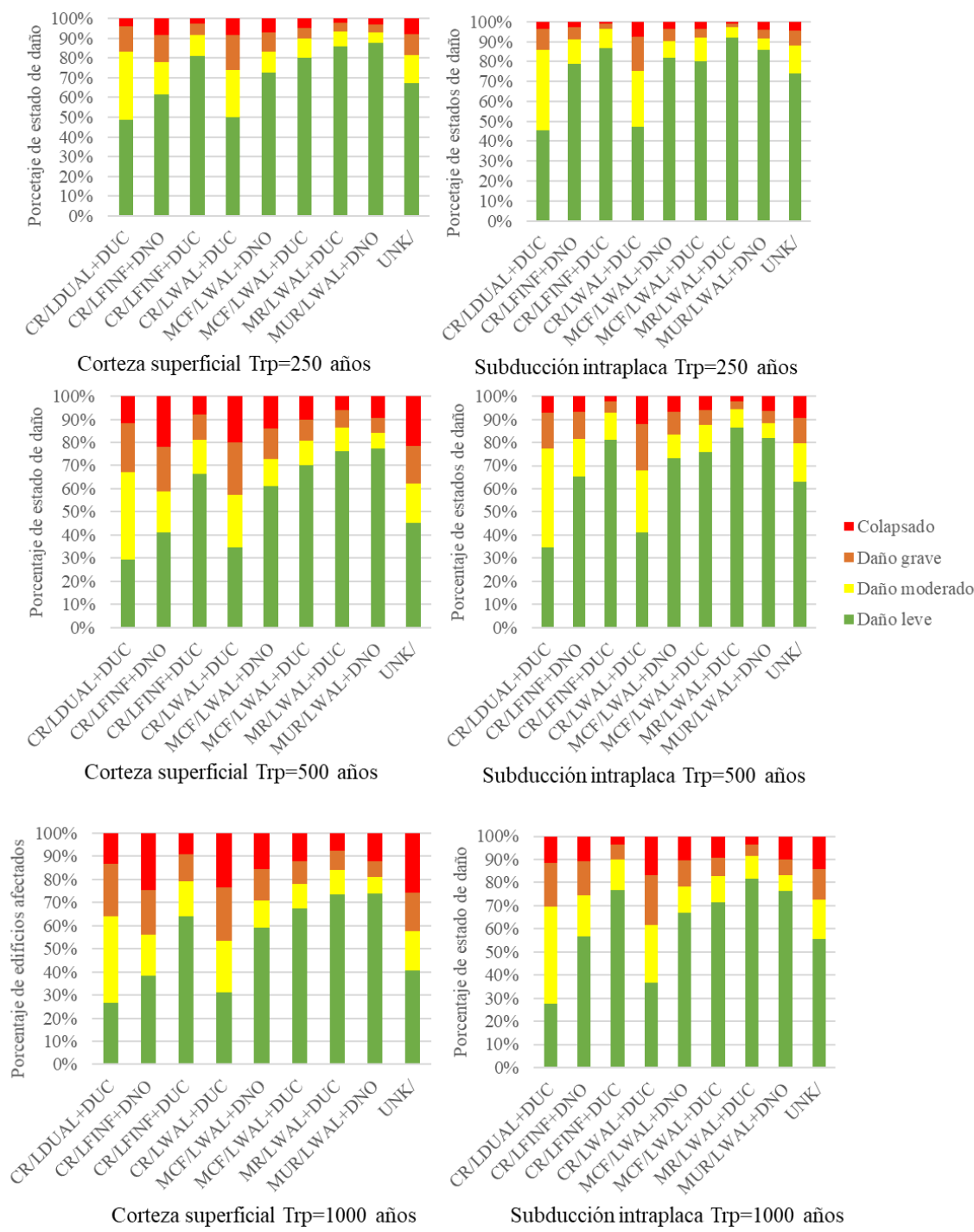


Figura 5.9 Porcentaje de estados de daño para cada grupo estructural
 Fuente: Elaboración propia.

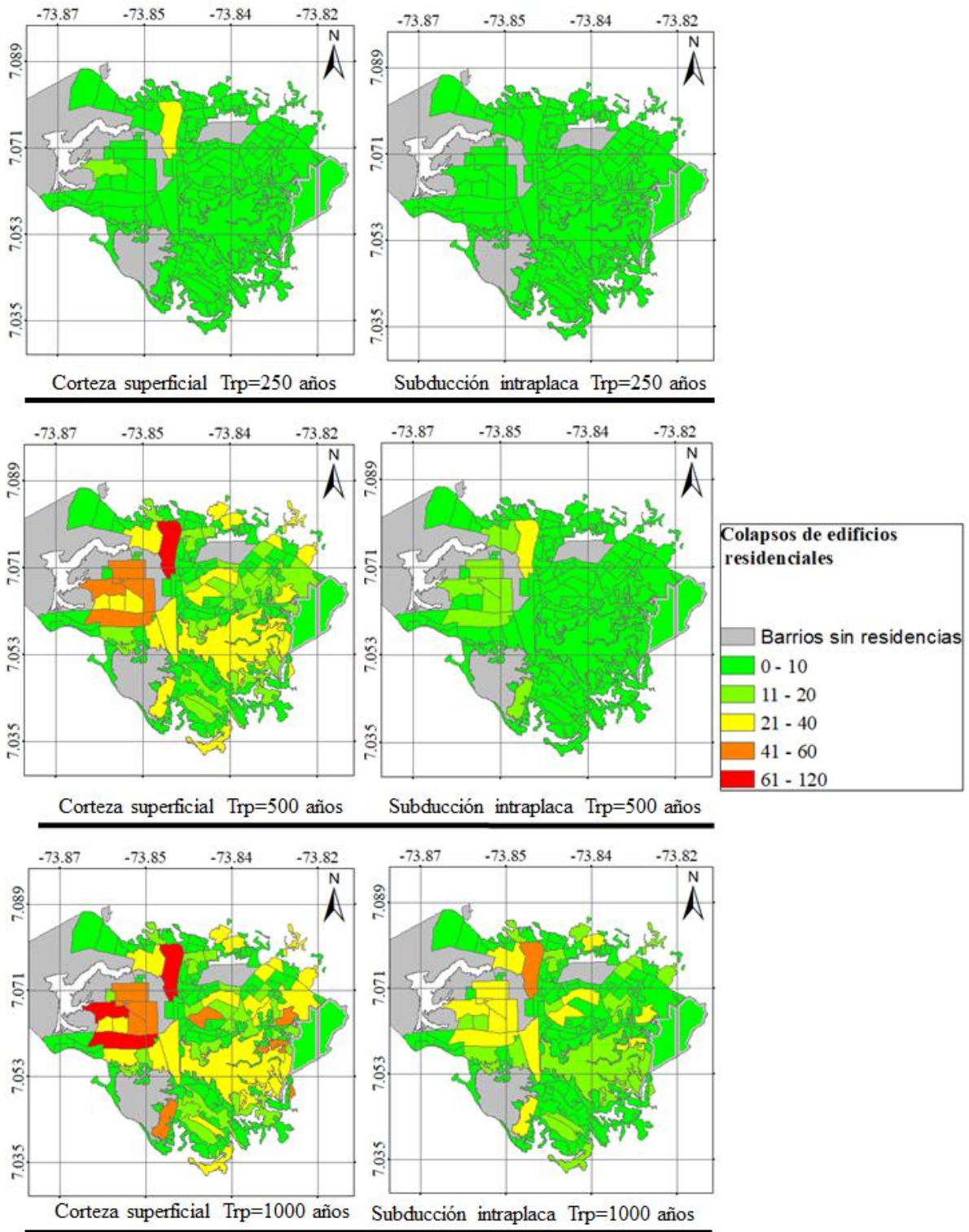


Figura 5.10 Mapa de colapsos de barrios.
Fuente: Elaboración propia.

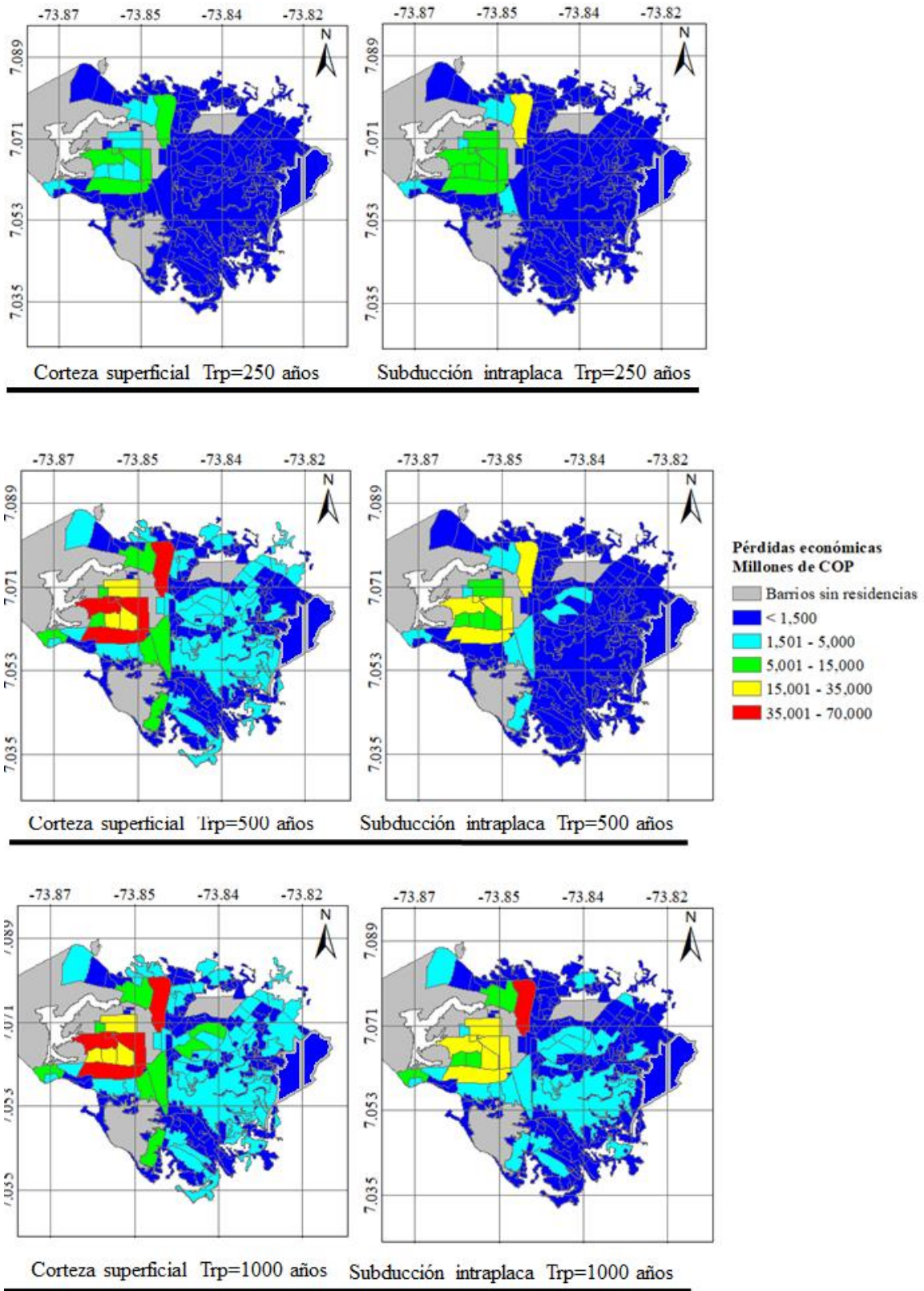


Figura 5.11 Mapa de pérdidas de barrios.
Fuente: Elaboración propia.

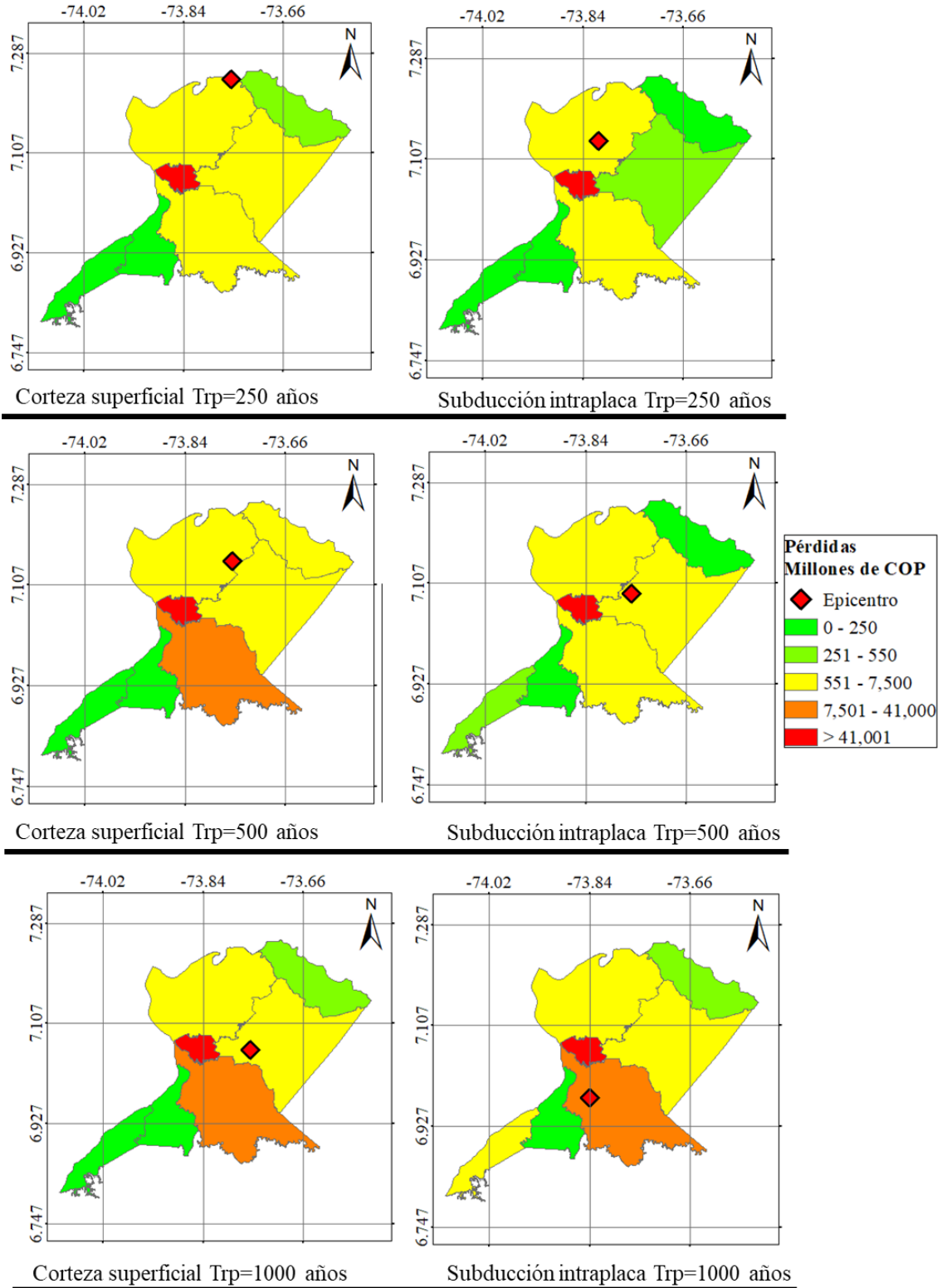


Figura 5.12 Mapa de pérdidas de corregimientos de Barrancabermeja y epicentros.
Fuente: Elaboración propia.

5.2. VARIABILIDAD DE LAS MÉTRICAS DEL RIESGO AL CONSIDERAR LA INCERTIDUMBRE EN EL MODELO DE EXPOSICIÓN.

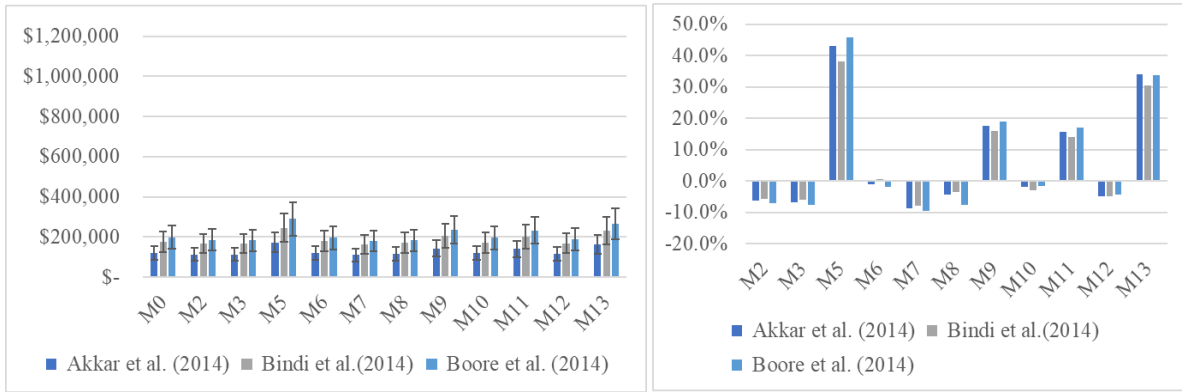
Con el propósito de identificar la variación de los resultados del riesgo al considerar la incertidumbre en tipologías estructurales, se calcularon trece posibles modelos de exposición de la ciudad (descritos en el capítulo 3), para luego evaluar un análisis estocástico y de escenarios. Los modelos de exposición M1 y M4 se omitieron en el análisis de variabilidad ya que, como se mencionó en el capítulo 4, los pórticos de concreto dúctiles y los sistemas duales de concreto poseen las mismas curvas de fragilidad, por lo que no hay variación en los resultados del riesgo.

A continuación, se exponen las pérdidas económicas y colapsos debidos a tres eventos de corteza superficial y se determina la variación respecto al modelo de exposición más probable (M0), luego se expone como varía la curva de tasa de excedencia de pérdidas y la pérdida promedio anual esperada.

5.2.1. VARIABILIDAD EN ESCENARIOS

Como se mostró en el capítulo 5.1, los escenarios asociados a corteza superficial tienen un mayor potencial de generar pérdidas y daños que los escenarios de subducción. Se escogen entonces los escenarios Cort-250, Cort-500 y Cort-1000 con la finalidad de observar la variabilidad en los modelos de exposición para tres intensidades sísmicas.

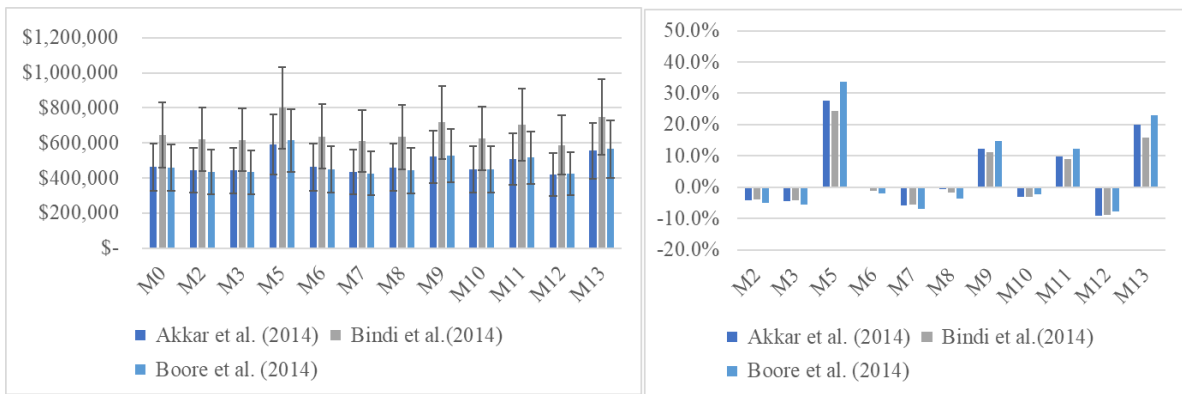
Las figuras 5.13 a 5.18 ilustran los resultados totales de pérdidas económicas y colapsos para los diferentes escenarios y los diferentes modelos de exposición considerados. Se puede observar que entre mayor periodo de retomo de pérdidas, mayores son las pérdidas económicas y colapsos observados. En general los modelos M2, M3, M6, M7, M8, M10 y M12 obtuvieron resultados inferiores al modelo M0, estas diferencias no superan el 10% en pérdidas económicas ni el 15% en colapsos respecto al M0. Por otro lado, los modelos M5, M9, M11 y M13, mantienen sus resultados superiores a los observados en el modelo M0. En general se observa que las diferencias entre modelos de exposición tienden a ser menores entre mayor sea la intensidad sísmica que se evalúa.



(a)

(b)

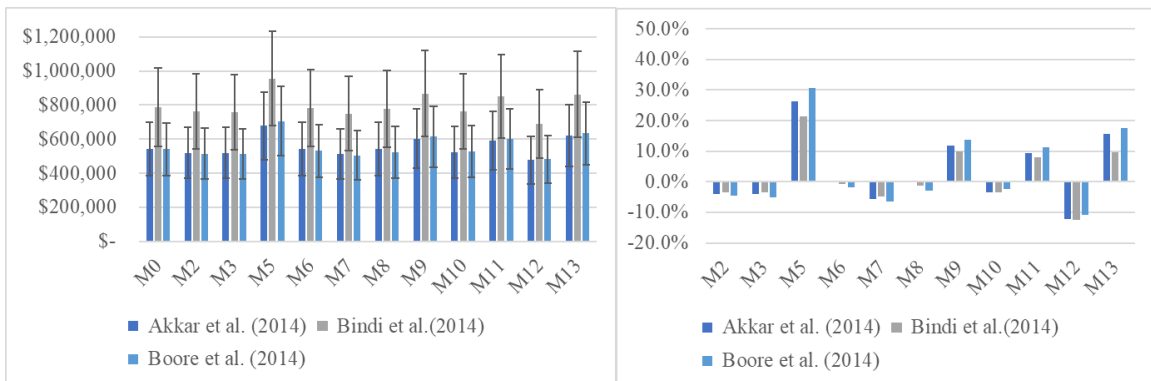
Figura 5.13 (a) Resultados de pérdidas totales para el escenario Cort-250. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.



(a)

(b)

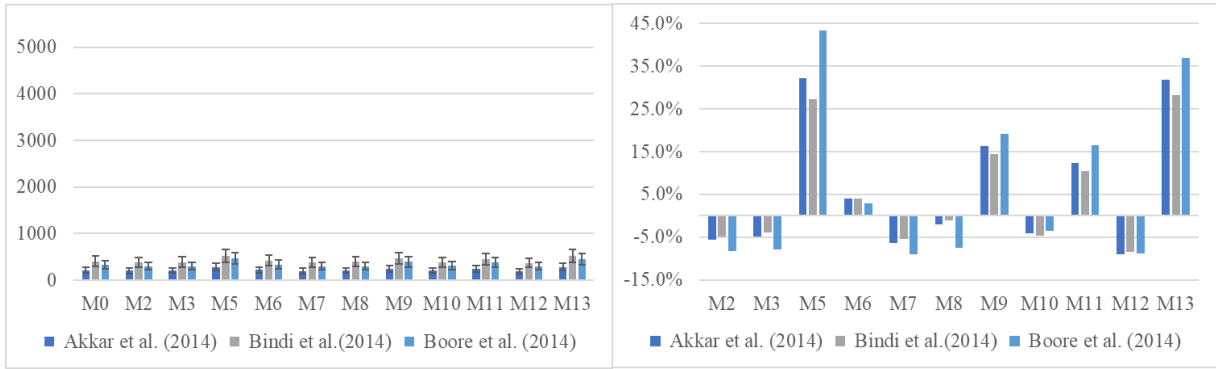
Figura 5.14 (a) Resultados de pérdidas totales para el escenario Cort-500. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.



(a)

(b)

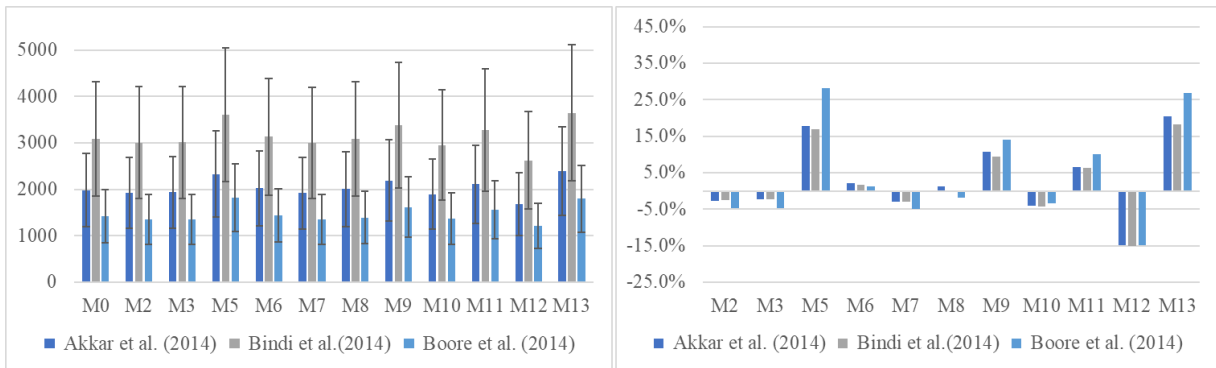
Figura 5.15 (a) Resultados de pérdidas totales para el escenario Cort-1000. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.



(a)

(b)

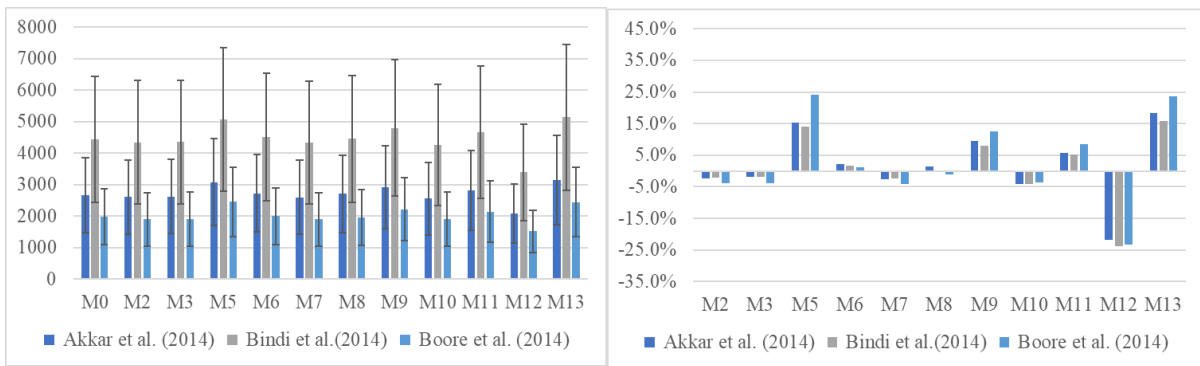
Figura 5.16 (a) Resultados de colapsos para el escenario Cort-250. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.



(a)

(b)

Figura 5.17 (a) Resultados de colapsos para el escenario Cort-500. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.



(a)

(b)

Figura 5.18 (a) Resultados de colapsos para el escenario Cort-1000. (b) Variación porcentual de cada modelo respecto al modelo inicial M0.

La variación de los resultados del riesgo presentados en las figuras anteriores está en función del peso o influencia que tiene cada taxonomía en el modelo de exposición: La mampostería no reforzada representa el 74% de las estructuras, la mampostería confinada dúctil el 8%, los pórticos de concreto dúctiles el 8%, y el 10% restante se distribuye entre las otras taxonomías de edificios residenciales de la ciudad, tal como lo ilustra la Figura 3.15. Así las cosas, la variación del riesgo mostrada es atribuible únicamente a Barrancabermeja y, en general, a aquellas ciudades cuya distribución de taxonomías sea similar.

La cantidad de edificios, el costo de reposición y el área construida no dependen de la tipología estructural, por tal razón no existe variación en los datos del modelo de exposición; sin embargo, las pérdidas y colapsos, al depender de las curvas de fragilidad, sí generan variabilidad.

Si bien en las figuras 5.13 a 5.18 se mostraron los resultados totales del riesgo y la variación total de cada escenario, también es de interés conocer cuáles son las causas y razones de estas variaciones observadas. Para ello se analizó particularmente cada modelo de exposición y se comparó con la hipótesis inicial (Modelo M0).

- Análisis del modelo M2.

En la Tabla 5.6 se observa que el modelo M2 agrupa las taxonomías CR/LFINF+DNO y CR/LFINF+DUC en una sola: CR/LFINF+DUC. Al omitir los pórticos de concreto sin ingeniería y considerar todos los pórticos de concreto como dúctiles se observa una disminución de las pérdidas, debido a que la taxonomía CR/LFINF+DUC presenta un mejor comportamiento estructural. Lo anterior se traduce en menor probabilidad de daños y menores pérdidas económicas. Las pérdidas en los tres escenarios varían entre el -10.5% y el -14.4% mientras que los colapsos presentan una mayor variabilidad, estando entre el -24.6% y el -38.9%.

Tabla 5.6 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M2

TAXONOMÍA	CR/LFINF+DNO & CR/LFINF+DUC	CR/LFINF+DUC	VARIACIÓN
	M0	M2	
MODELO DE EXPOSICIÓN			
Cantidad de edificios	4,735	4,735	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$925,172	\$925,172	0.0%
Área construida (m ²)	1,076,383	1,076,383	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$70,178	\$60,055	-14.4%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$184,021	\$163,632	-11.1%

TAXONOMÍA	CR/LFINF+DNO & CR/LFINF+DUC	CR/LFINF+DUC	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M2	
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$205,184	\$183,560	-10.5%
Colapsos-CORT-250	50	31	-38.9%
Colapsos-CORT-500	255	188	-26.5%
Colapsos-CORT-1000	313	237	-24.6%

- Análisis del modelo M3.

En la Tabla 5.7 se agrupan las estructuras CR/LFINF+DNO y MCF/LWAL+DUC con la finalidad de distinguir únicamente estas tipologías como MCF/LWAL+DUC. Se observa una disminución de las pérdidas debido a que la curva de fragilidad de la mampostería confinada dúctil posee una menor probabilidad de excedencia de estados de daño en comparación con los pórticos de concreto no dúctiles. Para este caso, las pérdidas y colapsos se mantienen en un rango entre -20% y -35%.

Tabla 5.7 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M3

TAXONOMÍAS	CR/LFINF+DNO & MCF/LWAL+DUC	MCF/LWAL+DUC	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M3	
Cantidad de edificios	5,422	5,422	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$714,870	\$714,870	0.0%
Área construida (m ²)	759,574	759,574	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$33,010	\$22,304	-32.4%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$93,809	\$71,812	-23.4%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$108,419	\$85,523	-21.1%
Colapsos-CORT-250	49	32	-35.5%
Colapsos-CORT-500	258	196	-24.0%

TAXONOMÍAS	CR/LFINF+DNO & MCF/LWAL+DUC	MCF/LWAL+DUC	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M3	
Colapsos-CORT-1000	335	266	-20.5%

- Análisis del modelo M5.

En la Tabla 5.8 se analiza como varían los pórticos de concreto reforzado al considerarse todos como No dúctiles (CR/LFINF+DNO). Se observó que las pérdidas se duplicaron para el escenario CORT-250 y se triplicaron los colapsos para el mismo escenario. La confusión entre la ductilidad en pórticos de concreto reforzado podría conllevar a altas variaciones en los resultados del riesgo.

Tabla 5.8 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M5

TAXONOMÍA	CR/LFINF+DUC & CR/LFINF+DNO	CR/LFINF+DNO	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M5	
Cantidad de edificios	4,735	4,735	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$925,172	\$925,172	0.0%
Área construida (m ²)	1,076,383	1,076,383	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$70,178	\$140,865	+100.7%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$184,021	\$332,578	+80.7%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$205,184	\$364,351	+77.6%
Colapsos-CORT-250	50	158	+213.7%
Colapsos-CORT-500	255	678	+165.8%
Colapsos-CORT-1000	313	816	+160.3%

- Análisis del modelo M6.

El intercambio de estructuras de pórticos de concreto dúctil de 1 a 4 pisos por mampostería confinada no dúctil genera una leve disminución de pérdidas para los escenarios Cort-250 y Cort-500 de hasta el -1.4% y un leve aumento de +0.5% en el escenario Cort-1000. Respecto a los colapsos, hay un incremento de edificios colapsados de mampostería confinada dúctil de hasta el +32.2% para el escenario Cort-250.

Tabla 5.9 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M6

Taxonomía	CR/LFINF+DUC & MCF/LWAL+DUC (1 a 4 pisos)	MCF/LWAL+DUC (1 a 4 pisos)	Variación
	M0	M6	
Modelo de exposición			
Cantidad de edificios	8,567	8,567	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$1,128,859	\$1,128,859	0.0%
Área construida (m ²)	1,286,137	1,286,137	0.0%
Pérdidas- CORT-250 (Millones de COP)	\$43,538	\$43,115	-1.0%
Pérdidas- CORT-500 (Millones de COP)	\$134,799	\$132,917	-1.4%
Pérdidas- CORT-1000 (Millones de COP)	\$156,786	\$157,396	+0.4%
Colapsos- CORT-250 (Millones de COP)	45	59	+32.2%
Colapsos- CORT-500 (Millones de COP)	288	350	+21.5%
Colapsos- CORT-1000 (Millones de COP)	386	473	+22.6%

- Análisis del modelo M7.

En el modelo M7 se agrupa toda la mampostería confinada en una sola: MCF/LWAL+DUC. La Tabla 5.10 ilustra una disminución de un -35.7% en las pérdidas y un -37.7% en los colapsos para el escenario Cort-250 respectivamente. De manera similar a los casos anteriores, al considerar un grupo estructural como dúctil, se mejora el comportamiento estructural, reduciendo así daños y pérdidas.

Tabla 5.10 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M7

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DNO & MCF/LWAL+DUC	MCF/LWAL+DUC	VARIACIÓN
	M0	M7	
MODELO DE EXPOSICIÓN			
Cantidad de edificios	6,946	6,946	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$929,775	\$929,775	0.0%
Área construida (m ²)	952,007	952,007	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$38,890	\$25,020	-35.7%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$112,943	\$83,755	-25.8%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$131,289	\$100,131	-23.7%
Colapsos-CORT-250	58	36	-37.7%
Colapsos-CORT-500	302	228	-24.5%
Colapsos-CORT-1000	393	308	-21.5%

- Análisis del modelo M8.

La Tabla 5.11 ilustra la variación de las pérdidas al considerar que toda la mampostería confinada sin ingeniería (MCF/LWAL+DNO) es equivalente a mampostería no reforzada (MUR/LWAL+DNO). Se observó un cambio mínimo y despreciable en las pérdidas y colapsos. Para el escenario Cort-250, la diferencia entre pérdidas del modelo M0 y el M8 es de apenas -14.4%, cayendo a un -2.5% para el escenario de mayor intensidad. Con respecto a los colapsos, éstos disminuyen en un -7.7% para el escenario Cort-250; para el escenario de mayor intensidad apenas incrementan los colapsos en un +0.5%.

Tabla 5.11 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M8

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DNO & MUR/LWAL+DNO	MUR/LWAL+DNO	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M8	
Cantidad de edificios	41,519	41,519	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$2,581,082	\$2,581,082	0.0%
Área construida (m ²)	3,556,604	3,556,604	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$59,676	\$51,097	-14.4%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$229,387	\$220,717	-3.8%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$288,178	\$280,840	-2.5%
Colapsos-CORT-250	143	132	-7.7%
Colapsos-CORT-500	1,273	1,274	+0.1%
Colapsos-CORT-1000	1,893	1,903	+0.5%

- Análisis del modelo M9.

El modelo M9 intercambió la mampostería dúctil por pórticos de concreto no reforzados, lo cual generó incrementos en pérdidas y colapsos cercanos al +100% como se ilustra en la Tabla 5.12. Al disminuir la capacidad y resistencia sísmica de la mampostería confinada dúctil, usando curvas de pórticos de concreto sin ingeniería, se incrementan las pérdidas y daños.

Tabla 5.12 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M9

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DUC & CR/LFINF+DNO	CR/LFINF+DNO	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M9	
Cantidad de edificios	5,422	5,422	0.0%

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DUC & CR/LFINF+DNO	CR/LFINF+DNO	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M9	
Costo de reposición (Millones de COP)	\$714,870	\$714,870	0.0%
Área construida (m ²)	759,574	759,574	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$33,010	\$62,704	+90.0%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$93,809	\$162,011	+72.7%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$108,419	\$182,869	+68.7%
Colapsos-CORT-250	49	101	+106.6%
Colapsos-CORT-500	258	491	+90.5%
Colapsos-CORT-1000	335	622	+85.5%

- Análisis del modelo M10.

La Tabla 5.13 muestra la variación generada al reemplazar la mampostería dúctil por pórticos de concertó dúctil. Se observó una disminución en las pérdidas y colapsos. Las diferencias entre valores de pérdidas no supera el -7.3%. En los colapsos, las diferencias indican que existe menor probabilidad de alcanzar el estado de daño de colapsos en pórticos de concreto dúctil que en mampostería confinada dúctil, esto se ve reflejado al observar disminución en los colapsos de hasta un -28.3% en el escenario Cort-1000.

Tabla 5.13 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M10

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DUC & CR/LFINF+DUC	CR/LFINF+DUC	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M10	
Cantidad de edificios	9,097	9,097	0,0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$1.446.880	\$1.446.880	0,0%
Área construida (m ²)	1.618.079	1.618.079	0,0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$70.529	\$67.344	-4,5%

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DUC & CR/LFINF+DUC	CR/LFINF+DUC	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M10	
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$203.048	\$190.058	-6,4%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$232.533	\$215.604	-7,3%
Colapsos-CORT-250	51	38	-25,4%
Colapsos-CORT-500	324	237	-26,9%
Colapsos-CORT-1000	429	307	-28,3%

- Análisis del modelo M11.

El modelo M11 agrupa la mampostería confinada en un solo grupo: Mampostería confinada no dúctil. La disminución de ductilidad y resistencia se ve reflejado en la Tabla 5.14, donde se observa que existe un aumento de pérdidas y colapsos de casi el +70% en el escenario Cort-250.

Tabla 5.14 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M11.

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DUC & MCF/LWAL+DNO	MCF/LWAL+DNO	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M11	
Cantidad de edificios	6,946	6,946	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$929,775	\$929,775	0.0%
Área construida (m ²)	952,007	952,007	0.0%
Pérdidas-CORT-250 (Millones de COP)	\$38,890	\$65,358	+68.1%
Pérdidas-CORT-500 (Millones de COP)	\$112,943	\$169,014	+49.6%
Pérdidas-CORT-1000 (Millones de COP)	\$131,289	\$191,466	+45.8%
Colapsos-CORT-250	58	99	+70.9%
Colapsos-CORT-500)	302	457	+51.2%

TAXONOMÍA	MCF/LWAL+DUC & MCF/LWAL+DNO	MCF/LWAL+DNO	VARIACIÓN
MODELO DE EXPOSICIÓN	M0	M11	
Colapsos-CORT-1000	393	577	+46.9%

- Análisis del modelo M12.

La Tabla 5.15 muestra que al cambiar el 10% de mampostería no reforzada por mampostería confinada no dúctil, se ve reflejado en aumentos de pérdidas y colapsos. La diferencia obtenida en las pérdidas es despreciable ya que solo alcanza un +2.2% para el escenario de mayor intensidad. En los colapsos se logra ver mayor diferencia de hasta +8.6% para el mismo escenario.

Tabla 5.15 Análisis de variación del riesgo sísmico del modelo de exposición M12.

taxonomía	10% MUR/LWAL+DNO & MCF/LWAL+DNO	MCF/LWAL+DNO	Variación
Modelo de exposición	M0	M12	
Cantidad de edificios	6,001	6,001	0.0%
Costo de reposición (Millones de COP)	\$538,446	\$538,446	0.0%
Área construida (m ²)	626,896	626,896	0.0%
Pérdidas-SHA250 (Millones de COP)	\$25,956	\$26,082	+0.5%
Pérdidas-SHA500 (Millones de COP)	\$73,811	\$74,999	+1.6%
Pérdidas-SHA1000 (Millones de COP)	\$85,883	\$87,777	+2.2%
Colapsos-SHA250 (Millones de COP)	44	46	+4.4%
Colapsos-SHA500 (Millones de COP)	253	272	+7.7%
Colapsos-SHA1000 (Millones de COP)	340	369	+8.6%

- Análisis del modelo M13.

El modelo M13 considera simultáneamente la incertidumbre en todas las taxonomías de acuerdo con las proporciones obtenidas en las encuestas. El modelo M13 se podría considerar como el segundo modelo más probable para la ciudad de Barrancabermeja, ya que considera la opción de las encuestas “segundo tipo de estructura probable”.

Como se ilustró en las figuras 5.13 a 5.18, el modelo M13 alcanza una diferencia en las pérdidas respecto al M0 de +32.7%, +19.6% y +14.2% para los Trp de 250, 500 y 1000 años respectivamente. Estas diferencias positivas se deben al incremento de edificios No-dúctiles tales como los pórticos de concreto no dúctiles (CR/LFINF+DNO) en un +553.21%, y la mampostería confinada no dúctil (MCF/LWAL+DNO) en un +298.93%. Como se demostró en el modelo M5 y M11, se debe esperar un incremento en la pérdida económica y los colapsos cuando se consideran más estructuras No-dúctiles en el modelo de exposición.

5.2.2. VARIABILIDAD EN ANÁLISIS DE EVENTOS ESTOCÁSTICOS

En la Figura 5.19 se ilustran las curvas medias de tasas de excedencia de pérdidas para los diferentes modelos de exposición. Se observa que las curvas de los modelos M5, M9, M11 y M13 presentan valores superiores a las curvas del modelo M0. El resto de modelos mantienen una tendencia muy pareja al modelo M0.

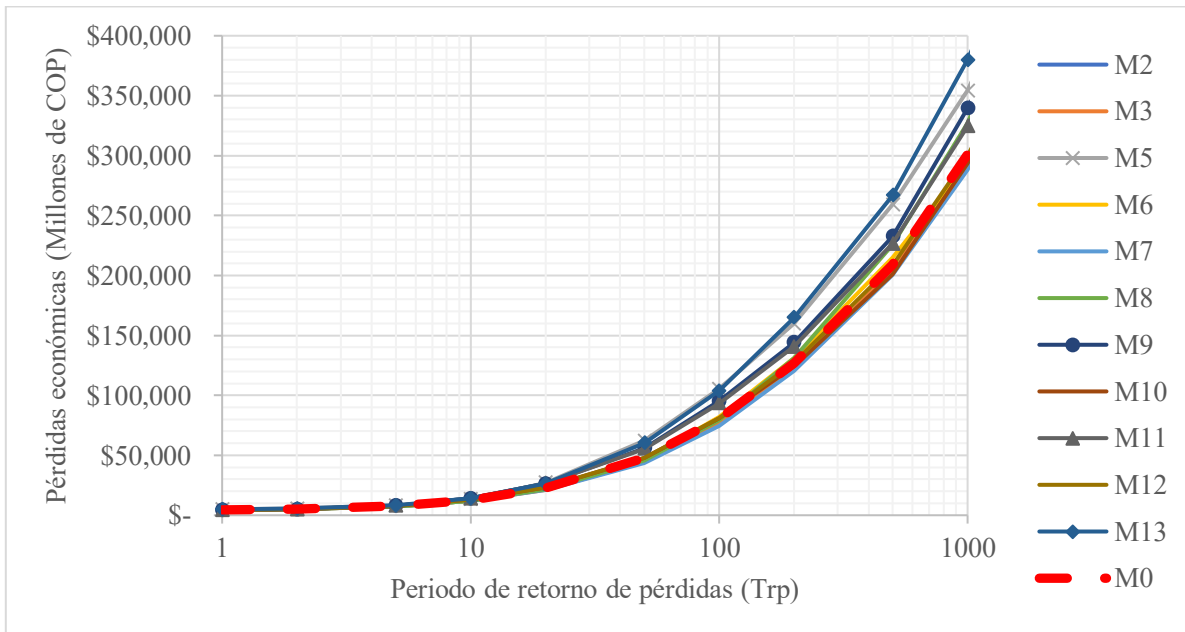


Figura 5.19 Curvas de tasa de excedencia de pérdidas para los diferentes modelos de exposición. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.20 muestra la comparación entre valores de pérdida promedio anual de cada modelo de exposición. Los valores máximos se observan en los modelos M5, M9, M11 y M13, alcanzando una diferencia respecto al modelo M0 de 8% como máximo, el resto de los modelos no presentan diferencias de más del 3%, tal como se ilustra en la Figura 5.21

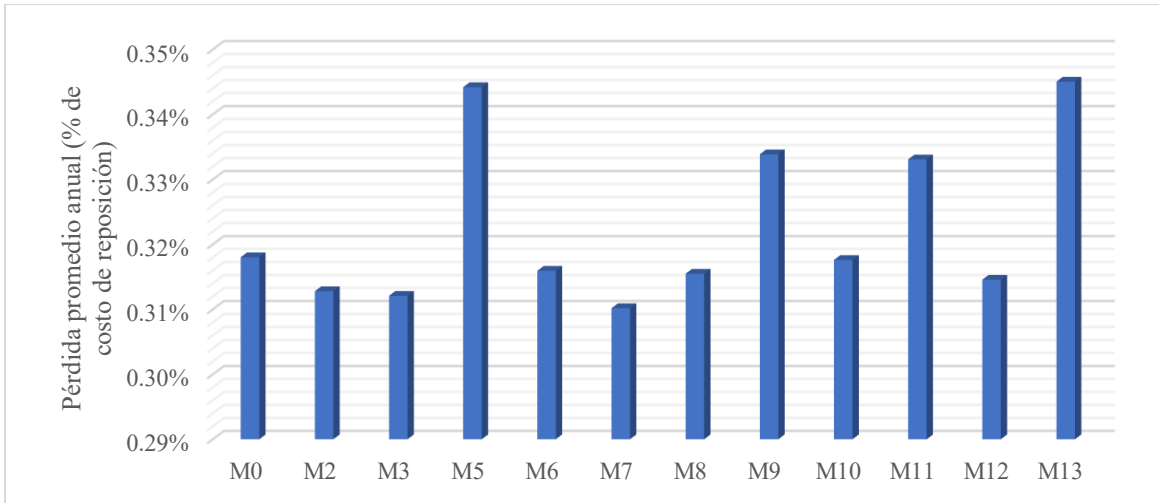


Figura 5.20 Pérdida promedio anual esperada de cada modelo de exposición (Porcentaje de costo de reposición). Fuente: Elaboración propia.

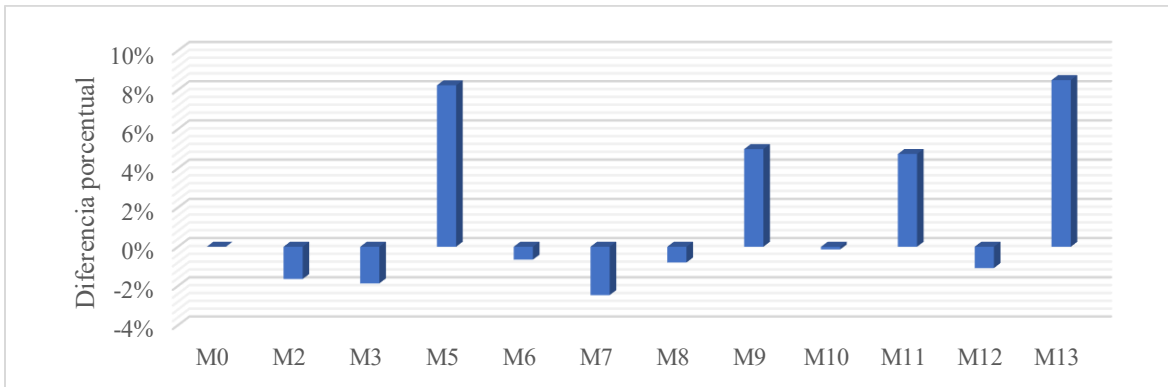


Figura 5.21 Diferencia porcentual de pérdida promedio anual esperada. Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Esta investigación evaluó el riesgo sísmico en la ciudad de Barrancabermeja, Colombia, en términos de pérdidas económicas y daños en edificaciones. En este estudio se utilizó el modelo de amenaza del proyecto South America Risk Assessment (SARA; GEM, 2015) el cual está disponible al público para su uso. El autor de este trabajo desarrolló un modelo de exposición basado en información de catastro, datos de 7,657 encuestas y opinión de expertos. Al realizar las encuestas se registró la incertidumbre asociada a la asignación del sistema estructural, lo cual permitió analizar dicha incertidumbre en los resultados del riesgo sísmico. Para el modelo de vulnerabilidad se utilizaron curvas de fragilidad disponibles que posteriormente se transformaron en curvas de vulnerabilidad mediante un modelo de consecuencias.

Durante el desarrollo del presente estudio se evidenció la necesidad de desarrollar, para futuros estudios, curvas de fragilidad más precisas y adecuadas para el inventario de estructuras colombianas, ya que hay taxonomías estructurales en la ciudad de estudio que no cuentan con una curva de fragilidad elaborada propiamente para sus características. Esto se evidenció en la mampostería confinada de 4 y 5 pisos, la cual se asumió con un comportamiento igual a la mampostería de 3 pisos. Aunque las curvas de fragilidad de FEMA (2015b) asignadas a pórticos de concreto, muros de concreto y sistemas duales, de más de 8 pisos, están desarrolladas para un contexto de construcción norteamericano, los resultados obtenidos en esta investigación se consideran una aproximación al riesgo en el inventario de estas estructuras. Para futuras investigaciones es conveniente la utilización de curvas de fragilidad desarrolladas propiamente para las construcciones observadas en Colombia.

Se realizó un análisis de eventos estocásticos el cual arrojó una pérdida promedio anual esperada de 13,753 millones de pesos, correspondiente al 0.32% del costo de reposición de todas las viviendas de Barrancabermeja. Del análisis estocástico se seleccionaron tres escenarios de las dos fuentes sismogénicas de mayor influencia en la ciudad: Corteza superficial y subducción intraplaca. Para periodos de retorno de pérdidas (T_{rp}) de 250, 500 y 1000 años, los escenarios de corteza superficial arrojaron pérdidas promedio del 3.83%, 12.09% y 14.41% del costo de reposición de viviendas, respectivamente, y colapsaron en promedio el 0.58%, 3.98% y 5.35% de las construcciones residenciales de la ciudad, respectivamente. Para los tres periodos de retorno mencionados, los escenarios de subducción intraplaca (asociados al Nido de Bucaramanga) generaron pérdidas promedio del 1.786%, 4.86% y 8.39%, y colapsaron el 0.32%, 1.19% y 2.84% de las viviendas, respectivamente. Los eventos de corteza superficial mostraron mayores pérdidas en los escenarios y en las curvas de tasa de excedencia de pérdidas a comparación de los eventos de subducción intraplaca. La diferencia de pérdidas entre estas dos fuentes sismogénicas se atribuye a la influencia de la profundidad del evento en las intensidades de movimiento estimadas, siendo menor la intensidad en escenarios con epicentros a grandes profundidades.

Para medir la incertidumbre en el modelo de exposición se evaluó en las encuestas las tipologías estructurales que el encuestador consideraba más probables, con ello se logró

determinar cuáles son las estructuras que más se confunde entre sí. Para evaluar la variabilidad de las métricas del riesgo se partió de un modelo inicial (M0) del cual se desprenden trece posibles modelos de exposición. Se descartaron dos modelos (M1 y M4) ya que se asignó la misma curva de fragilidad a los pórticos de concreto dúctiles de más de 8 pisos y a sistema duales de concreto.

El análisis de variabilidad de los resultados del riesgo mostró que se debe prestar atención a aquellas tipologías estructurales que más se confunden entre sí y cuya ductilidad genera cambios representativos en las curvas de fragilidad. Por ejemplo, los pórticos de concreto dúctiles y pórticos de concreto No-dúctiles poseen curvas de fragilidad con diferencias considerables entre sí; al parametrizar todos los pórticos como No-dúctiles, se triplicaron las pérdidas de esta taxonomía respecto al modelo inicial, que discretizaba los pórticos en dúctiles y No-dúctiles. Estas tipologías se deben definir en las encuestas con mayor criterio y certeza para disminuir el porcentaje de error que puede haber en la confusión de estructuras.

Se pudo evidenciar que, para Barrancabermeja, la mampostería no reforzada presenta resultados del riesgo muy similares a la mampostería confinada no dúctil. Se concluye entonces que sería válido presentar toda la mampostería no dúctil en un solo grupo estructural representado por la curva de fragilidad de MUR/LWAL o MCF/LWAL+DNO.

Los resultados de los escenarios, los mapas de zonificación de pérdidas y colapsos es la información base para que las entidades competentes en la atención de desastres analicen la necesidad de ampliar los centros de atención de salud, seguridad alimentaria, alojamiento temporal, asistencia social entre otros. Las instituciones deben ser conscientes de la capacidad de atención que poseen y evaluar la necesidad de ampliar su capacidad de cubrir la demanda de salud, alojamiento, equipos de rescate etc. Los mapas de zonificación son útiles para el tipo y concentración de las operaciones de rescate que podrían requerirse.

Este estudio demuestra que los barrios del centro de la ciudad como La Floresta, Las Colinas, Colombia, Galán Gómez y Parnaso son los que más colapsos se observaron en los escenarios y, por ende, son los que más atención requerirían en caso de un terremoto con características similares a las consideradas en los escenarios.

Los resultados reflejan la necesidad de un mejoramiento en los buenos hábitos de construcción en la ciudad. Se debe velar por que las construcciones posean diseños sismo-resistentes realizados por profesionales competentes y que las obras tengan supervisión técnica calificada.

En este estudio se logró calcular el riesgo sísmico de construcciones residenciales de Barrancabermeja. Aun así, para llevar a cabo un estudio completo del riesgo sísmico, se requiere integrar, en futuros estudios, todos los bienes tangibles que están expuestos y son susceptibles de sufrir daños por un sismo.

7. REFERENCIAS

- Abrahamson N., N. Gregor and K. Addo (2015). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes Earthquake Spectra, in press.
- 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. <http://doi.org/10.1007/s11069-016-2647-8>
- Alcaldía de Barrancabermeja. (2015). Barrancabermeja en Cifras 2012-2014, Barrancabermeja, Colombia.
- Akkar S., M. A. Sandikkaya, and J. J. Bommer (2014). Empirical Ground-Motion Models for Point- and Extended- Source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering* (2014), 12(1): 359 - 387
- Atkinson Gail M. and David M. Boore (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America; *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 96, No. 6, pages 2181-2205
- Ávila, G. E., Cubillos, A. E., Bello, E. M., Rodríguez, E. A., Rodríguez, C. E., & Ruiz, G. L. (2016). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*.
- Bindi D., M. Massa, L. Luzi, G. Ameri, F. Pacor, R. Puglia and P. Augliera (2014). Pan-European ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5 %-damped PSA at spectral periods of up to 3.0 s using the RESORCE dataset, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 391 - 340
- Bommer, J. J and D. M. Boore (2005). Engineering Geology: Seismology, in “Encyclopaedia of Geology”, R. C. Selley, L. Robin M. Cocks, and Ian R. Plimer (Editors), Elsevier Ltd., <http://dx.doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/90020-0>
- Boore David M., Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan and Gail Atkinson (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, nd 5 % Damped PGA for Shallow Crustal Earthquakes; *Earthquake Spectra*, Volume 30, No. 3, pages 1057 - 1085.
- Boore, D.M., Azari Sisi, A. and Akkar, S. (2012). Using Pad-Stripped Acausally Filtered Strong-Motion Data, *BSSA* 102(2), 751-760.
- Borcherdt, R. (1996). Effects of site conditions on strong ground shaking in the San Francisco Bay region during the 1999 Loma Prieta earthquake. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 2028. Elsevier Science Ltd.
- Borzi, B., Crowley, H., and Pinho, R., 2008. Simplified pushover-based earthquake loss assessment (SP-BELA) method for masonry buildings, *International Journal of Architectural Heritage* 2, 353–376.
- 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, 2, 188. <https://doi.org/doi: 10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02>.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., Crowley, H. (2006); Development of Seismic Vulnerability Assessment Methodologies Over the Past 30 Years, *ISSET Journal of Earthquake Engineering*, Paper No. 472 43(3): 75-104.
- Carr, M.J., Stoiber, R., 1973. Intermediate depth earthquakes and volcanic eruptions of Fuego volcanoes in Guatemala. *Eos* 57, 346.
- Celebi, M., Prince, J., Dietel, C., Onate, M., & Chavez, G. (1987). The Culprit in Mexico City - Amplification of Motions. *Earthquake Sprectra.*, 3(2).

- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
- DANE. (2015). Metodología para calcular el Indicador de Importancia Económica Relativa Municipal (IIERM), Cuentas Departamentales (CD). Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- Dell'Acqua, F., Gamba, P., & Jaiswal, K. (2013). Spatial aspects of building and population exposure data and their implications for global earthquake exposure modeling. *Natural hazards*, 68(3), 1291-1309.
- Di Pasquale; Goretti, (2001). Vulnerabilità funzionale ed economica degli edifici residenziali colpiti dai recenti eventi sismici italiani - X Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"
- Drouet S. (2015). Unpublished for Brazil based on the method described in Douet & Cotton (2015)
- Drouet, S., Cotton, F. (2015): Regional Stochastic GMPEs in Low-Seismicity Areas: Scaling and Aleatory Variability Analysis—Application to the French Alps. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 4, pp. 1883—1902. DOI: <http://doi.org/10.1785/0120140240>
- Durukal, E, Erdik, M and Sesetyan, K., (2006). Expected earthquake losses to buildings in Istanbul and implications for the performance of the Turkish catastrophe insurance pool. *Proceedings of geohazards, international engineering conferences*. Lillehammer, Norway
- Ecopetrol (2018), Nuestra historia, Bogota D.C, Colombia. Ecopetrol, Recuperado de : <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/nuestra-historia>, Septiembre del 2018.
- Eraso J. 2015. Cálculo del promedio de velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad (vs30) en Colombia como una aproximación a la estimación de los efectos sísmicos de sitio a escala nacional.
- Federal Emergency Management Agency. (2015a). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: supporting documentation. Report No. FEMA 155. 3rd ed. Washington, DC: Buildings Seismic Safety Council. Developed for the Federal Emergency Management Agency. 137 p.
- Federal Emergency Management Agency. (2015b). Hazus–MH 2.1: Technical Manual. *National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency (NIBS and FEMA)*, 718. Recuperado de: www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- Fotografía de portada tomada por Hotel San Silvestre, (Barrancabermeja, 2018), Foto aérea de Barrancabermeja, Recuperado de: <https://hotelsansilvestre.com/barrancabermeja/aerea-bca/> (en septiembre del 2018)
- GEM (2015), The Hazard Component of the SARA Project. Sara Wiki. Recuperado de: <https://sara.openquake.org/hazard> Julio 2018.
- GEM (2018). The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.1.0. doi: 10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.ENGINE.3.1.0, 198 pages.
- Gómez, J., Nivia, Á, Montes, N.E., Almanza, M.F., Alcárcel, F.A. & Madrid, C.A. (2015). Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. En: Gómez, J. & Almanza, M.F. (Editores), *Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 33, p. 9–33. Bogotá.

- Gonzales, D. (2017). Modelo de exposición sísmica de viviendas de Medellín Trabajo de tesis. Universidad EAFIT.
- Montalva et al. (2015). Unpublished, adaptation of the Abrahamson et al. (2015) BC Hydro GMPE, calibrated to Chilean strong motion data.
- NOAA, (2015). Earthquake Data Information. USA, Recuperado de <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml> Julio del 2015.
- NSR-10 (2010), Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, Bogotá D.C.
- Osorio Vergara, F. A. (2015). Modelo de exposición sísmica de viviendas del departamento de Antioquia, Colombia.
- 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.
- Ramírez J. E., (1995). Historia de terremotos, Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Silva V, Casotto C, Rao A, Villar M, Crowley H, Vambatsikos D (2015) Openquake risk modeller’s toolkit—user guide. Global Earthquake Model (GEM). Technical Report 2015-06. doi:10.13117/GEM.OPENQUAKE.MAN.RMTK.1.0/01
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Modelli, D., Pinho, R. (2014). Development of the OpenQuake Engine, the Global Earthquake Model’s Open-Source Software for Seismic Risk Assessment. *Natural Hazards*, 72(3): 1409-1427.
- Spiegel, M. R., & Stephens, L. J. (2005). *Estadística* (4ta ed.). McGraw Hill.
- Tavakoli B. and S. Pezeshk (2005). Empirical-Stochastic Ground-Motion Prediction for Eastern North America. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Volume 95, No. 6, pages 2283-2296.
- Vs30 Models and Data, USGS, USA, Recuperado el mayo del 2018 <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., María, H. S. (2017). Development of a Fragility Model for the Residential Building Stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581–604. <http://doi.org/10.1193/010716EQS005M>
- Wald, D. J., and Allen, T. I., 2007, Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, no. 5, 1379-1395.
- Yamin, L. E., Ghesquiere, F., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: El caso de Bogotá, Colombia*.
- Zarifi, Z., Havskov, J., & Hanyga, A. (2007). An insight into the Bucaramanga nest, *m*, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.06.004>
- Zarifi, Z., Havskov, J., 2003. Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Adv. Geophys.* 46, 237–278.
- 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 using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898–913.
- Zio E. (2006). “An introduction to the basis of reliability and risk analysis” World Scientific Publishing, Singapore.

ANEXO A

Se anexa la matriz de distribución de tipologías estructurales de cada zona homogénea de Barrancabermeja, correspondientes al modelo de exposición M0, a partir del cual se generaron los diferentes modelos de exposición que consideran la incertidumbre.

Tabla A.1 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E1,2/A1/COM. Modelo de exposición Inicial (M0).

E1,2/A1/COM	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DNO/HEX:1	0.43%
CR/LFINF+DNO/HEX:2	0.86%
CR/LFINF+DNO/HEX:3	0.43%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	0.43%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	2.58%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	2.58%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	0.43%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	0.43%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	0.43%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	0.86%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	1.29%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	1.29%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	1.29%
MR/LWAL+DUC/HEX:1	0.43%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	67.81%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	15.88%
UNK/HEX:1	2.55%

Tabla A.2 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E1,2/A1/MIX. Modelo de exposición Inicial (M0).

E1,2/A1/MIX	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DNO/HEX:1	0.18%
CR/LFINF+DNO/HEX:2	0.24%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	2.60%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	2.19%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	0.42%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	0.22%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	0.02%

E1,2/A1/MIX	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DUC/HEX:6	0.07%
CR/LWAL+DUC/HEX:1	0.23%
CR/LWAL+DUC/HEX:5	0.23%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	0.08%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	0.27%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	4.74%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	1.59%
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	0.07%
MR/LWAL+DUC/HEX:1	0.29%
MR/LWAL+DUC/HEX:5	0.07%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	77.50%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	3.20%
MUR/LWAL+DNO/HEX:3	0.22%
UNK/HEX:1	5.56%

Tabla A.3 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E1,2/A1/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).

E1,2/A1/RES	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DNO/HEX:1	0.26%
CR/LFINF+DNO/HEX:2	1.79%
CR/LFINF+DNO/HEX:3	1.28%
CR/LFINF+DNO/HEX:4	0.26%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	0.26%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	2.82%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	5.38%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	1.03%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	1.54%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	0.26%
CR/LWAL+DUC/HEX:1	0.26%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	1.28%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	2.05%
MCF/LWAL+DNO/HEX:3	0.26%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	5.64%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	3.33%
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	0.26%
MR/LWAL+DUC/HEX:1	0.51%
MR/LWAL+DUC/HEX:2	0.26%

E1,2/A1/RES	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	57.44%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	4.10%
UNK/HEX:1	9.74%

Tabla A.4 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E3,4/A2/COM. Modelo de exposición Inicial (M0).

E3,4/A2/COM	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DNO/HEX:2	0.60%
CR/LFINF+DNO/HEX:3	0.60%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	1.55%
CR/LFINF+DUC/HEX:10	0.30%
CR/LFINF+DUC/HEX:12	0.60%
CR/LFINF+DUC/HEX:13	0.24%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	4.66%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	9.07%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	7.25%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	2.59%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	1.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:7	0.50%
CR/LFINF+DUC/HEX:8	0.26%
CR/LFINF+DUC/HEX:9	0.26%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	2.00%
MCF/LWAL+DNO/HEX:3	1.26%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	0.26%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	4.00%
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	4.00%
MCF/LWAL+DUC/HEX:5	1.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	45.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	13.00%

Tabla A.5 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E3,4/A1/MIX. Modelo de exposición Inicial (M0).

E3,4/A1/MIX	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DUC/HEX:1	6.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	3.00%

E3,4/A1/MIX	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DUC/HEX:3	3.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	3.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	3.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	3.00%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	22.00%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	7.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	50.00%

Tabla A.6 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E3,4/A1/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).

E3,4/A1/RES	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LFINF+DUC/HEX:1	6.25%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	6.25%
CR/LWAL+DUC/HEX:2	1.56%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	28.13%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	54.69%
UNK/HEX:1	3.13%

Tabla A.7 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E3,4/A2/MIX. Modelo de exposición Inicial (M0).

E3,4/A2/MIX	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
CR/LDUAL+DUC/HEX:17	0.50%
CR/LFINF+DNO/HEX:3	3.00%
CR/LFINF+DNO/HEX:4	0.70%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	0.60%
CR/LFINF+DUC/HEX:13	0.70%
CR/LFINF+DUC/HEX:14	0.40%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	2.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	3.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	3.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	2.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	1.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:7	0.50%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	20.00%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	11.00%

E3,4/A2/MIX	
Taxonomía	Cantidad porcentual.
MCF/LWAL+DNO/HEX:3	4.16%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	3.44%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	5.00%
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	3.00%
MCF/LWAL+DUC/HEX:4	2.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	25.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	8.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:3	1.00%

Tabla A.8 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E3,4/A2/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).

E3,4/A2/RES	
Taxonomía	% Edificios
CR/LFINF+DNO/HEX:2	2.00%
CR/LFINF+DNO/HEX:3	1.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:1	0.40%
CR/LFINF+DUC/HEX:12	0.40%
CR/LFINF+DUC/HEX:2	2.17%
CR/LFINF+DUC/HEX:3	4.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:4	2.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:5	2.00%
CR/LFINF+DUC/HEX:6	0.32%
CR/LFINF+DUC/HEX:7	0.32%
CR/LFINF+DUC/HEX:8	0.32%
CR/LFINF+DUC/HEX:9	0.31%
MCF/LWAL+DNO/HEX:1	13.04%
MCF/LWAL+DNO/HEX:2	7.76%
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	4.40%
MCF/LWAL+DUC/HEX:2	30.00%
MCF/LWAL+DUC/HEX:3	1.55%
MR/LWAL+DUC/HEX:2	0.4%
MR/LWAL+DUC/HEX:3	0.4%
MUR/LWAL+DNO/HEX:1	16.00%
MUR/LWAL+DNO/HEX:2	12.00%

Tabla A.9 Distribución de taxonomías de la zona homogénea E3,4/A2/RES. Modelo de exposición Inicial (M0).

E5,6/A1/RES	
Taxonomía	% Edificios
MCF/LWAL+DUC/HEX:1	100.00%