Training and Communication for Earthquake Risk Assessment

TREQ Project

Tipologías constructivas en Quito, Cali and Santiago de los Caballeros

Deliverable 2.3.1 – Version 1.1.0



Reporte sobre tipologías constructivas en las ciudades del Proyecto TREQ

Global Earthquake Model (GEM) Foundation

www.globalquakemodel.org

Tipologías constructivas en Quito, Cali and Santiago de los Caballeros

Deliverable D2.3.1

Reporte técnico producido en el contexto del proyecto TREQ

Versión 1.1.0 – Octubre, 2021

A. Calderón, C. Yepes-Estrada, V. Silva

Global Earthquake Model Foundation

Colaboradores

Colombia

- Alcaldía de Santiago de Cali
- Servicio Geológico Colombiano (SGC)
- Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD)
- Universidad EAFIT
- Corporación OSSO

República Dominicana

- Ayuntamiento de Santiago de los Caballeros
- Centro Nacional de Sismología (CNS)
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC)
- Oficina Nacional de Evaluación Sísmica y Vulnerabilidad (ONESVIE)
- Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM)
- Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)
- Servicio Geológico Nacional (SGN)
- Universidad Iberoamericana (UNIBE)
- Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)
- 100 Resilience Cities (100RC)

Ecuador

- Municipalidad de Quito
- Escuela Politécnica del Ejercito (ESPE)
- Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE)
- Universidad de las Américas (UDLA)
- Universidad Central del Ecuador (UCE)
- Universidad de San Francisco de Quito (USFQ)
- Universidad Internacional SEK (UISEK)
- Instituto de la Vivienda (CIV)
- Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (CICP)
- Colegio de Arquitectos de Pichicha (CAE)

Agradecimientos

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

El Proyecto TREQ está diseñado para demostrar cómo la evaluación de peligros y riesgos de terremotos puede informar a los tomadores de decisiones sobre el desarrollo de políticas de reducción de riesgos, así como cómo el riesgo de terremotos puede comunicarse adecuadamente a las partes interesadas y al público en general. Específicamente, el proyecto tiene como objetivo desarrollar la capacidad para la evaluación del riesgo de terremotos urbanos en América Latina, Quito (Ecuador), Cali (Colombia) y Santiago de los Caballeros (República Dominicana), mientras que la segunda parte producirá materiales de capacitación, educación y comunicación que mejorará la comprensión del riesgo de terremotos en todo el mundo. Este programa está dirigido a un amplio espectro de partes interesadas, categorizadas en cuatro grupos principales: gobernanza (tomadores de decisiones / autoridades públicas), industria (practicantes y profesionales), academia (investigadores y profesores) y la comunidad.

Este informe ha sido posible gracias al apoyo y la generosidad del pueblo estadounidense a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Oficina de Asistencia Humanitaria (BHA). Las opiniones, hallazgos y conclusiones expresados en este documento pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de USAID o del gobierno de los Estados Unidos.

Cita: Calderon A., Yepes-Estrada C., Silva V. (2021) Tipologías constructivas en Quito, Cali and Santiago de los Caballeros. GEM-TREQ project technical report, deliverable D.2.3.1, v1.1.0, October 2021.

Derechos y permisos

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

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

Copyright © 2021 GEM Foundation.

http://www.globalquakemodel.org/

TABLA DE CONTENIDOS

Page

1 TREQ – COMUNICACIÓN Y FORMACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE RIESGOS POR TERREMOTOS 1

1.1 ¿Qué significa TREQ? 1
1.2 ¿Qué es un modelo de exposición? 1
1.3 ¿Qué se necesita para determinar el nivel de exposición de una ciudad? 2
1.4 ¿Cuáles son los elementos expuestos en la evaluación de riesgo sísmico en el proyecto TREQ? 3

2 SAN FRANCISCO DE QUITO – ECUADOR 6

2.1 Perfil de la ciudad 6
2.2 Estudios previos 6
2.3 Sistemas constructivos y su distribución 9
2.3.1.1 Pórticos de concreto reforzado confinado por paredes de mampostería 10
2.3.1.2 Mampostería semiconfinada o no reforzada 11
2.3.1.3 Mampostería de adobe, piedra y bahareque 11
2.3.1.4 Concreto reforzado colado en sitio 12
2.3.1.5 Construcción informal 13
2.4 Niveles de ductilidad 14
2.5 Tipologías estructurales 14

3 SANTIAGO DE CALI – COLOMBIA 16

3.1 Perfil de la ciudad 16
3.2 Estudios previos 17
3.3 Sistemas constructivos y su distribución 18
3.4 Niveles de ductilidad 23
3.5 Tipologías estructurales 23

4 SANTIAGO DE LOS CABALLEROS – REPÚBLICA DOMINICANA 25

4.1 Perfil de la ciudad 25
4.2 Estudios previos en la ciudad 26
4.3 Sistemas constructivos y su distribución 27
4.4 Niveles de ductilidad 31
4.5 Tipologías estructurales 32

5 REFERENCIAS 33

1 TREQ – Comunicación y formación en la evaluación de riesgos por terremotos

1.1 ¿Qué significa TREQ?

TREQ es una iniciativa liderada por GEM y patrocinada por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID-OFDA). Como lo sugieren sus siglas en inglés (Training and Communication on Earthquake Risk Assessment) este proyecto de tiene dos objetivos principales: 1) la evaluación detallada de la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano y 2) el entrenamiento y comunicación de dichas ciencias a las comunidades y gobiernos involucrados. Por su importancia estratégica, nivel patrimonial y estado de amenaza, tres ciudades de Suramérica y el Caribe fueron seleccionadas para la implementación de esta iniciativa: Quito (Ecuador), Cali (Colombia) y Santiago de los Caballeros (República Dominicana). Mediante la estrecha colaboración con el gobierno, la industria y la academia local, se espera que los resultados de este trabajo conjunto ayuden a fortalecer las estrategias de reducción del riesgo de desastres, así como mejorar la capacidad de cada comunidad para afrontar dichos eventos.

Para lograr una implementación exitosa es clave contar con la participación de las oficinas municipales para la reducción del riesgo de desastres (RRD), entidades académicas locales y los profesionales en las ciencias de sismología, ingeniería y evaluación del riesgo.

1.2 ¿Qué es un modelo de exposición?

Para realizar una evaluación de riesgo es necesario contar con tres componentes: la exposición, la amenaza y la vulnerabilidad. Un modelo de exposición debe describir, de la forma más detallada posible, los elementos que se encuentran amenazados por fenómenos naturales potencialmente destructivos, tales como inundaciones, huracanes o terremotos. Dichos elementos, que pueden ser edificios residenciales, escuelas hospitales, puentes y demás, deben ser examinados para cuantificar correctamente su vulnerabilidad física y potencial estado de riesgo (GFDRR 2014).

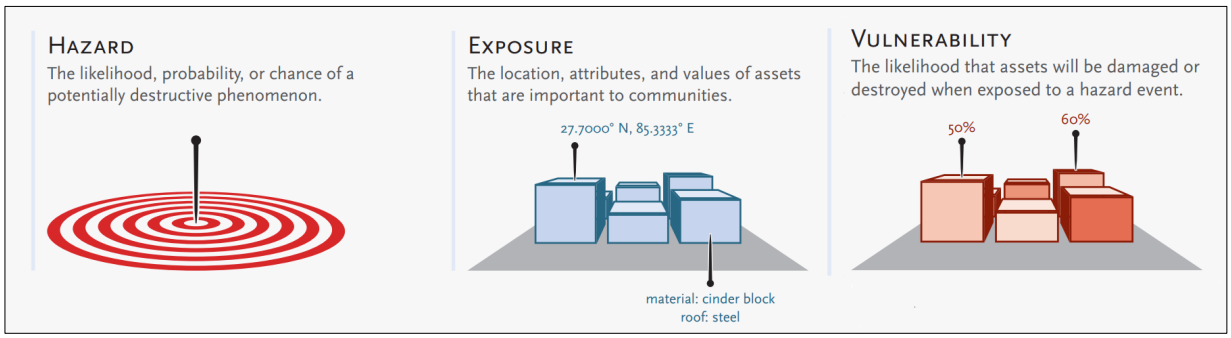


Figura 1. Componentes del riesgo catastrófico. Fuente GFDRR (2014).

1.3 ¿Qué se necesita para determinar el nivel de exposición de una ciudad?

Las características de un modelo de exposición dependen del tipo de aplicaciones en las que se utilizará, así como en las evaluaciones de riesgo a considerar. Dentro del marco del proyecto TREQ, solamente se abarcarán las edificaciones y la población del área metropolitana de las ciudades. Líneas vitales (redes de acueducto, alcantarillado, energía, gas), puentes, movilidad vehicular, medio ambiente, entre otros, no están incluidos en el alcance de dicho estudio. Para desarrollar un modelo de exposición de edificaciones a escala urbana, es necesario contar con información detallada sobre la ubicación de las estructuras, sus atributos estructurales y sus activos expuestos (ocupantes, valor económico, tiempo de afectación…). La información necesaria depende del tipo de evaluación de riesgo. Para el análisis de riesgo sísmico se requiere de los siguientes insumos para todos los activos.

Ubicación

La ubicación define la distancia que existe entre una estructura y la fuente de la amenaza, cómo fallas sísmicas activas. Por lo general, la intensidad que puede ocasionar daños a los elementos expuestos aumenta con la proximidad a la fuente. Para determinar la ubicación de los edificios expuestos de una ciudad es necesario contar con una base de datos geo-referenciada, cómo las bases de datos de información geográfica, censos de población y vivienda (por ejemplo, INEC 2011, Cali en Cifras 2015, ONE 2011).

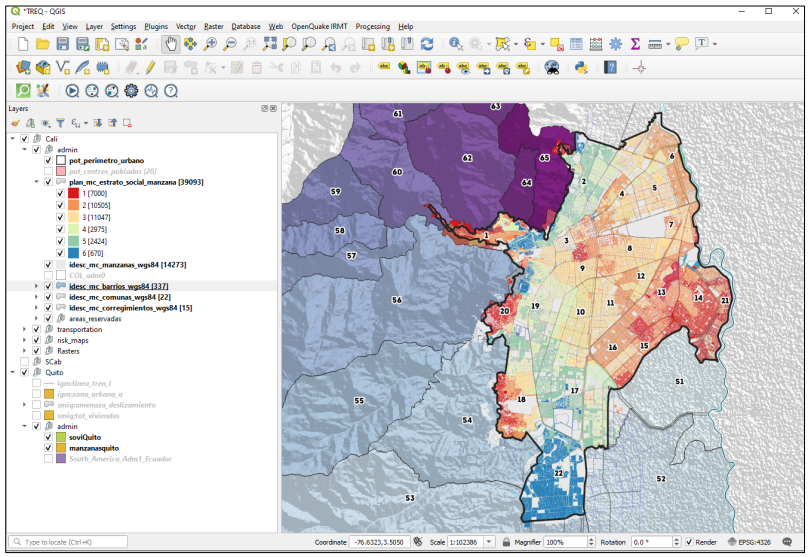


Figura 2. Ubicación geo-referenciada de más de 30 mil manzanas en la ciudad de Santiago de Cali. Fuente: idesc.cali.gov.co/geovisor.php

Atributos estructurales

Los atributos estructurales ayudan a clasificar las estructuras según su vulnerabilidad física. Entre los atributos más importantes que definen la vulnerabilidad sísmica de una estructura se pueden enumerar el material de construcción (por ejemplo, madera, concreto reforzado, acero), el sistema sismo-resistente (columnas y vigas, muros de corte, sistemas duales), el tipo de cimentación, el año de construcción, la normativa de diseño, el número de pisos, la regularidad en planta, en altura y el tipo

de estructura de techo o cubierta (Brzev et al. 2013). Estos atributos generalmente están capturados en bases de permisos constructivos, bases de datos catastrales y los censos de población y vivienda.

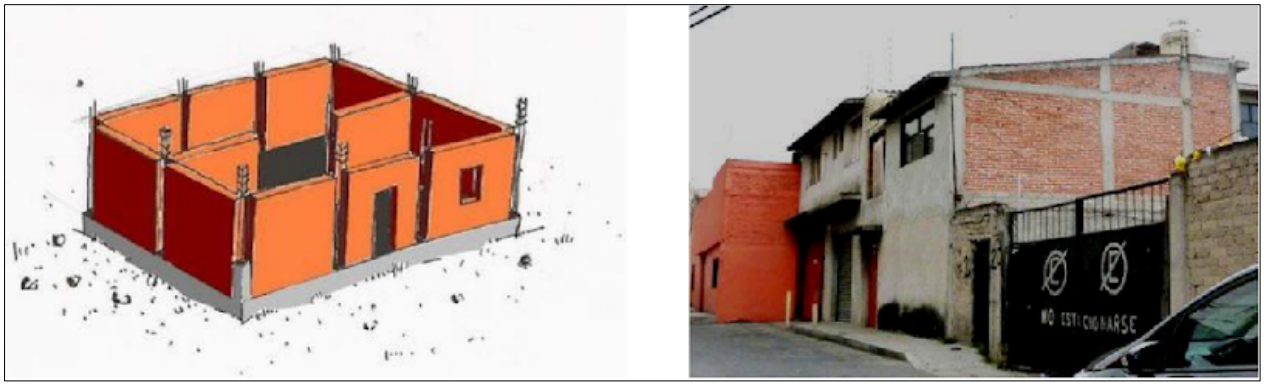


Figura 3. Secuencia constructiva en de la mampostería confinada por pórticos de concreto reforzado, una tipología constructiva típica en América Latina. Fuente: GEM Building Taxonomy (Brzev et al. 2013).

Valor expuesto - número de ocupantes y costo de reemplazo

El número de ocupantes y el costo de reemplazo establecen la pérdida en vidas humanas y valor monetario en el cual se incurriría en caso de daño irreparable o colapso total de una estructura. Para determinar los costos de construcción generalmente se utiliza el área de construcción promedio de las edificaciones y el costo por metro cuadrado de construcción por cada tipología constructiva identificada. Esta información generalmente se obtiene por medio de bases de datos catastrales, estadísticas recolectadas por instituciones públicas y privadas, datos de bancos centrales, oficinas censales y cámaras de construcción.

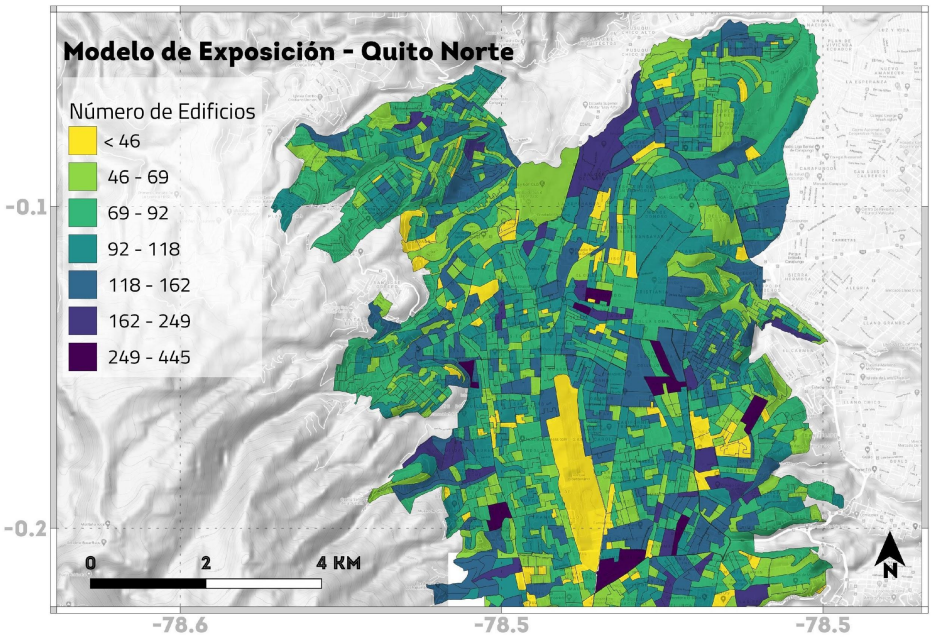
1.4 ¿Cuáles son los elementos expuestos en la evaluación de riesgo sísmico en el proyecto TREQ?

La experiencia obtenida en los proyectos de evaluación de riesgo sísmico para Suramérica (Acevedo et al. 2017, Yepes-Estrada et al 2017, Villar et al. 2017) y Centroamérica (Calderón et al. 2020) ayudó a determinar retos y necesidades específicas para cada país. En conformidad con los intereses expresados por el gobierno local de cada ciudad, los estudios propuestos en el proyecto TREQ se enfocan en amenazas y riesgos particulares. A continuación, se describe el interés principal para el modelo de exposición de cada municipio.

San Francisco de Quito

La Universidad Politécnica Nacional de Ecuador (EPN) y el Municipio de Quito colaboraron con GEM en el desarrollo de datos de exposición para Quito (actualmente utilizado dentro de la iniciativa de Ciudades Resilientes – Fundación Rockefeller, 2017) y la evaluación de la capacidad institucional del municipio (a través de una prueba de desempeño (Valcárcel et al. 2016), presentado por el alcalde de Quito durante la conferencia. El Municipio de Quito ha solicitado apoyo para desarrollar sesiones de entrenamiento para mejorar la capacidad local para evaluar la amenaza y el riesgo sísmico a nivel urbano, similar a los organizados en Medellín, Santiago de Chile, San José y Santo Domingo como parte de los proyectos de SARA y CARA. Consecuentemente, dentro del marco de acción del proyecto TREQ

se requiere de modelos de exposición a escala urbana que puedan formar parte del material de capacitación para los actores de la ciudad. Estos deben contar con información actualizada sobre el número de edificios y sus ocupantes en escala urbana, clasificados según su vulnerabilidad estructural y costo de reemplazo.



Figuran 4. Modelo de exposición de Quito al año 2011. Modificado de Ayala et al. (2015).

Santiago de Cali

El interés en la ciudad de Santiago de Cali es el impacto de las amenazas secundarias en las posibles pérdidas económicas y humanas. De acuerdo con el número de deslizamientos reportados cada año, solo en 1999 ocurrieron más de 15 desprendimientos de terreno que provocaron desastres (OSSO 2005). Dentro del marco de acción de TREQ se debe considerar el efecto de los deslizamientos de tierra y los fenómenos de licuefacción provocados por los terremotos en los indicadores de riesgo. La intención es estimar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra y licuefacción utilizando enfoques simplificados que empleen una cantidad limitada de información básica. Parte de esta información debe incorporarse en el modelo de exposición a escala urbana (por ejemplo, información detallada sobre la elevación, pendiente topográfica, estratificación y capacidad del suelo en las edificaciones residenciales de la ciudad). Los rangos de incertidumbre en este tipo de análisis se rigen por la cantidad y calidad de los datos geológicos, geofísicos y geotécnicos que pueda recolectarse.

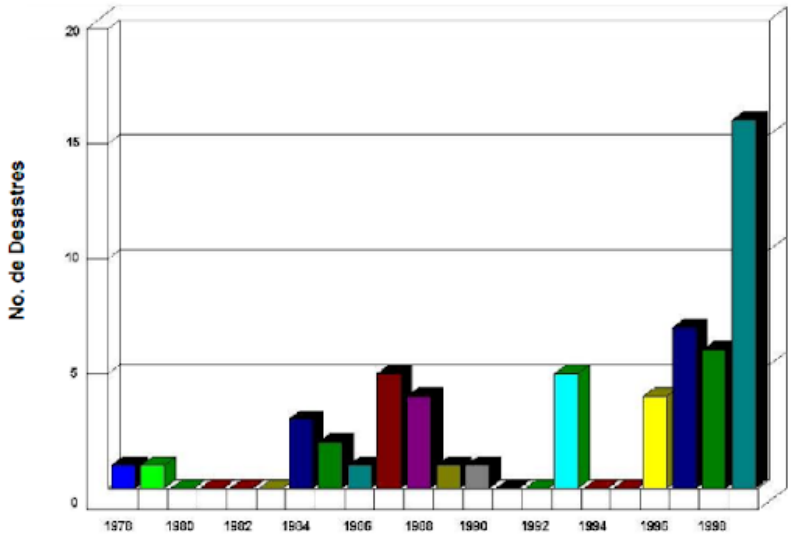


Figura 5. Número de desastres por deslizamiento reportados en Cali según el año. Fuente OSSO (2005).

Santiago de los Caballeros

Desde el inicio del proyecto TREQ la Oficina de Ordenamiento Territorial del Ayuntamiento de Santiago ha mostrado especial interés en el análisis de riesgo sísmico para edificaciones esenciales. Cerca de la falla septentrional se ha dado un rápido crecimiento urbano de edificios vulnerables, incluyendo escuelas, hospitales y otros edificios institucionales. Se cree que actualmente el 80% de las escuelas de la ciudad no tienen la capacidad de resistir terremoto de gran intensidad (Plan de Acción de Santiago, 2015). Las autoridades locales han iniciado un programa para recopilar información de escuelas y hospitales con respecto a su ubicación geoespacial y las características estructurales de los edificios. Como parte de TREQ se realizará la evaluación cuantitativa del riesgo de la infraestructura escolar y hospitalaria incorporando dicha información en un modelo de exposición para la ciudad.



Figura 6. Escuela técnica El Yaque y Complejo Educativo en Cienfuegos en Santiago de los Caballeros. Tomadas de https://presidencia.gob.do/noticias/santiago-estrena-70-aulas

2 SAN FRANCISCO DE QUITO – ECUADOR

2.1 Perfil de la ciudad

La ciudad de Quito, que actualmente abarca los municipios del Distrito Metropolitano de Quito o DMQ, es la capital del Ecuador y el centro político administrativo del país. Actualmente alberga a más del 15% de la población nacional y 87% de la población de Pichincha, haciéndola el centro urbano más importante de la provincia. De acuerdo con el Instituto de Estadísticas y Censos del Ecuador (INEC) el DMQ pasó de tener una población total de 1.82 millones de habitantes en el 2001 a más de 2.23 millones en el 2010 (INEC, 2010). Hoy en día la ciudadanía está distribuida con 1.6 millones de personas (72%) en zonas urbanas y 630 mil (24%) en las rurales. Está dividido en administraciones zonales que contienen 66 parroquias y más de 1200 barrios. Entre los años 1760 y 1971 la mayor expansión urbana se dio en las administraciones zonales conocidas hoy como la ciudad consolidada (Gómez y Cuvi, 2016). Sin embargo, desde los setentas en adelante las parroquias con el mayor crecimiento poblacional se encuentran en la periferia urbana y las áreas suburbanas. Por ejemplo, en el 2010 la administración zonal Manuela Saenz, donde se encuentra la parroquia del Centro Histórico, reportó una disminución anual poblacional del 0.5%. Por otro lado, las administraciones de mayor crecimiento se dieron en el área suburbana, como es el caso de Calderón y Tumbaco con incrementos poblacionales del 4.7% y 3.0% anuales respectivamente (POT Quito, 2011).

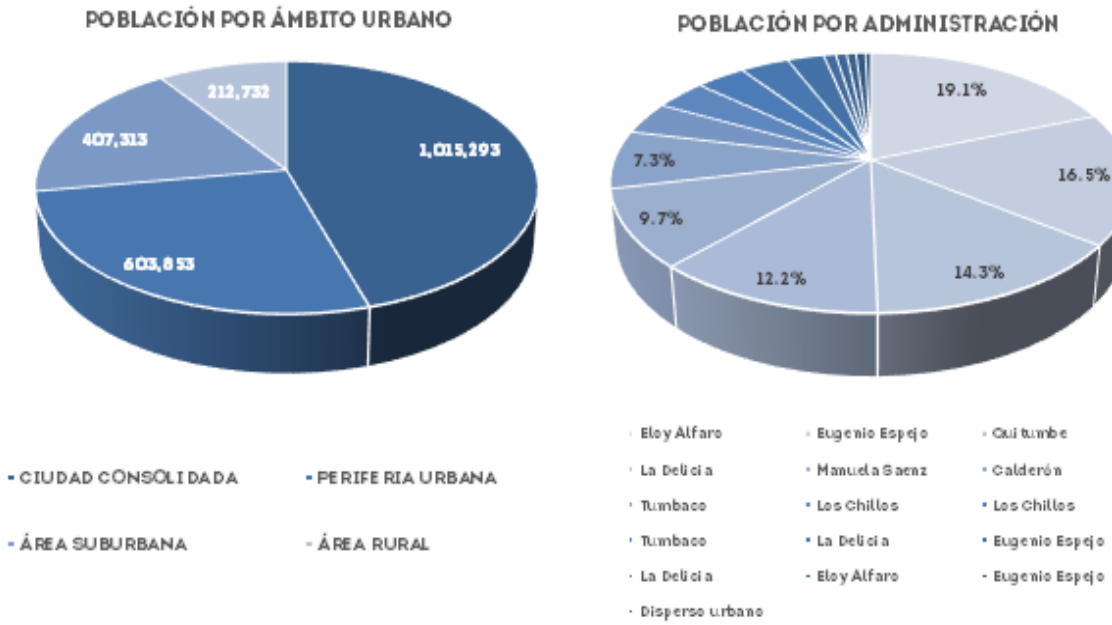


Figura 7. Distribución de la población del DMQ por ámbito urbano y administración zonal. Fuente INEC 2011.

2.2 Estudios previos

Existe una cantidad importante de literatura científica referente a la amenaza sísmica y el estado del riesgo en la ciudad de Quito. Entre los esfuerzos más relevantes se encuentra el Proyecto Piloto para el Manejo del Riesgo Sísmico (1994, 1995, 1996) del cuál surgen trabajos tratando las tipologías constructivas de la ciudad y la evolución de la exposición en el tiempo. Por ejemplo, Villacís et al. (1997) y Chatelain et al. (1999) usaron herramientas disponibles, como el censo de población y vivienda de

1990 y encuestas ciudadanas para determinar el número total de edificaciones y la infraestructura expuesta en el área urbana. Consecuentemente presentaron una distribución espacial y temporal de las estructuras de adobe en el Quito colonial, y el uso extenso de concreto reforzado en el Quito moderno. Al mismo tiempo indicaron que, desde los noventa, hay gran incremento en el número de estructuras informales de uno a tres pisos al sur de la ciudad. Posteriormente Yépez (2001) detalla con una zonificación estructural de 6 clases los tipos de material de construcción predominante y su distribución en el área urbana. Además de mencionar el uso extenso de la mampostería y el concreto reforzado, hace énfasis en que las modalidades constructivas utilizadas son de gran vulnerabilidad sísmica (por ejemplo, mampostería no reforzada y marcos de concreto con losas planas).

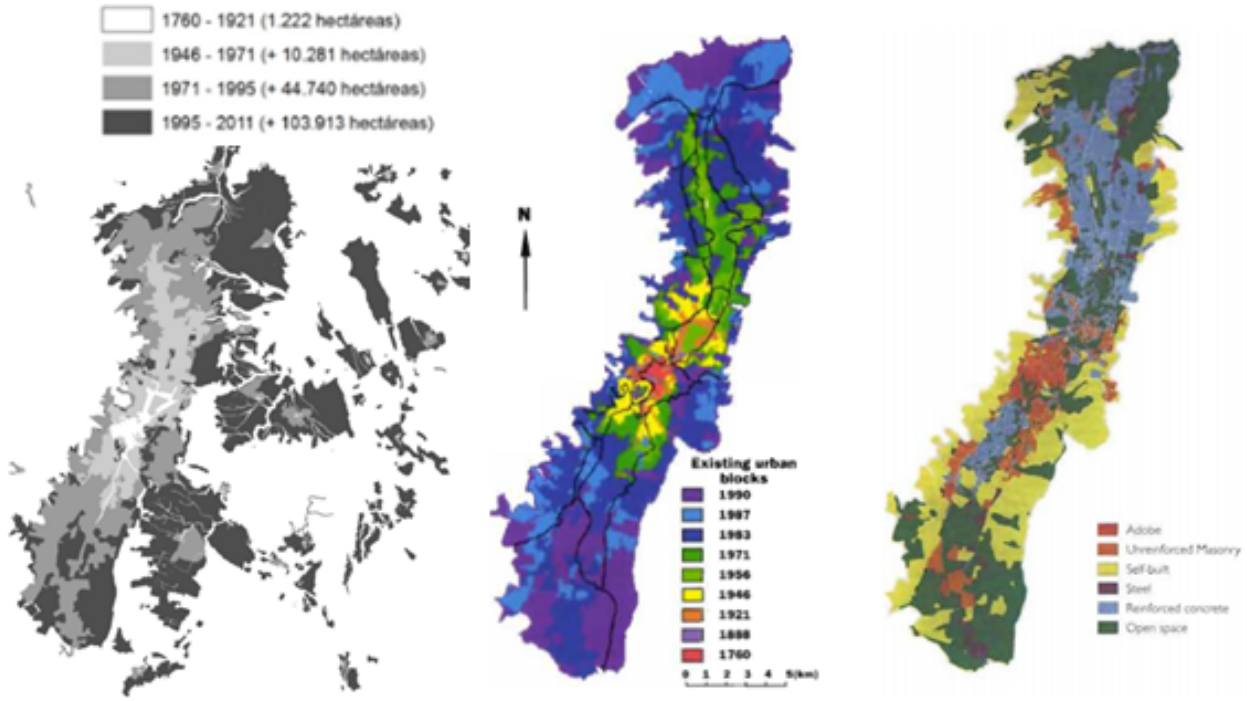


Figura 8. Evolución de la zona urbana y los materiales de construcción en el tiempo y el espacio del DMQ. Tomados de Gómez y Cuvi (2016) Plan de Manejo de Riesgo (1996) y Yépez (2001).

Como parte del Proyecto de Evaluación de Riesgo Sísmico en Suramérica (SARA, por sus siglas en inglés) y en esfuerzo conjunto entre la Fundación GEM y la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, se realizó una actualización de los componentes de exposición (Ayala et al. 2015) y vulnerabilidad (Celi et al. 2017) de la ciudad. El modelo de exposición cubre las parroquias urbanas del DMQ y definió 20 tipologías estructurales. El modelo se realizó a partir de la información del censo de población y vivienda (INEC, 2010), dividiendo la ciudad en 5 zonas homogéneas de construcción, y con base en casi 13 mil inspecciones visuales usando la herramienta *Inventory Data Capture Tools* (Foulser-Piggot et al. 2014), la cual clasifica las estructuras de acuerdo con la Taxonomía de edificaciones propuesta por GEM (Brzev et al. 2013).

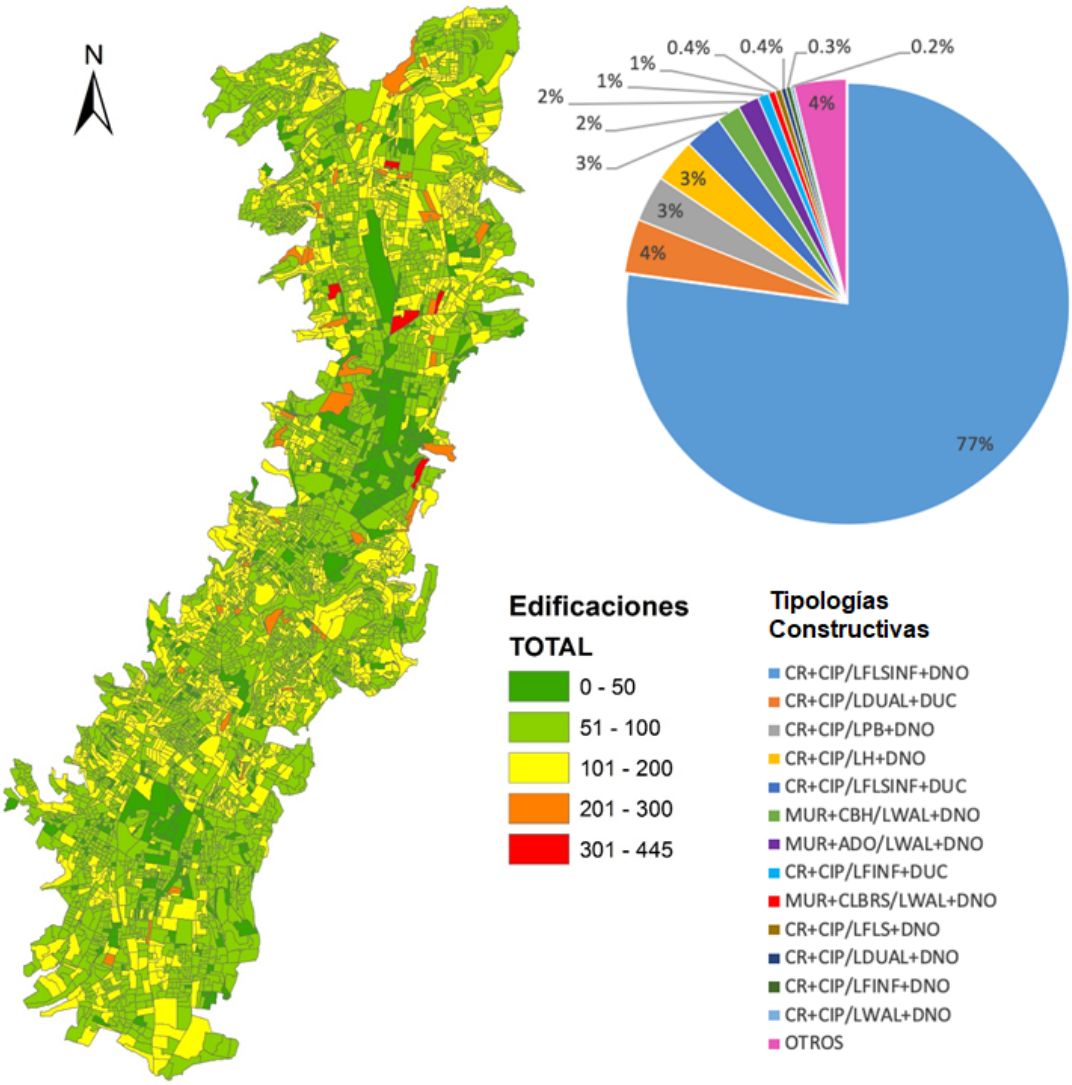


Figura 9. Número y distribución de edificaciones en el DMQ y principales tipologías constructivas (Ayala et al, 2015).

Para el centro histórico de Quito, Rivas y Chávez (2016), clasificaron las tipologías constructivas a partir de inspecciones en sitio de casi 2,500 estructuras, correspondientes al 95.6% de la muestra total estimada. Definieron 15 tipologías estructurales siguiendo la clasificación propuesta por HAZUS (1999), predominando la mampostería no reforzada y pórticos de concreto reforzado.

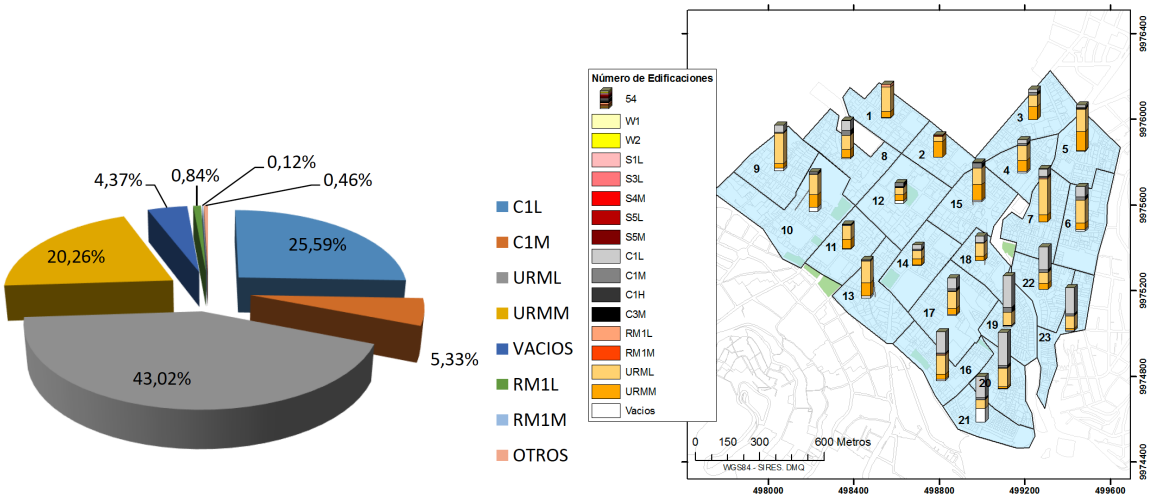


Figura 10. Tipos de viviendas en centro histórico de Quito según tipologías de HAZUS (Rivas y Chávez, 2016).

En la actualidad se están llevando a cabo nuevas investigaciones por parte del gobierno local y el sector académico para mejorar el modelo de exposición de la ciudad. Por ejemplo, actualmente la alcaldía trabaja en compilar una base de datos con información de varias entidades de la ciudad (por ejemplo, municipalidad, INEC, catastro, proveedores de agua y electricidad) para obtener una descripción exhaustiva de cada elemento físico expuesto en el municipio. La misma, que incluye edificios, redes de comunicación y servicios, puede llegar a incluir hasta 83 variables de forma aproximada en la definición de un elemento expuesto, con una resolución de edificio por edificio (Yepes et al. 2020).

2.3 Sistemas constructivos y su distribución

La mampostería es el material de construcción más ampliamente utilizado en Quito. De acuerdo con el último censo de población y vivienda más del 75% de las viviendas presentan bloques de mampostería como el material de las paredes exteriores (INEC, 2010). También se le da un uso comercial y mixto. Se encuentra en toda la ciudad y en diferentes configuraciones. Los bloques pueden ser de ladrillos sólidos de arcilla o de piedra, o bloques huecos de concreto, dependiendo del año de construcción y la zona de la ciudad. De acuerdo con el mismo censo, el concreto reforzado también tiene una participación significativa de alrededor del 14%. Se usa para confinar la mampostería, o como sistema sismorresistente en construcciones formales y masivas, como apartamentos, centros comerciales. Es necesario destacar que existe una incertidumbre asociada a las estructuras identificadas como mampostería o concreto, dado que el censista puede tener dificultades en determinar la diferencia visual entre ambos materiales en campo. Por otro lado, la construcción en adobe aún se preserva en cantidades importantes (cerca del 6%), como las edificaciones coloniales del centro histórico. La madera, la fibra natural, el bahareque y el material de desecho tiene un papel minoritario en la construcción de la ciudad (menor al 5%). La desagregación de estos materiales en sus diferentes sistemas constructivos, sismo-resistentes, alturas, niveles de diseño, uso y ocupación dan lugar a las tipologías de la ciudad. A continuación, se detallan las tipologías predominantes en Quito, utilizando como base la información de acceso libre disponible, la información compartida por parte de los investigadores del proyecto TREQ y la experiencia acumulada en la modelación de la exposición en

Suramérica por parte de la Fundación GEM. La información existente en los censos de población y vivienda, así como en las encuestas de establecimientos facilitan la identificación de algunas características constructivas en la ciudad.

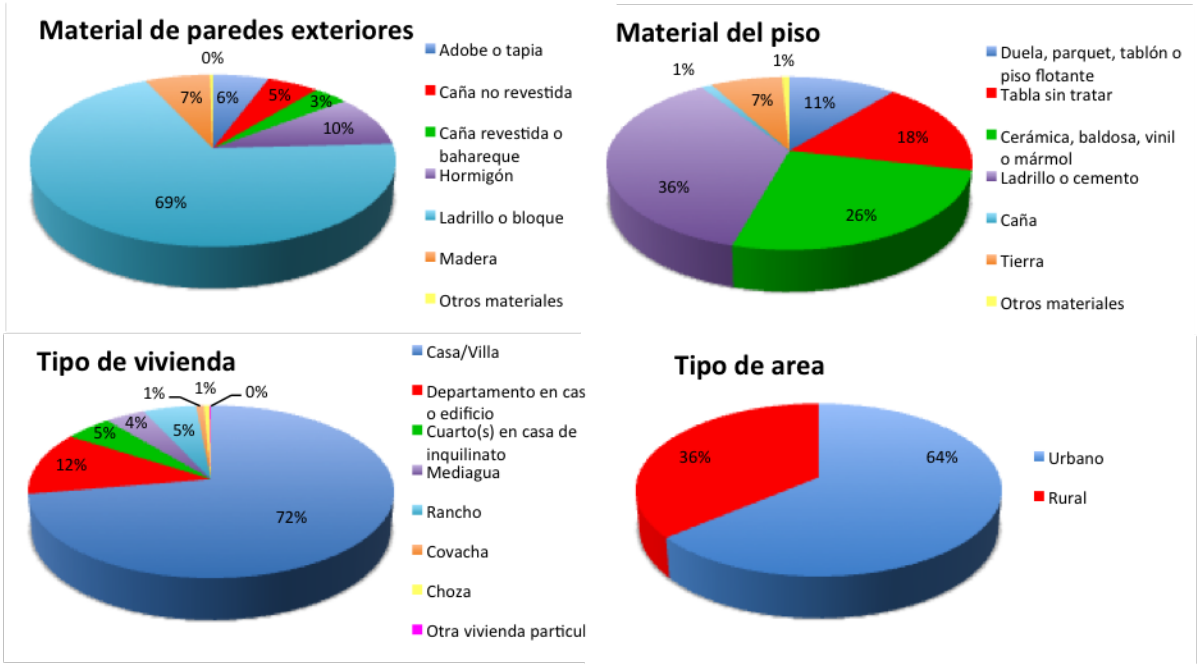


Figura 11. Características de la vivienda en Quito de acuerdo con el último censo de población y vivienda (INEC, 2010).

A la fecha aún no se encontró en las bases de datos censales información referente a los materiales y las tipologías constructivas en estructuras de uso industrial y comercial. En el caso de las estructuras de uso comercial, muchas de ellas son el resultado de modificaciones a estructuras originalmente destinadas a vivienda. El reporte del modelo de exposición para el DMQ desarrollado por Ayala et al. 2015 incluye imágenes y descripciones de las principales tipologías constructivas encontradas. Igualmente, Rivas y Chávez (2016) presentan las tipologías representativas en el centro histórico de la ciudad dividiéndolo en 23 zonas. Por último, la guía de arquitectura de Quito (Quito-Sevilla, 2004), reconoce edificaciones de valor arquitectónico en 23 recorridos por el DMQ, mostrando detalles sobre fechas de construcción, uso y la planta característica de dichas edificaciones. A continuación, se presenta una clasificación de los principales sistemas constructivos realizada basada en los resultados obtenidos por dichas investigaciones.

2.3.1.1 Pórticos de concreto reforzado confinado por paredes de mampostería

La mampostería puede ser confinada por pórticos de concreto vaciado en sitio, semiconfinada (sin viga corona), reforzada y sin reforzar. El primer sistema emplea paños de mampostería como el cerramiento de la edificación. Cada paño se encuentra confinado por pórticos de concreto reforzados con varilla de acero. Por lo general no existe acero longitudinal ni vertical a lo largo de los paños con distanciamientos homogéneos (por ejemplo, cada longitud de bloque), pero pueden existir cabos de varilla funcionando como conectores de cortante entre la losa y las paredes. El sistema sismorresistente es de tipo muro en la mayoría de los casos, pero también existen sistemas mixtos con marcos funcionando en la otra dirección. La configuración en planta puede ser regular o presentando torsión. En casas unifamiliares y

comercios, el rango de alturas va de 1 a 3 pisos con una ductilidad baja a moderada. En edificios multifamiliares pueden llegar a tener 6 pisos, de los cuales se esperan previsiones sismo-resistentes mínimas. De acuerdo a la clasificación de Ayala (2015), la mayoría de las viviendas unifamiliares de la ciudad se encuentran en esta modalidad constructiva.



Figura 12. Configuraciones de pórticos de concreto confinando muros de mampostería. Fuente: Informe Fase 1, Proyecto SARA (EPN, 2016).

2.3.1.2 Mampostería semiconfinada o no reforzada

Es similar al sistema constructivo descrito anteriormente, sin embargo, la falta de una viga corona no permite un confinamiento completo de las paredes. Se puede encontrar variantes de 1 hasta 4 pisos ya que su uso no está limitado a la vivienda unifamiliar. No se espera un comportamiento dúctil en edificaciones independientes, irregulares, en composiciones sencillas de bloque sobre bloque sin refuerzo ni conexión con la losa del entrepiso, o cuando la cubierta es de zinc o material liviano. En configuraciones de cajón, regulares en planta, con paños pequeños, baja altura y de losa de techo de concreto se puede esperar una respuesta más dúctil de la estructura.



Figura 13. Mampostería no reforzada o parcialmente confinada. Fuente: Informe Fase 1, Proyecto Sara (EPN, 2016).

2.3.1.3 Mampostería de adobe, piedra y bahareque

El centro histórico de Quito aún cuenta con una gran cantidad de edificaciones coloniales que se preservan en buen estado. Estas actualmente presentan un uso mixto residencial y comercial. El

material constructivo puede ser de adobe con trama de paja, bloque de piedra e incluso bahareque (Centro Histórico de Quito: La vivienda, 1991). Por consiguiente, el sistema sismo-resistente predominante es de muros de corte. Aunque la altura común es de 2 pisos, se pueden encontrar unidades en el rango de 1 a 4 pisos. Tienen cubiertas de teja y material liviano. La combinación del adobe con fibras naturales provee resistencia, sin embargo, dado el nivel de amenaza sísmica de la ciudad, su antigüedad y falta de provisiones sísmicas se puede esperar de las mismas un comportamiento de baja ductilidad.



Figura 14. Casa esquinera de adobe del siglo XVII, entre las Calles Rocafuerte y Quiroga, en el centro histórico de Quito. Fuente Centro Histórico de Quito: La vivienda (1991) y Google Maps (2020).

2.3.1.4 Concreto reforzado colado en sitio

En el concreto reforzado también se emplea en distintas modalidades. Para vivienda unifamiliar, el sistema sismorresistente se presenta en pórticos de concreto resistentes a momentos, conformados por columnas y vigas con refuerzo longitudinal, transversal y en los núcleos de unión de hasta tres pisos. También existe en la modalidad de muros de concreto. El nivel de ductilidad esperado para dichas configuraciones puede variar de bajo a alto, dependiendo directamente del detallado estructural. En el Quito moderno se emplea en edificaciones de gran altura, combinando pórticos y muros de concreto, para uso habitacional (i.e. edificios de apartamentos) y comercial (por ejemplo, oficinas, hoteles y centros comerciales). En estos casos se espera un comportamiento dúctil debido a la formalidad en la construcción y la existencia de provisiones sismo-resistentes.



Figura 15. Torre CFN y Torres Santa Fe en el centro de Quito. Tomadas de: Google Maps (2020)

2.3.1.5 Construcción informal

La zona urbana central de Quito creció en lo que se conoce hoy como la ciudad consolidada hasta la década de 1970. Desde los setenta en adelante se expandió hacia los valles orientales y las laderas de la ciudad. Gran parte de esta expansión urbana se ha dado en forma de asentamientos informales, denominados como asentamientos humanos en proceso de consolidación. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial del DMQ (POT Quito, 2011) entre 1988 y 1998 los asentamientos informales pasaron a ser más de 400. En las décadas subsecuentes hasta la actualidad han tenido un crecimiento desacelerado, sin embargo, se estima que en la actualidad al menos un 60% de la construcción residencial en el DMQ es informal (Quito Resiliente, 2017).

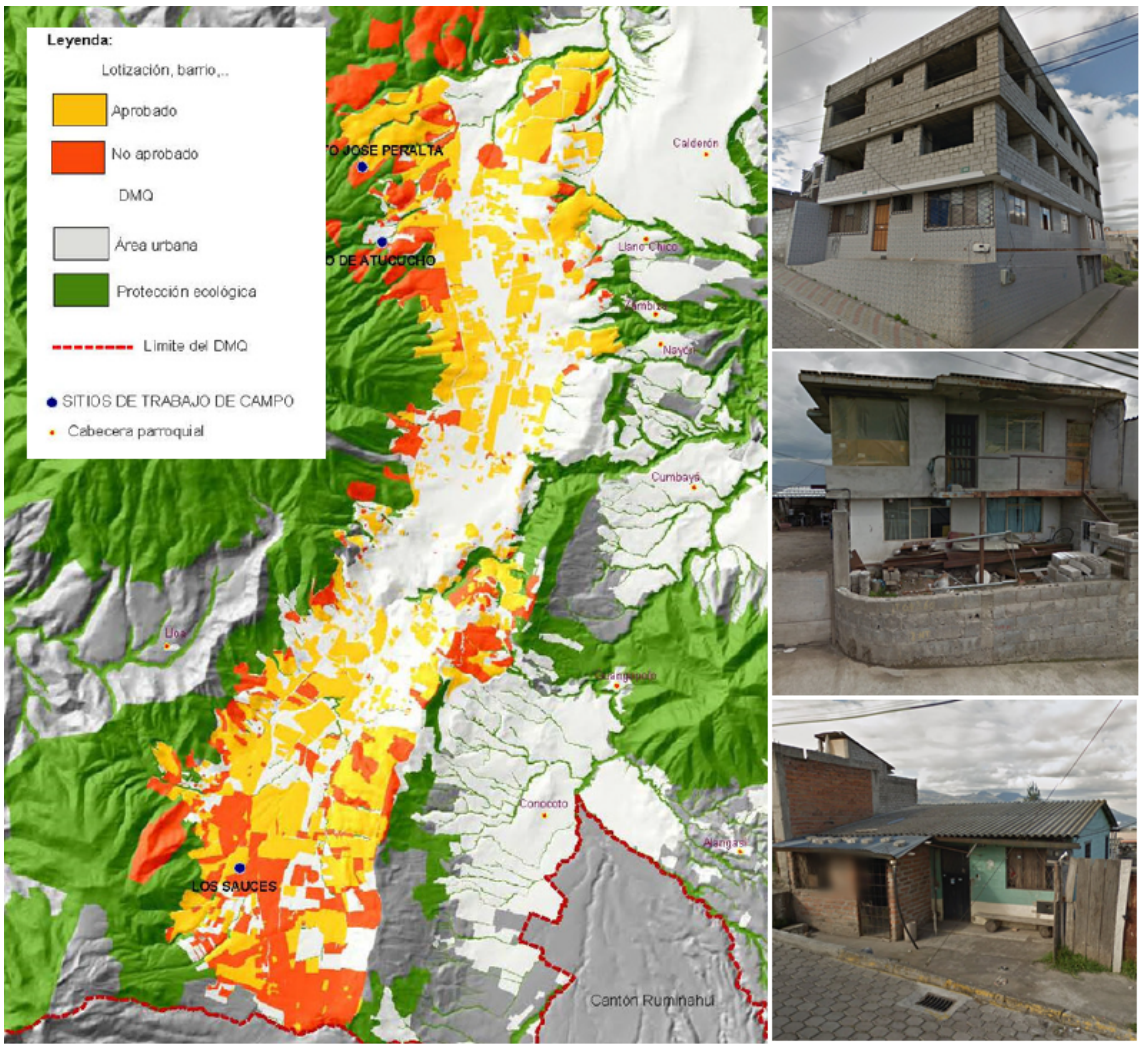


Figura 16. Mapa del estudio de Gómez y Cuvi (2016) mostrando asentamientos no aprobados dentro del área urbana del DMQ, complementado por fotografías tomadas de Google Maps (2020) del sur de la ciudad.

Debido a que estos barrios no obedecen criterios de planificación urbana ni de orden territorial, algunos están ubicados zonas inundables o demasiado secas, en pendientes irregulares, a la par de taludes inestables desprovistos de vegetación, al borde de quebradas o dentro de ellas (Gómez y Cuvi 2016). Además de estar en territorios vulnerables a inundaciones o deslizamientos, los sistemas constructivos empleados en la vivienda informal también las hacen vulnerables a los sismos. La

construcción informal emplea materiales fuera la norma (por ejemplo, bloques de concreto de baja calidad o materiales de desecho) configuraciones no apropiadas (por ejemplo, paños de mampostería de longitud y altura no permitida, aberturas excesivas), y sistemas constructivos vulnerables a los sismos (por ejemplo, muros sin refuerzo, muros sin confinamiento, pisos blandos). Algunas viviendas, formales e informales incrementan el número de pisos de forma no fiscalizada, ya que las dejan previstas para el incremento modular en altura. Debido a este dinamismo constructivo se dificulta la clasificación apropiada de la tipología y vulnerabilidad estructural en una gran cantidad de edificaciones destinadas al uso residencial y comercial.

2.4 Niveles de ductilidad

En la identificación de las tipologías se utilizará como factor principal el nivel de formalidad en la construcción para definir el desempeño sísmico de una edificación. Estructuras sin prueba de tenencia, que no aparezcan en bases oficiales de catastro y de permisos o sin evidencia visual de diseño e inspección por parte de un ingeniero, se asumirán dentro en esta investigación como construcciones informales. La construcción informal se clasificará con una ductilidad esperada baja. En los casos en los que el material constructivo, la configuración estructural o la edad de la edificación lo permitan se podrán clasificar con ductilidad moderada. Por otro lado, debido la existencia de normativa sismorresistente en Colombia desde mediados de los años ochenta, se asumirá que la construcción formal en la ciudad de Cali tiene las provisiones adecuadas para mostrar una ductilidad moderada o alta. Las edificaciones formales construidas entre 1985 y 2000 sin intervenciones de reforzamiento se considerarán como moderadamente dúctiles. Estructuras construidas usando la normativa existente en los últimos 20 años se considerará con una ductilidad alta.

2.5 Tipologías estructurales

Según los diferentes materiales, sistemas constructivos, número de pisos y niveles de diseño se definieron 66 tipologías estructurales para la ciudad de Quito. La siguiente tabla resume los cuatro principales atributos que definen cada tipología: el material de construcción, sistema sismo-resistente (LLRS), el nivel de ductilidad esperado y el número de pisos (de forma agregada). Cada una tiene código o taxonomía de identificación única asignado según los lineamientos establecidos por Brzev et al. (2013). También cuentan con un indicador de su uso según sea una tipología empleada para uso residencial (R), comercial (C) o industrial (I).

Tabla 1. Lista de tipologías constructivas principales en la ciudad de Quito.

Material	Taxonomía	LLRS	Ductilidad	Pisos	Uso
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Baja	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Moderada	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Alta	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Moderada	4 a 7	R-C
Concreto	CR/LDUAL	Dual	Moderada	6 a 18	R-C
Concreto	CR/LDUAL	Dual	Alta	6 a 18	R-C
Concreto y mampostería	CR/LFLSINF	Pórticos rellenos	Baja	1 a 4	R-C
Concreto y mampostería	CR/LFLSINF	Pórticos rellenos	Moderada	4 a 7	R-C
Concreto	CR/LFM	Pórticos de momento	Baja	1 a 4	R - C - I
Concreto	CR/LFM	Pórticos de momento	Media	1 a 4	R - C - I
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Media	1 a 5	R - C - I
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Alta	1 a 5	R - C - I
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Media	3 a 5	R - C
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Alta	3 a 5	R - C
Mampostería de concreto	MUR+CBH/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Media	1 a 5	R - C - I
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Alta	1 a 5	R - C - I
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Media	3 a 5	R - C
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Alta	3 a 5	R - C
Mampostería de ladrillo	MUR+CLBRS/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Adobe	MUR+ADO/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Bahareque	W+WWD/LWAL	Paredes	Baja	1 a 2	R
Madera	W+WLI/LWALL	Muros	Alta	1 a 2	R
Desconocido	MATO	Desconocido	Baja	1 a 2	R
Acero	S/LFM	Pórticos	Alta	1 a 3	C - I
Acero	S/LFBR	Arriostres	Alta	1 a 8	C - I
Acero	S/LFBR	Arriostres	Alta	8 a 18	C
Concreto	CR+PCPS/LFM	Pórticos de momento	Moderada	1 a 4	C - I
Concreto	CR+PCPS/LFM	Pórticos de momento	Alta	1 a 4	C - I

3 SANTIAGO DE CALI – COLOMBIA

3.1 Perfil de la ciudad

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

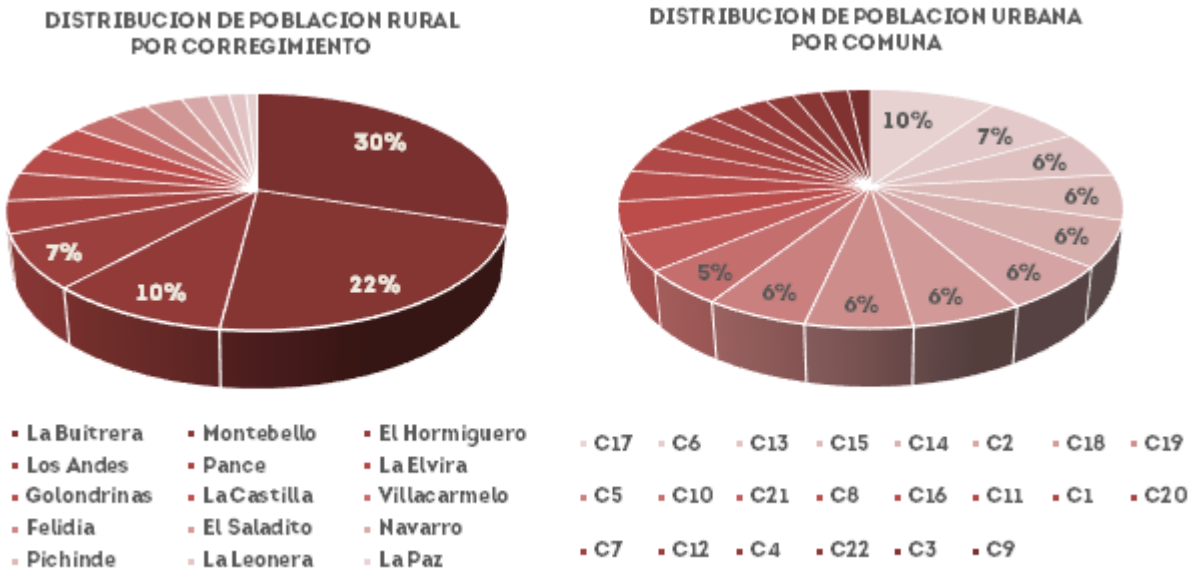


Figura 17. Distribución de la población urbana y rural en Cali. Fuente: (DANE 2018).

3.2 Estudios previos

Debido a la actividad sísmica en las décadas de los setentas y ochentas desde 1984 la ciudad de Cali ha implementado normativas constructivas para la disminución de la vulnerabilidad física de la ciudad (CCCSR-84). El estudio del riesgo mismo inicia con el Proyecto Integral para la Mitigación del Riesgo en Cali (OSSO, 1990), en el cual se describe el crecimiento demográfico de la ciudad y su distribución espacial y temporal en el medio urbano. También describe el límite urbano de la ciudad y presenta una segregación poblacional usando índices socioeconómicos con el fin de caracterizar su vulnerabilidad. El proyecto ayuda a incorporar las investigaciones de riesgo dentro la planificación y el ordenamiento del territorio (Lonzano y Gonzalez 1990; OSSO 1994). Posteriormente, en convenio entre la alcaldía, INGEOMINAS y la Corporación OSSO se realiza el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad (INGEOMINAS 2005), al igual que estudios preliminares para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo por sismo en Cali. Entre los esfuerzos más recientes se encuentra el modelo de exposición sísmica desarrollado por Acevedo (2015). Dicho modelo utilizó el área de construcción en planta de las edificaciones, estratos socioeconómicos y la estimación estadística del número de viviendas para determinar el número de edificaciones, ocupantes y costo de reposición para toda la ciudad. También identificó más de 50 tipologías constructivas y su distribución en barrios, clasificados por la altura predominante de la construcción (también llamadas zonas homogéneas). Por otro lado, la Alcaldía de la ciudad junto a la Corporación OSSO desarrollaron la Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo por sismos en la zona urbana de Santiago de Cali, primera etapa (OSSO, 2017). Aunque el estudio no abarca la totalidad de la ciudad, presenta un estudio de exposición detallado para una zona piloto de 290 hectáreas. El modelo incluye más de 4900 activos, identificados edificio por edificio utilizando la base de datos catastral de la ciudad, imágenes satelitales e inspecciones en sitio.

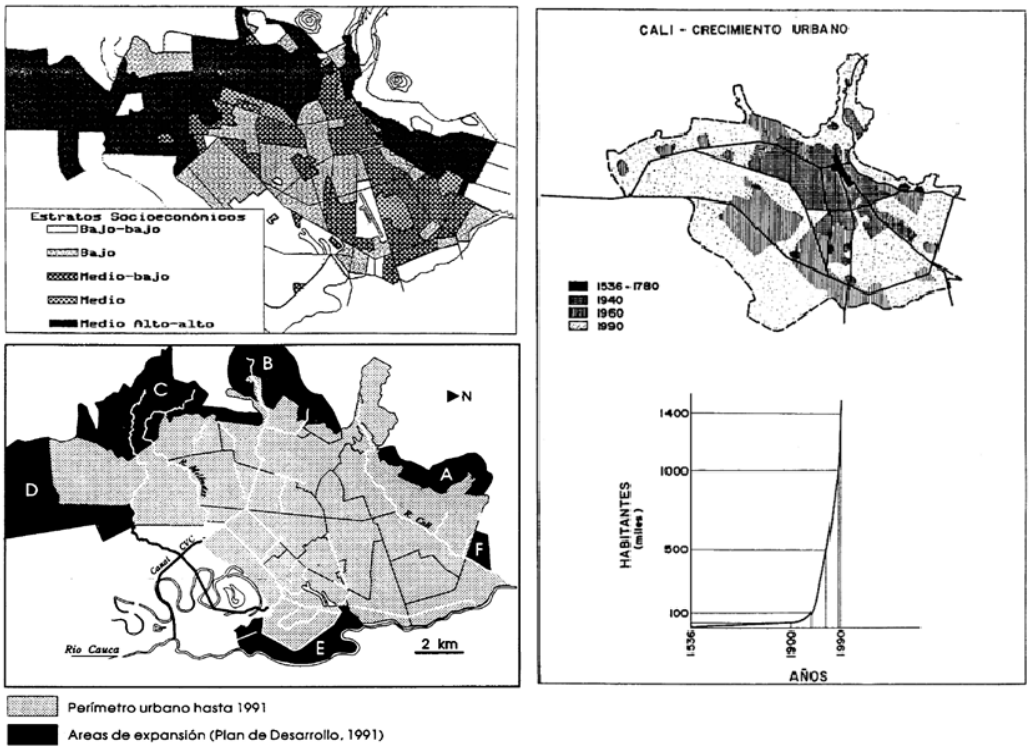


Figura 18. Mapas de crecimiento urbano en Santiago de Cali desde 1536 a 1990. Tomados de OSSO (1990), OSSO (1994).

3.3 Sistemas constructivos y su distribución

Los estudios mencionados previamente han identificado que la mampostería tiene un papel predominante en la construcción de la ciudad. Por ejemplo, de los 4937 edificios levantados en la primera etapa de la evaluación de riesgo para Cali (OSSO, 2017), cerca de un 68% corresponden a variantes de mampostería de bloques de concreto o ladrillo de sistema reforzado o confinado. Casi un 25% corresponden a sistemas informales altamente vulnerables como la mampostería de bloques semiconfinada, no reforzada o en adobe. El concreto reforzado registra cerca 6% la muestra, ampliamente utilizado en edificios de apartamentos, aunque también se registraron casos de casa independientes de prefabricado. Mientras que la construcción con materiales no clasificables o sin definición estructural, como el material de desecho, tiene la participación minoritaria de la muestra con menos del 1% de los edificios. Los datos de dicha muestra concuerdan significativamente con la distribución de la población total de viviendas. De acuerdo con el último censo de población y vivienda del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), al 2018 Cali contó más de 584 viviendas con una distribución por tipo y material en gran concordancia con lo encontrado en por la primera etapa de los estudios de riesgo de la ciudad.

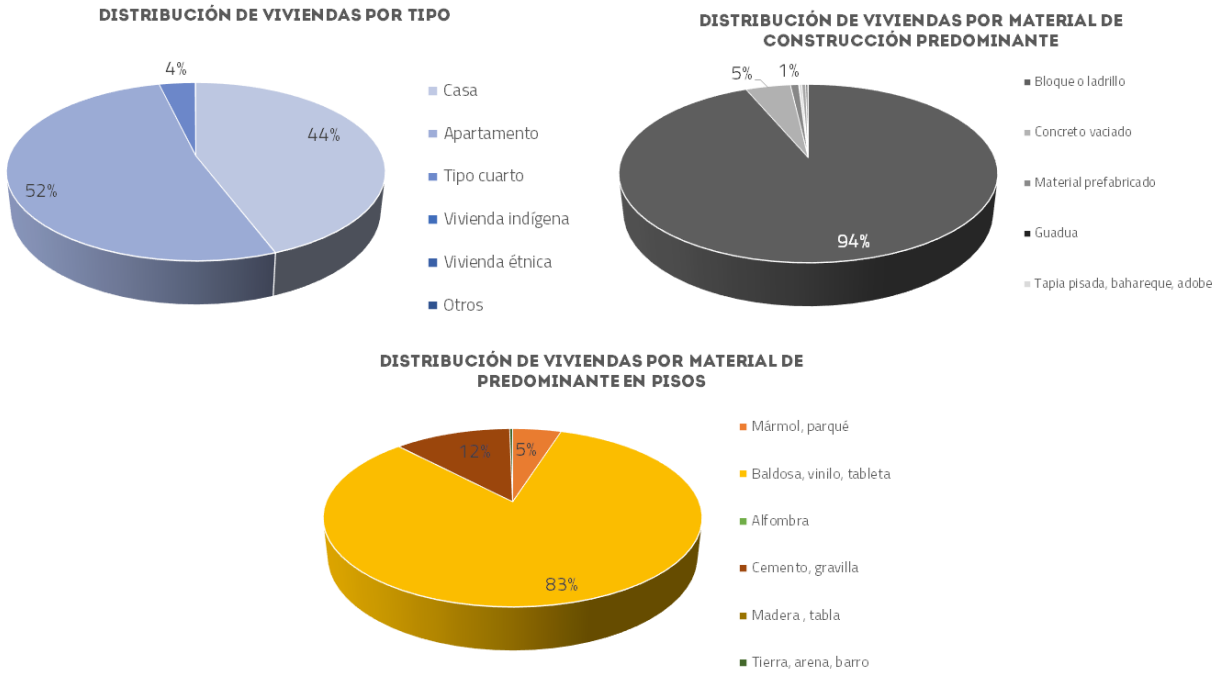


Figura 19. Distribución de las 580 mil viviendas en la ciudad de Cali por tipo, material de construcción predominante y material de pisos predominante. Fuente: Censo de Población y Vivienda de 2018 (DANE, 2018).

Mampostería confinada

Es la tipología predominante en la vivienda unifamiliar y se encuentra en configuraciones que abarcan diferentes tipos de calidades y alturas. El sistema-sismorresistente son muros con bloques de mampostería de concreto o arcilla, debidamente confinados por elementos de concreto reforzado, con una distribución en planta regular. Esta configuración está permitida por la normativa sismorresistente

colombiana (NSR-10) hasta una altura de dos pisos. En estas condiciones tiene un desempeño adecuado ante cargas sísmicas. Sin embargo, OSSO (2017) señala que son pocas las instancias en las que la normativa se cumple a cabalidad. En este tipo de configuración también se presenta la construcción incremental modular que puede agregar hasta 2 pisos adicionales generando irregularidad en planta. En dichas condiciones no se espera un comportamiento dúctil de este sistema constructivo.



Figura 20. Casas de mampostería confinada cumpliendo e incumpliendo la normativa NSR-10 en los barrios San Fernando y El Caney, respectivamente. Tomadas de: Google Maps (2020).

Mampostería reforzada

La mampostería reforzada es un sistema constructivo que no tiene confinamiento por elementos de concreto. El sistema sismo-resistente son muros de mampostería con celdas huecas en bloques de concreto o arcilla, las cuales se refuerzan con varillas de acero verticales, horizontales y concreto de relleno. Se encuentra en casa unifamiliares e independientes. La normativa sísmica colombiana permite edificaciones de más de dos pisos en esta configuración, por consiguiente, también se encuentra presente en edificaciones de apartamentos. Debido al detallado estructural y la distribución regular en planta y altura se puede esperar un buen desempeño ante agitaciones fuerte del terreno. De acuerdo con OSSO (2017) actualmente se utiliza más la variante de bloques de arcilla.

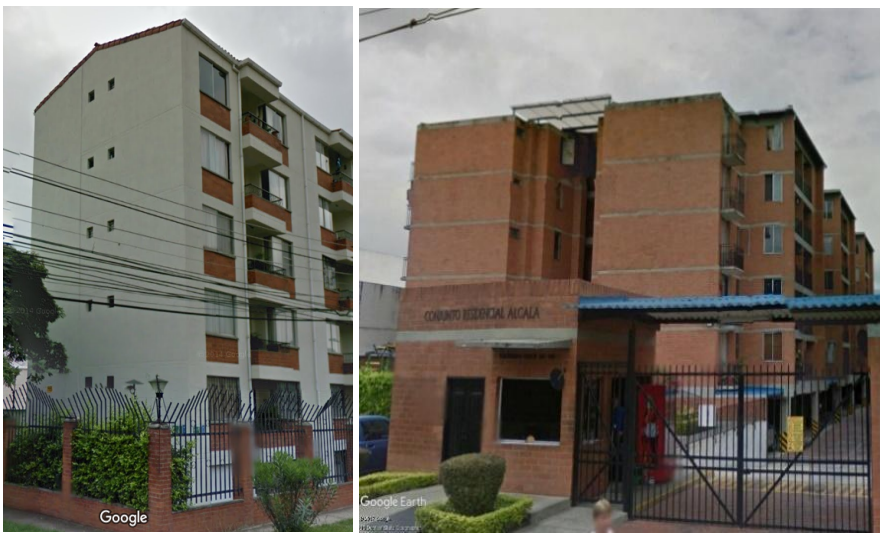


Figura 21. Fotografías de edificios en mampostería reforzada en el Barrio 12 de la zona homogénea 4-5 Oeste y el conjunto residencial Alcalá. Tomadas de Acevedo (2015) y OSSO (2017) respectivamente.

Mampostería semiconfinada

Tanto Acevedo (2015) como OSSO (2017) identificaron una cantidad significativa de viviendas unifamiliares e independientes son de mampostería de bloques de concreto y arcilla, confinada por elementos de concreto, que no cumplen con la normativa sismo-resistente. La mampostería resulta parcialmente confinada debido a que carece de una viga corona, tiene aberturas no permitidas o se construye en paños de más de 4 m de largo. El sistema-sismorresistente en este caso son muros de mampostería, que en algunos casos carece completamente de elementos confinantes de concreto o refuerzo de acero. Por la construcción incremental modular puede llegar a tener hasta 5 pisos de altura e irregularidades severas en altura. Se consideran tipologías estructurales altamente vulnerables y de baja ductilidad esperada.



Figura 22. Casas de mampostería semiconfinada, carentes de vigas de amarre y con muros excesivamente largos o en los barrios Lleras Camargo y El Jarillón respectivamente. Tomadas de: Google Maps (2020).

Mampostería de adobe

La mampostería de adobe no está permitida por la normativa sismo-resistente colombiana (NSR-10). Sin embargo, es un sistema constructivo que existe de forma minoritaria en viviendas independientes unifamiliares y edificaciones coloniales. El sistema sismo-resistente en este caso son muros cortos de adobe que se califican de baja ductilidad sin importar el tipo de configuración estructural y arquitectónica. La altura predominante de este tipo de unidades es de 2 pisos.



Figura 23. Casa en la calle La Escopeta e Iglesia de la Merced, hechas en mampostería de adobe. Fuente: OSSO (2017).

Concreto reforzado

En los sistemas constructivos de concreto reforzado las cargas laterales pueden ser soportadas por pórticos resistentes a momentos, muros de cortante y sistemas duales (NSR-10). Tanto Acevedo (2015) como OSSO (2017) identificaron los tres sistemas presentes la ciudad de Cali. El concreto reforzado se usa para construcciones de gran tamaño, de uso comercial y residencial. Los pórticos resistentes a momento son colados en sitio. Hay una variante del sistema de pórticos no permitida por la normativa sismorresistente que no tiene viga de amarre, y las cargas se transmiten a las columnas por losa plana y viguetas. De estas configuraciones no se espera un comportamiento dúctil. Cuando los pórticos son debidamente construidos con todos sus elementos se espera un mejor desempeño ante cargas laterales. Los sistemas de muros y duales se emplean en edificaciones de gran altura debido a que controlan satisfactoriamente la deriva de la estructura. Debido a la formalidad en el diseño y la construcción de estas edificaciones se califican en tipologías de ductilidad alta.



Figura 24. Edificios de muros colados en sitio y prefabricados de concreto reforzado en el Barrio Buenos Aires y Torres Comfandi. Tomados de Google Maps (2020) y OSSO (2017).

Estructuras de acero

Hay sistemas constructivos modernos en acero utilizados predominantemente para uso comercial y industrial en Cali. De acuerdo con OSSO (2017), en la ciudad el acero se usa en dos sistemas sismo-resistentes: pórticos resistentes a momentos y pórticos arriostrados diagonalmente para aumentar la rigidez lateral. La primera se emplea en edificaciones de baja altura como naves industriales. La segunda en edificios de varios pisos. Dada la edad y la formalidad de estas construcciones se estima que el detallado de las conexiones y la soldadura cumple con la normativa sismo-resistente. Las tipologías constructivas en acero se clasifican con una ductilidad moderada y alta.



Figura 25. Bodega en la calle 32 y edificio en el barrio Centenario construidos en pórticos de acero arriostrados. Tomados de OSSO (2017).

Construcción informal

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



Figura 26. Distribución de asentamientos informales en Cali y viviendas informales en diferentes materiales. Tomados de Torres-Tovar (2009) y Google Maps (2020).

3.4 Niveles de ductilidad

En la identificación de las tipologías se utilizará como factor principal el nivel de formalidad en la construcción para definir el desempeño sísmico de una edificación. Estructuras sin prueba de tenencia, que no aparezcan en bases oficiales de catastro y de permisos o sin evidencia visual de diseño e inspección por parte de un ingeniero, se asumirán dentro en esta investigación como construcciones informales. La construcción informal se clasificará con una ductilidad esperada baja. En los casos en los que el material constructivo, la configuración estructural o la edad de la edificación lo permitan se podrán clasificar con ductilidad moderada. Por otro lado, debido la existencia de normativa sismo resistente en Colombia desde mediados de los años ochenta, se asumirá que la construcción formal en la ciudad de Cali tiene las provisiones adecuadas para mostrar una ductilidad moderada o alta. Las edificaciones formales construidas entre 1985 y 2000 sin intervenciones de reforzamiento se considerarán como moderadamente dúctiles. Estructuras construidas usando la normativa existente en los últimos 20 años se considerará con una ductilidad alta.

3.5 Tipologías estructurales

Dada la combinación de materiales, sistemas constructivos, número de pisos y niveles de diseño se definieron 52 tipologías estructurales para la ciudad de Cali. La siguiente tabla resume los cuatro principales atributos que definen cada tipología: el material de construcción, sistema sismo-resistente (LLRS), el nivel de ductilidad esperado y el número de pisos (de forma agregada). Cada una tiene código

o taxonomía de identificación única asignado según los lineamientos establecidos por Brzev et al. (2013). También cuentan con un indicador de su uso según sea una tipología empleada para uso residencial (R), comercial (C) o industrial (I).

Tabla 2. Lista de tipologías constructivas para la ciudad de Cali.

Material	Taxonomía	LLRS	Ductilidad	Pisos	Uso
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Baja	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Moderada	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Alta	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Moderada	4 a 7	R - C
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Baja	8 a 18	R - C
Concreto	CR/LDUAL	Dual	Moderada	8 a 18	R - C
Concreto	CR/LDUAL	Dual	Alta	8 a 18	R - C
Concreto	CR/LFM	Pórticos de momento	Baja	1 a 4	R - C - I
Concreto	CR/LFM	Pórticos de momento	Media	1 a 4	R - C - I
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Media	1 a 5	R - C
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Alta	1 a 5	R - C
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Media	3 a 5	R - C
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Alta	3 a 5	R - C
Mampostería de concreto	MUR+CBH/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R - C - I
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Media	1 a 5	R - C - I
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Alta	1 a 5	R - C
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Media	3 a 5	R - C
Mampostería de ladrillo	MCF+CLBRS/LWAL	Muros	Alta	3 a 5	R - C
Mampostería de ladrillo	MUR+CLBRS/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Adobe	MUR+ADO/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Bahareque	W+WWD/LWAL	Paredes	Baja	1 a 2	R
Madera	W+WLI/LWALL	Muros	Alta	1 a 2	R
Desconocido	MATO	Desconocido	Baja	1 a 2	R
Acero	S/LFM	Pórticos	Alta	1 a 3	C - I
Acero	S/LFBR	Arriostres	Alta	1 a 8	C - I
Acero	S/LFBR	Arriostres	Alta	8 a 18	C
Concreto	CR+PCPS/LFM	Pórticos de momento	Moderada	1 a 4	C - I
Concreto	CR+PCPS/LFM	Pórticos de momento	Alta	1 a 4	C - I

4 SANTIAGO DE LOS CABALLEROS – REPÚBLICA DOMINICANA

4.1 Perfil de la ciudad

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

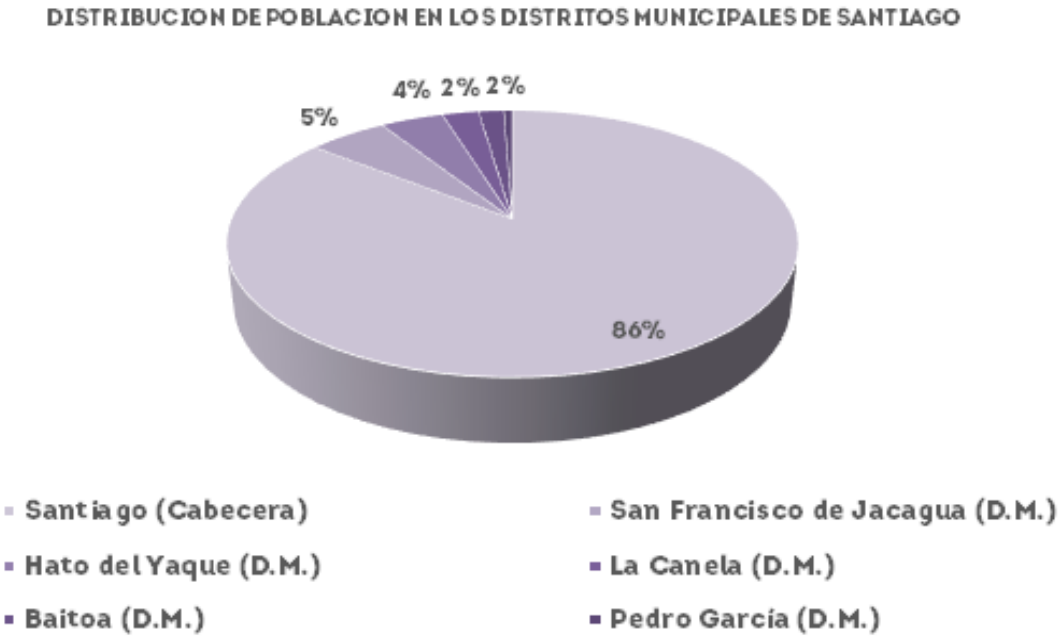


Figura 27. Distribución poblacional en el municipio de Santiago de los Caballeros. Fuente: ONE, (2011).

Santiago tiene importantes indicadores de vulnerabilidad social y territorial (OMOT 2017). Existen grandes contrastes en material de vivienda y marcada segregación social. En respuesta el ayuntamiento de la ciudad ha hecho grandes esfuerzos por fortalecer el ordenamiento territorial y la mitigación del riesgo ante desastres.

4.2 Estudios previos en la ciudad

La caracterización física de Santiago para la evaluación del riesgo catastrófico se ha dado de forma progresiva. Una de las primeras iniciativas surge del Programa de Prevención y Gestión del Riesgo, organizado por la Dirección General de Ordenamiento Territorial (DGODT) y el Ministerio de Economía Planificación y Desarrollo (MEPyD). En el documento de Amenazas y Riesgos Naturales de la República Dominicana (DGODT 2009) se presenta un estudio de exposición de la ciudad que incluye la ubicación geográfica, la tipología constructiva, el valor económico y el tipo de ocupación en los activos expuestos de la ciudad. Los insumos principales de la investigación fueron los datos de censo de población y vivienda disponibles y la base de datos del catastro municipal. Las edificaciones se clasificaron en diferentes tipologías constructivas utilizando atributos cuantitativos como el material de construcción y el número de pisos de las edificaciones. También emplearon atributos cualitativos como la calidad constructiva y la clase socioeconómica de los ocupantes. Entre los hallazgos más relevantes en lo referente caracterización constructiva se puede mencionar que predominan los edificios de baja altura, de 1 a 3 pisos en mampostería de calidad baja y moderada.

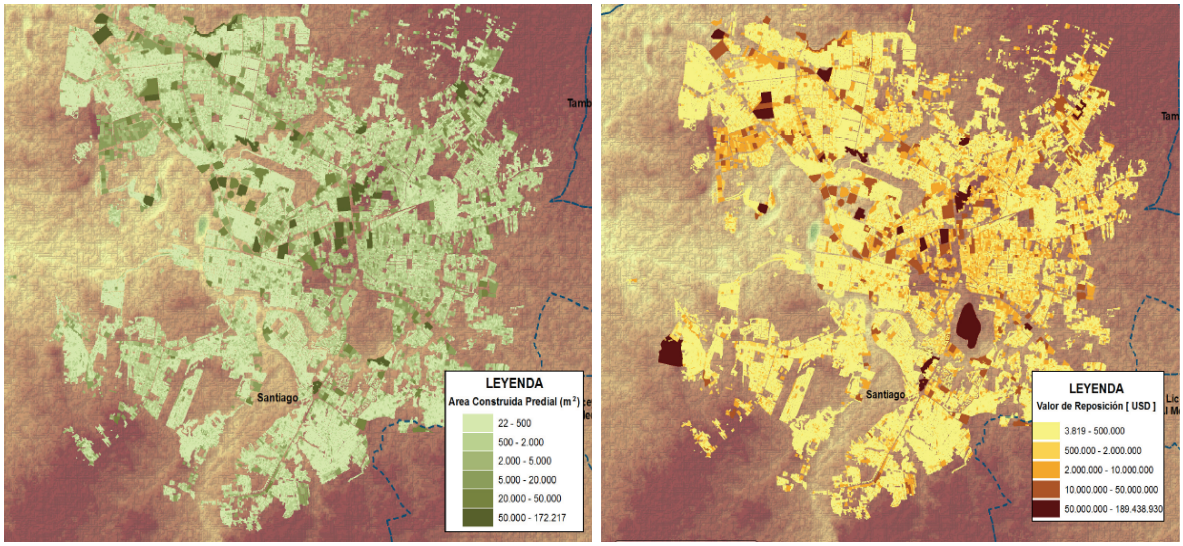


Figura 28. Área total construida y estimación de su valor económico de la Ciudad de Santiago. Tomados de DGODT (2009).

Con una valoración del riesgo catastrófico surgen varias propuestas para mitigar la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia de Santiago, alineadas con el ordenamiento y la gestión del territorio. El mejor ejemplo son los estudios base para Santiago de los Caballeros (BID 2015, BID 2016). Estos generaron un diagnóstico detallado de la exposición, la vulnerabilidad y la amenaza ante sismos, huracanes e inundaciones. Posteriormente el Plan Municipal de Ordenamiento Territorial 2018-2030 (OMOT 2017) y la Estrategia de Resiliencia de Santiago (Fundación Rockefeller 2018) se apoyan en los resultados para definir políticas de sostenibilidad ambiental y urbana. En lo que respecta al riesgo por terremotos, estos estudios reconocen 6 clases constructivas predominantes en la ciudad de diferentes calidades. En la baja calidad se mencionan los edificios de madera de 1 piso y la mampostería sin refuerzo. En la calidad moderada y alta se listan los pórticos de concreto reforzado de 1 a 3 pisos y de 4 a 7 pisos, al igual que la mampostería en esos mismos rangos de altura. Desde entonces se reconoce que la mancha urbana de Santiago ha crecido de forma dispersa y con cantidad significativa de construcciones

informales, exacerbando la vulnerabilidad física de la ciudad. De acuerdo con el Consejo de Desarrollo Estratégico de Santiago, alrededor de 20% de las viviendas de la ciudad están en asentamientos informales, con un 34% calificadas en el perfil socioeconómico más bajo. De los 60 mil hogares pobres en el municipio, más del 80% están dentro del perímetro urbano (BID 2015).

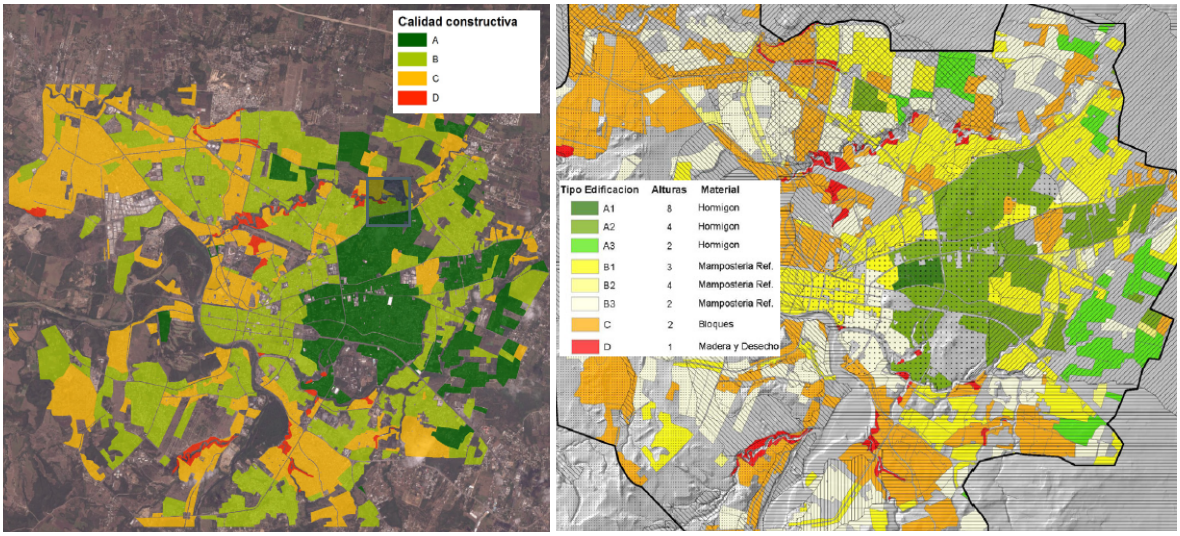


Figura 29. Distribución de la calidad y los sistemas constructivos por material y números de pisos en Santiago (ICES 2015).

4.3 Sistemas constructivos y su distribución

Con base a los resultados obtenidos por estudios antes mencionados y el censo de población y vivienda de la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE) es posible identificar los sistemas constructivos predominantes en la ciudad de Santiago, con el objetivo final de realizar un modelo de exposición a escala urbana. De acuerdo con las estadísticas de vivienda en el 2011 casi el 90% sector residencial de Santiago de los Caballeros estaba compuesto por casas individuales (74%) y viviendas en apartamentos (14%). El material predominante de la construcción urbana es la mampostería de bloques de concreto y el concreto reforzado (82%), con la madera (17%) y la tabla de palma (1%) ocupando el segundo y tercer lugar. Según la información más actualizada del muestreo realizado para la encuesta nacional de hogares (ENAHO, 2018), se espera que el número de viviendas en apartamentos sea ligeramente mayor en la actualidad (19%), mientras que en lo referente al material constructivo la mampostería y el concreto siguen jugando el mismo papel predominante.

La mampostería, a pesar de ser un material duradero y resistente a las condiciones hidrometeorológicas adversas del Caribe, puede ser especialmente vulnerable a las agitaciones del terreno si no obedece técnicas constructivas específicas. El alto porcentaje de informalidad en la construcción y la tardía implementación de un código sísmico en la República Dominicana son fuertes indicadores de que el sector residencial en Santiago puede tener una alta vulnerabilidad ante los terremotos. A continuación, se provee una descripción detallada de los principales sistemas constructivos de la ciudad basada en los estudios previamente mencionados.

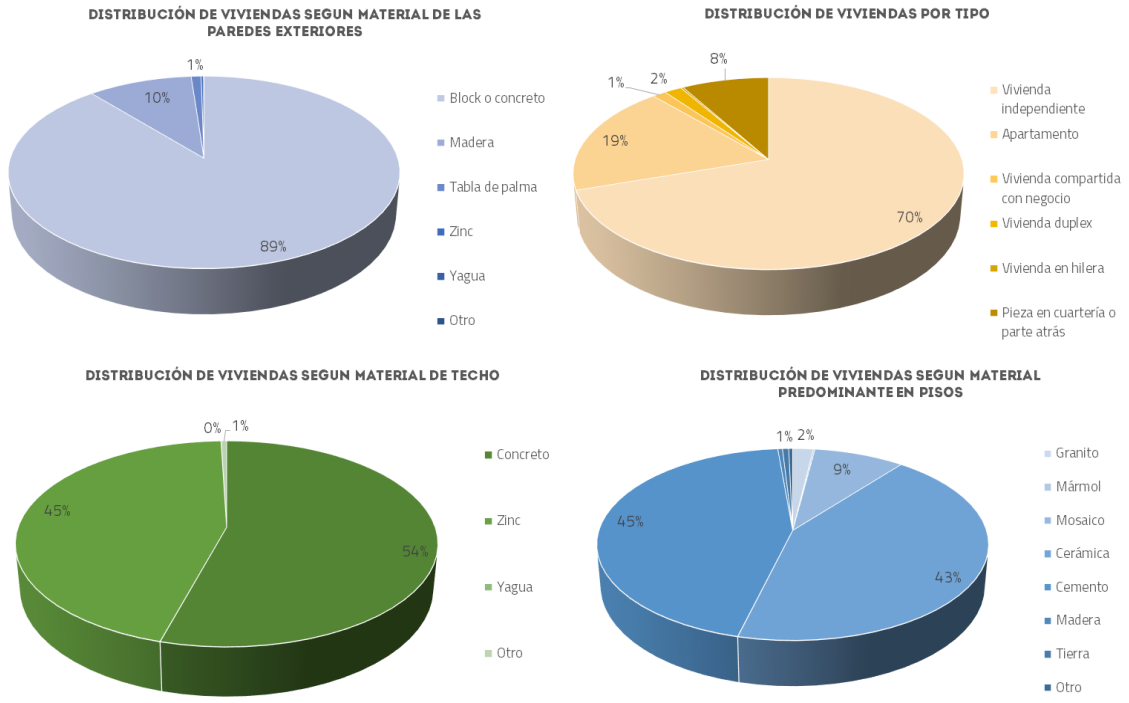


Figura 30. Distribución de viviendas por tipo y material de construcción en paredes, techos y pisos según el último muestreo en la provincia de Santiago (ONE 2018).

Mampostería Reforzada

La mampostería en bloques de concreto tiene un papel protagónico en la construcción en Santiago. El bloque de concreto puede reforzarse con varillas de acero, de forma que la mampostería toma un papel de elemento estructural. La presencia del acero otorga a este tipo de construcciones un comportamiento dúctil y resistente a cargas cíclicas. Dependiendo de la técnica constructiva y la normativa aplicada, la mampostería reforzada puede exhibir deformabilidad sin pérdida considerable de capacidad soportante, lo que en ingeniería se conoce como ductilidad. De acuerdo con los decretos R-001 y R-027 de la República Dominicana (MOPC 2007, SEOPC 2007) la mampostería estructural no debe exceder 6 pisos de altura. Según los resultados del modelo de exposición del Plan de Acción de Santiago (BID 2015), la mampostería reforzada efectivamente se presenta en la forma de casas individuales y apartamentos con alturas de 2 a 4 pisos en diversas zonas de la ciudad, siendo una de las tipologías más utilizadas en para viviendas de clase económico-social de clase media y alta.

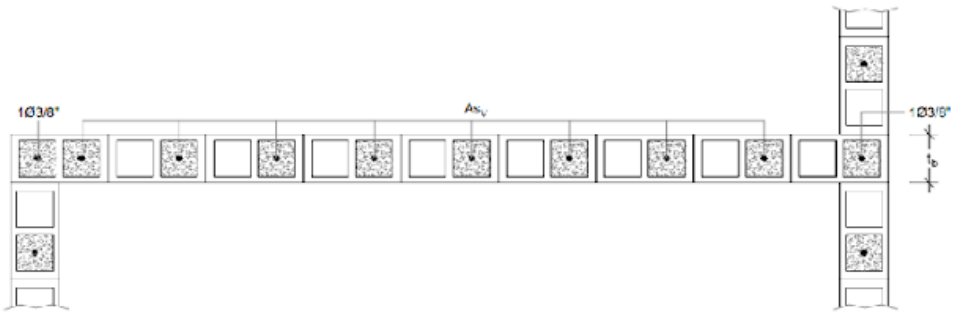


Figura 31. Detalle de mampostería reforzada según la normativa sísmica dominicana. Fuentel R-027.

Mampostería Confinada

La mampostería confinada tiene varios tipos de configuración. En la más resistente, las paredes de mampostería están ligados a un pórtico de concreto reforzado por medio de mortero y varillas de acero. El decreto R-001 (MOPC 2007) llama a esta configuración como mampostería con muros de bloques confinados. Sin embargo, es común que no se coloque el acero de refuerzo. Por tanto, las paredes de mampostería no cumplen un papel estructural. En estos casos, los pórticos confinantes son el sistema estructural sismo-resistente principal. Los mismos están conformados por columnas y vigas de concreto con acero longitudinal (varillas) y de confinamiento (estribos). Como las paredes están ligadas al pórtico únicamente por el mortero de pega, ambos elementos no actúan en conjunto como un sistema dual o mixto. Esto aumenta la posibilidad de daño en las paredes debido a sacudidas fuertes del terreno. Al igual que la mampostería reforzada, esta topología se presenta en casas individuales y apartamentos en los mismos rangos de altura y es utilizada para viviendas de clase baja y media.



Figura 32. Casa de mampostería en estratos socioeconómicos medio y altos en Santiago. Tomadas de Google Maps (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).

Bloques o Mampostería Sin Refuerzo

La mampostería sin refuerzo, llamada también como tipología de bloques, es ampliamente utilizada en las construcciones de escasos recursos económicos por ser un material duradero y resistente a la intemperie. Sin embargo, los muros carecen de refuerzo en acero y mantienen su forma debido a que los bloques están pegados con mortero. Debido a su peso y baja capacidad de deformabilidad es una de las tipologías más vulnerables a los eventos sísmicos. Según estudio de riesgo previos (DGOT 2009, BID 2016) esta tipología es ampliamente utilizada en las zonas marginales y de baja densidad (i.e. regiones con casas individuales de uno o dos pisos). Se encuentra distribuida en toda la ciudad, en zonas con niveles socioeconómicos bajos y precarios.



Figura 33. Casa de mampostería sin confinamiento ni refuerzo visible en el proceso constructivo. Tomadas de Google Maps (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).

Concreto Reforzado

El concreto reforzado también presenta diversas tipologías constructivas. Puede encontrarse en sistemas de pórticos, donde las vigas y las columnas de concreto son el sistema principal de sismoresistencia. También puede darse en sistemas mixtos, donde la combinación de pórticos y muros de concreto reforzado soportan las cargas sísmicas. Estas tipologías están ampliamente descritas y normadas por los decretos R-001 (MOPC 2007) y R-033 (MOPC 2012). El concreto reforzado se usa en configuraciones arquitectónicas regulares y de gran altura. Por tanto, los edificios multifamiliares, apartamentos y condominios en el centro y al este de la ciudad.



Figura 34. Construcción de la Torre Monumental en concreto reforzado, junto con otros edificios de altura en Santiago de los Caballeros. Fuente: dominicana.do (2020) y el Plan de Acción de Santiago (BID 2015).

Construcción Informal

La construcción informal en Santiago está dispersa en toda la ciudad. Las viviendas de menor calidad se encuentran en asentamientos informales que se han formado en las riberas del río, en cañadas, barracones y rellenos sanitarios. Consecuentemente son especialmente vulnerables ante

inundaciones, deslizamientos y tormentas tropicales. De acuerdo con un levantamiento realizado por la Defensa Civil y la Cruz Roja, hay más de 3,500 familias en asentamiento informales gravemente expuestos a desastres, con otras 2000 en lugares de moderadamente expuestos (DEMUCA 2009). Dentro de los barrios que mostraron alta vulnerabilidad sísmica se encuentran Los Jardines, Reparto Oquet, La Lotería, Ingenio Arriba, Ingenio Abajo, Hoya de Caimito, Yapur Dumit, El Dorado y Urbanización Fernando Valerio. El Plan de Ordenamiento Territorial (OMOT 2017) también señala la ubicación más actualizada de los asentamientos de mayor vulnerabilidad social de la ciudad. La mayoría se encuentran dentro de las zonas inundables del río Yaque. La construcción informal en las zonas de mayor marginación social varía desde casas de madera, fibra natural o material de desecho. Son edificaciones de baja altura construidas en materiales livianos sin ningún tipo de provisión sismo-resistente (BID 2015). También se da la construcción informal en terrenos invadidos o en barrios no aprobados, en mampostería no reforzada de 1 o 2 pisos. En los casos en que se usa refuerzo no se siguen estrictamente los lineamientos establecidos en la normativa sísmica dominicana. Por consiguiente, independientemente del material y sistema constructivo, estas construcciones se consideran de baja ductilidad y vulnerables ante agitaciones fuertes del terreno.

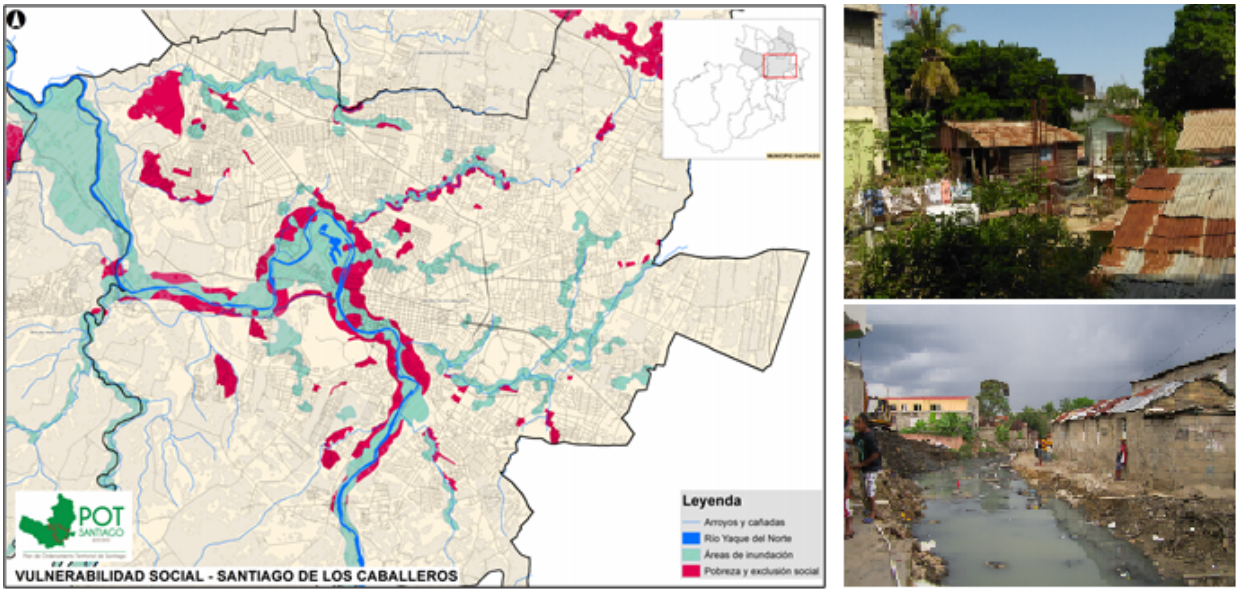


Figura 35. Distribución de las zonas de alta pobreza y exclusión social en la zona urbana de Santiago. Fuentel Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago (OMOT 2017).

4.4 Niveles de ductilidad

En la identificación de las tipologías se utilizará como factor principal el nivel de formalidad en la construcción para definir el desempeño sísmico de una edificación. Estructuras sin prueba de tenencia, que no aparezcan en bases oficiales de catastro y de permisos o sin evidencia visual de diseño e inspección por parte de un ingeniero, se asumirán dentro en esta investigación como construcciones informales. La construcción informal se clasificará con una ductilidad esperada baja. En los casos en los que el material constructivo, la configuración estructural o la edad de la edificación lo permitan se podrán clasificar con ductilidad moderada. Por otro lado, debido la existencia de normativa sismo resistente en Colombia desde mediados de los años ochenta, se asumirá que la construcción formal en

la ciudad de Cali tiene las provisiones adecuadas para mostrar una ductilidad moderada o alta. Las edificaciones formales construidas entre 1985 y 2000 sin intervenciones de reforzamiento se considerarán como moderadamente dúctiles. Estructuras construidas usando la normativa existente en los últimos 20 años se considerará con una ductilidad alta.

4.5 Tipologías estructurales

Basándose en los estudios previos, información municipal, la normativa R-001, estadísticas de la Oficina Nacional de Censos y los planes de ordenamiento territorial se han podido identificar al menos 42 tipologías estructurales para la ciudad de Santiago. La tabla siguiente resume los materiales constructivos, sistemas sismo-resistentes, niveles de ductilidad esperados, rango de alturas y uso típico de dichas clases constructivas, así como el código de taxonomía según Brzev et al. (2013).

Tabla 3. Lista de tipologías constructivas de la ciudad de Santiago de los Caballeros, República Dominicana.

Material	Taxonomía	LLRS	Ductilidad	Pisos	Uso
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Baja	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Moderada	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Alta	1 a 4	R - C - I
Concreto y mampostería	CR/LFINF	Pórticos rellenos	Moderada	4 a 7	R-C
Concreto	CR/LDUAL	Dual	Moderada	6 a 18	R-C
Concreto	CR/LDUAL	Dual	Alta	6 a 18	R-C
Concreto	CR/LFM	Pórticos de momento	Baja	1 a 2	R - C - I
Concreto	CR/LFM	Pórticos de momento	Media	1 a 2	R - C - I
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Media	1 a 3	R - C
Mampostería de concreto	MCF+CBH/LWAL	Muros	Alta	1 a 3	R - C
Mampostería de concreto	MUR+CBH/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Adobe	MUR+ADO/LWAL	Muros	Baja	1 a 3	R
Bahareque	W+WWD/LWAL	Paredes	Baja	1 a 2	R
Madera	W+WLI/LWALL	Muros	Alta	1 a 2	R
Desconocido	MATO	Desconocido	Baja	1 a 2	R
Acero	S/LFM	Pórticos	Alta	1 a 3	C - I
Material	Taxonomia	LLRS	Ductilidad	Pisos	Uso
Acero	S/LFBR	Arriostres	Alta	1 a 8	C - I
Acero	S/LFBR	Arriostres	Alta	8 a 18	C
Concreto	CR+PCPS/LFM	Pórticos de momento	Moderada	1 a 4	C - I
Concreto	CR+PCPS/LFM	Pórticos de momento	Alta	1 a 4	C - I

5 REFERENCIAS

Acevedo A (2015). Development of Exposure Models for Bogotá D.C. And Metropolitan Area Of Cali (Colombia) – South American Project. Research Report. Universidad Eafit, Colombia.

Acevedo A, Yepes C, Silva V, Osorio F, Villar M. Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia. Natural Hazards, vol. 86 (2017) pp. 31-54.

Ayala C, Chicaiza M, Sosa D (2015). Modelo de exposición y costo de reposición del área urbana del distrito metropolitano de Quito (D.M.Q.). Informe Técnico. South América Risk Assessment Project (SARA). Quito, Ecuador

Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2015). Plan de Acción de Santiago. Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Fuente issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles

Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2016). Estudios Base para Santiago de los Caballeros. Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Fuente issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles

Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). GEM Building Taxonomy Version 2.0. GEM Technical Report, 02, 188. https://doi.org/doi: 10.13117/GEM.EXP-MOD.TR2013.02.

Calderon A, Silva V, Aviléz M, Méndez R, Castillo R, Gil J C, Lopez M A (2020). Towards a Uniform Earthquake Loss Model across Central America, Earthquake Spectra, in review.

Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., & Ayala, C. (2018). Seismic Vulnerability of Quito Ecuador, Phase 1: Capacity Curves of Structural Typologies, Project Gem -Sara. Revest Puce, 0(106), 43–80.

Chatelain, J. L., Tucker, B., Guillier, B., Kaneko, F., Yepes, H., Fernández, J., Valverde, J., Hoefer, G., Souris, M., Duperier, E., Yamada, T., Bustamante, G., Villacis, C. 1999. Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador, GeoJournal 49, 185– 196. Available at http://link.springer.com/article/10.1023/A:1007079403225

Corporación OSSO. (2005). Desastres por inundaciones y deslizamientos: aproximación a algunos procesos causales. Fuente: www.osso. org.co/docu/tesis/2005/elementos/Desastres_ algunos-procesos-causales.pdf

Días N (1999). Colombia: el impacto de sus terremotos a lo largo de su historia. Revista FASECOLDA. Dirección de la Cámara Técnica de Incendio y Terremoto.

Dirección General de Ordenamiento y Desarrollo Territorial - DGODT (2009). Amenazas y Riesgos Naturales en República Dominicana. Compendio de Mapas. Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo.

EPN-IMQ-OYO Corporation-Geo-Hazards International-Orstom 1995. Proyecto para el Manejo del Riesgo Sísmico de Quito. Escuela Politécnica Nacional, GeoHazards International.

Faulser-Piggot R, Bevington J, Vicini A (2014). End-to-end demonstration of the Inventory Data Capture Tools. GEM Technical Report. Earthquake Model Foundation. Pavia, Italy

Fundación Rockefeller (2017). Estrategia de Resiliencia – Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador. Fuente www.100resilientcities.org/strategies/quito/

Fundación Rockefeller (2018). Estrategia de Resiliencia – Santiago de los Caballeros. Santiago de los Caballeros, República Dominicana. Fuente www.100resilientcities.org/strategies/santiago-de-los-caballeros/

Fundación DEMUCA (2009). Estudio Socio-Económico para el Ordenamiento Territorial del Municipio de Santiago. Santo Domingo, R.D. Fuente https://santiagodeloscaballeros.gob.do/servicios/servicios-oficina-de-planeamiento-urbano/

Gómez A, Cuvi N (2016). Asentamientos informales y medio ambiente en Quito. Revista Internacional de Ciencias Sociales, No. 35. Historia ambiental en Europa y América Latina: miradas cruzadas (pp. 101-119).

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

Hazus 99, (1999), "Earthquake loss estimation methodology", Federal Emergency Management Agency FEMA and National Institute of Building Sciences NIBS Vol 5, Chapter 5, Washington DC.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador – INEC (2010). Censo Nacional de Estadísticas y Censos de 2011. Fuente www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/

Lonzano M, Gonzalez A (1990). La prevención y atención de desastres en el plan de desarrollo de Cali. Departamento Administrativo de Planeación Municipal, Cali.

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones - MOPC (2007). Reglamento para el Análisis y Diseño Sísmico de Estructuras R-001. Fuente www.mopc.gob.do/media/1039/r-001-reglamento-sismico.pdf

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones - MOPC (2012). Reglamento para Diseño y Construcción de Estructuras en Hormigón Armado R-033. Fuente www.mopc.gob.do/media/1972/r-033.pdf

Oficina Municipal de Ordenamiento Territorial (2017). Plan de Municipal de Ordenamiento Territorial de Santiago 2018-2030. Municipalidad de Santiago de los Caballeros.

Oficina Nacional de Estadísticas y Censos (2002). Perfil Estadístico de la Provincia de Santiago. Fuente https://www.one.gob.do/provinciales-y-municipales.

Oficina Nacional de Estadísticas y Censos (2011). Censo de población y vivienda del 2010. Fuente https://www.one.gob.do/provinciales-y-municipales.

Oficina Nacional de Estadísticas y Censos (2020). Proyecciones Demográficas Provinciales y Municipales. Fuente https://www.one.gob.do/demograficas/proyecciones-de-poblacion

Rivas y Chávez (2016).

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

Secretaria de Territorio, Hábitat y Vivienda del Ecuador (2011). Plan de Ordenamiento Territorial de Quito 2012 -2022. Quito, Ecuador. Fuente www.quito.gob.ec/documents

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

Torres-Tovar C (2009). Ciudad informal colombiana. Barrios construidos por la gente. Procesos Urbanos en Hábitat, Vivienda e Informalidad. Universidad Nacional de Colombia.

Valcárcel, J., Burton, C., & Villacis, C. (2016). Report on the Workshop for the participatory evaluation of earthquake risk and resilience in Quito, Ecuador.

Velásquez A, Hansjürgen M. Geología en la Planificación Urbana de Cali (1994). Corporación OSSO, Ciudad de Cali, Colombia.

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

Yepes-Estrada C, Silva V, Valcárcel J, Acevedo A, Tarque N, Hube M, Coronel G, María (2017). Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment. Earthquake Spectra, 33(1), 299–322. https://doi.org/10.1193/101915EQS155DP.

Yépez, M. F. 2001. Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación, in Proceedings Gestión de riesgos y prevención de desastres, 24–25 January 2001, Quito, Ecuador.