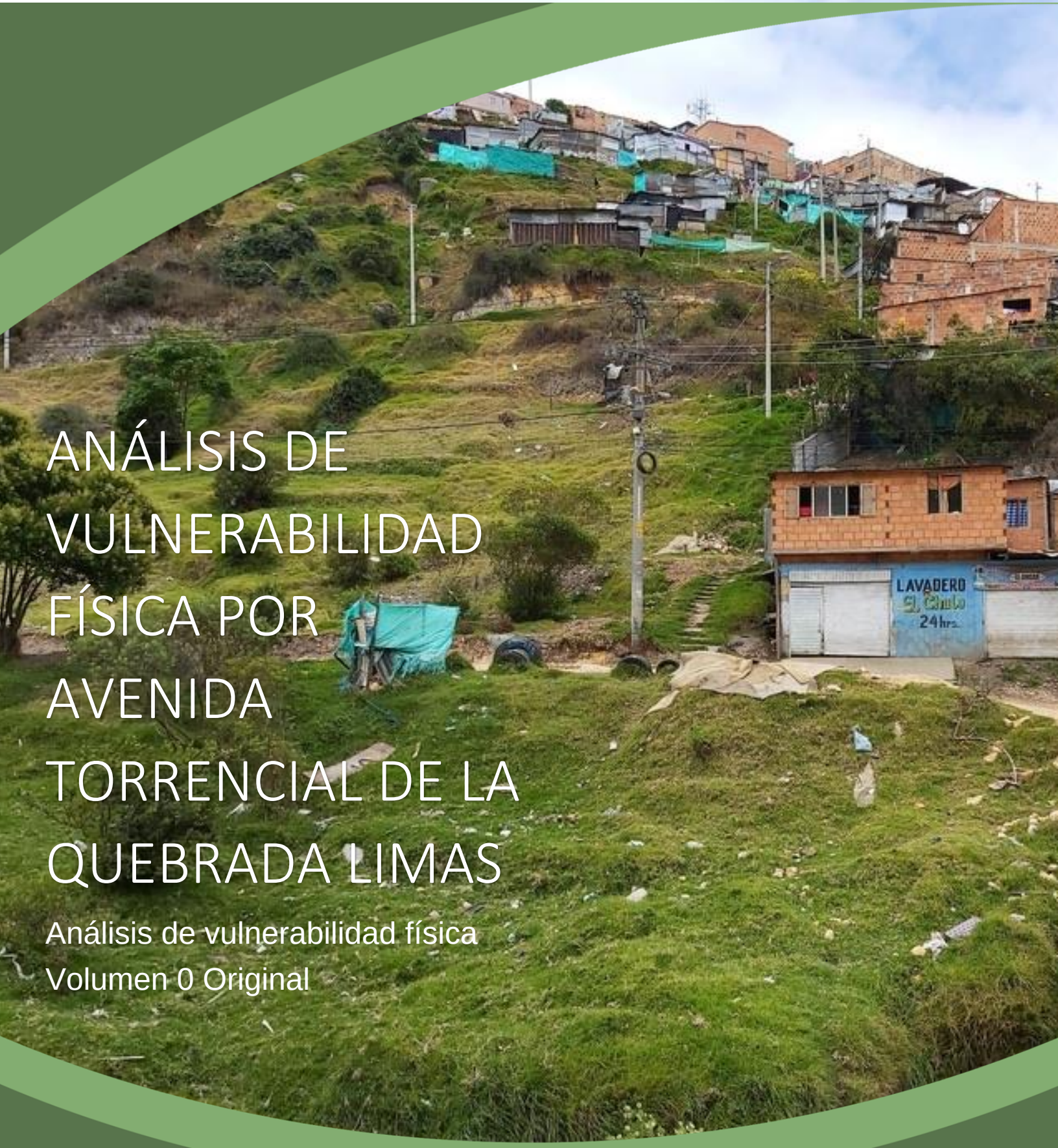



# ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD FÍSICA POR AVENIDA TORRENCIAL DE LA QUEBRADA LIMAS

Análisis de vulnerabilidad física
Volumen 0 Original

Subdirección de Análisis de Riesgos y Efectos del Cambio Climático
BOGOTÁ, COLOMBIA, DICIEMBRE 2021

**INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO**

**IDIGER**


**Director**
**Ing. Guillermo Escobar**
**Responsable de la Subdirección de Análisis de Riesgos y Efectos del Cambio Climático**
**Ing. Pilar García.**



© Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER


Diagonal 47 No. 77 B-09 Interior 11
www.idiger.gov.co
Bogotá - Colombia



**Autores**
María Carolina Rogelis Prada
Ingeniera Civil, Meng, MSc, PhD

**Coordinación y supervisión**
Diana Carolina Moreno
Ingeniera Civil, MSc
Carolina Castañeda Jiménez
Ingeniera Civil, MSc
Cesar Peña
Geólogo, MSc



**Agradecimientos**
Agradecemos a la Empresa de Acueducto de Bogotá por proporcionar sus datos hidrológicos en la zona de estudio y al Instituto Geográfico Agustín Codazzi por proporcionar las imágenes satelitales y fotografías aéreas del área de estudio.



Borrador V 1

## CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 6
2 ALCANCE Y LIMITACIONES 6
3 METODOLOGÍA 8
**3.1 Definiciones 8**
**3.2 Metodología general aplicada y datos 11**
4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXISTENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LIMAS 15
**4.1 Características generales de las construcciones 15**
**4.2 Características de la ocupación urbana en la cuenca de la Quebrada Limas 16**
**4.3 Asignación de sistema estructural y tipología 24**
**4.4 Valor de las construcciones de tipo residencial 26**
**4.5 Población 28**
**4.6 Archivo shape de tipología estructural, valor de elementos y población 29**
5 VULNERABILIDAD 30
**5.1 Curvas de vulnerabilidad 30**
**5.2 Vulnerabilidad de las personas 34**
**5.3 Indicadores 35**
6 VULNERABILIDAD FÍSICA EN LA ZONA INUNDABLE 49
7 CONSIDERACIONES INICIALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIAL 56
8 RECOMENDACIONES 59
9 REFERENCIAS 61
ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL 65
ANEXO B. RECOPILACIÓN DE CURVAS DE VULNERABILIDAD EXISTENTES 74
**B.1 Curvas de vulnerabilidad desarrolladas por Lo et al. (2012) 74**
**B.2 Curvas de vulnerabilidad desarrolladas por el proyecto RiskScape (Reese and Ramsay 2010) 75**
**B.3 Curvas desarrolladas por CAPRA y utilizadas por JBA (2019) en ciudad de Panamá 76**
**B.4 Curvas desarrolladas por la UNAL (2006) 77**

## TABLAS

**Tabla 1. Tipo de construcciones dotacionales en la Cuenca de la Q. Limas. Fuente: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 21**

**Tabla 2. Tabla del archivo shape generado con las construcciones existentes en la cuenca de la quebrada Limas 29**

**Tabla 3. Porcentaje de afectación por inundación de una vivienda localizada en una zona de índice de marginación muy alto. Fuente: (Baró-Suárez et al. 2011) 34**

**Tabla 4. Tasa de daños a contenidos/daños a la estructura en función de la profundidad. Fuente: (JBA 2019) 34**

**Tabla 5. Comparación de relevancia de indicadores según amenaza. Fuente: Godfrey et al. (2015) y Kappes et al. (2012). En azul oscuro se encuentran resaltados los indicadores disponibles y con alta importancia (A) para**

Borrador V 1

el análisis de inundación súbita y flujos de detritos, en azul más claro se encuentran los indicadores de importancia media (M). La letra B corresponde a la categoría de baja importancia. 36

Tabla 6. Variables consideradas para construir indicadores de vulnerabilidad física 38

Tabla 7. Categorías de sistemas estructurales y puntaje asignado 39

Tabla 8. Uso y cantidad de construcciones en la zona preliminar de exposición 54

Tabla 9. Información disponible para la construcción de la base de datos de exposición 65

Tabla 10. Categoría de uso. Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital 67

Tabla 11. Códigos de uso del suelo de catastro. Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital 68

Tabla 12. Códigos de calificación según catastro de: armazón, muros: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital 69

Tabla 13. Sistemas estructurales. Fuente: Prieto (2018) 73

## FIGURAS

Figura 1. Enfoque general para el análisis de vulnerabilidad física en la quebrada Limas 11

Figura 2. Metodología general para la construcción de una tipología de viviendas en la cuenca de la quebrada Limas 11

Figura 3. Voladizos de las construcciones representadas como polígonos en la cobertura de la UAECD. Nota: en rojo se muestran los polígonos identificados como voladizos de las construcciones. En azul se muestran las construcciones con las divisiones generadas pro la UAECD 15

Figura 4. Porcentaje de construcciones con información IDECA y con fotointerpretación con información de campo 16

Figura 5. Barrios legalizados en la cuenca de la Quebrada Limas. Fuente: Secretaría Distrital de Planeación 17

Figura 6. Construcciones por año de construcción. a) número de construcciones por periodo; b) porcentaje de construcciones para los periodos de mayor dinámica de ocupación. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 18

Figura 7. Vetustez de las construcciones. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 19

Figura 8. Fotos de los remanentes de viviendas que fueron reubicadas en la quebrada Trompetica en la zona inmediatamente aguas arriba de la confluencia con la quebrada Limas. 19

Figura 9. Construcciones por categoría de uso. a) número de construcciones por tipo de uso; b) porcentaje de construcciones por tipo de uso. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 20

Figura 10. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente de datos: la Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 21

Figura 11. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente: la Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 22

Borrador V 1

Figura 12. Cantidad de construcciones por categoría de número de pisos. a) número de construcciones por categoría de número de pisos; b) porcentaje de construcciones por categoría de número de pisos. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 23

Figura 13. Construcciones por estrato. a) número de construcciones por estrato; b) porcentaje de construcciones por estrato. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 23

Figura 14. Cantidad de construcciones según tipo de Sistema estructural. a) número de construcciones por sistema estructural; b) porcentaje de construcciones por sistema estructural 24

Figura 15. Cantidad de construcciones según tipo de Sistema estructural 25

Figura 16. Porcentaje de construcciones por sistema estructural 26

Figura 17. Diagramas de caja del área construida de construcciones residenciales según estrato. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 26

Figura 18. Diagramas de caja del avalúo catastral según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 27

Figura 19. Diagramas de caja del avalúo comercial según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021) 27

Figura 20. Densidad poblacional por estrato 28

Figura 21. Marco metodológico para el cálculo de índices de vulnerabilidad. Fuente: (Kappes et al. 2012) 38

Figura 22. Diagramas de caja de los valores del indicador de sistema estructural 40

Figura 23. Diagramas de caja de los valores del indicador de número de pisos 40

Figura 24. Diagramas de caja de los valores del indicador de perímetro no colindante 41

Figura 25. Diagramas de caja del área de la huella de las construcciones 41

Figura 26. Diagramas de caja de los valores del indicador de tamaño 42

Figura 27. Matriz de correlación de los indicadores 43

Figura 28. Diagramas de caja del valor del indicador de vulnerabilidad física para las viviendas de la cuenca 44

Figura 29. Diagramas de caja de los indicadores y del IVF para cada grupo 45

Figura 30. Gráficas de densidad y caja de los valores del IVF para los grupos de IVF bajo, medio y alto 46

Figura 31. Indicador de vulnerabilidad física (IVF). Las categorías del IVF corresponden a las definidas en la Figura 30 47

Figura 32. Indicadores de tamaño (It), perímetro no colindante (Ipnc), número de pisos (Inp) y sistema estructural (Ise) 48

Figura 33. Densidades de personas, edificaciones y valores para toda la cuenca 50

Figura 34. Densidades de personas, edificaciones y valores para la zona preliminar de exposición 51

Figura 35. Densidades de personas, edificaciones y valores para la zona preliminar de exposición cuenca baja 52

Figura 36. Hot spots (puntos calientes) para diferentes variables. Las tonalidades rojas muestran la concentración de valores altos, entre más oscuro el rojo más concentración 53

Figura 37. Hot spots (puntos calientes) para el IVF 54

Borrador V 1

**Figura 38. Resumen de características de la zona preliminar de exposición** **55**

**Figura 39. a) Indicador de pobreza multidimensional (IPM). Fuente: DANE (2018); b) Indicador de pobreza multidimensional normalizado; y c) Índice preliminar de vulnerabilidad. Los rangos de valores utilizados para visualizar los indicadores corresponden a una identificación automática del límites utilizando "natural jenks"** **58**

**Figura 40. Parte inicial del algoritmo para generar el sistema estructural de las construcciones. Fuente: Prieto (2018)** **70**

**Figura 41. Diagrama modificado de asignación de Sistema estructural parte A. Fuente: Fuente: Prieto (2018)** **71**

**Figura 42. Algoritmo modificado para generar sistema estructural – Parte B. Fuente: Prieto (2018)** **72**

**Figura 43. Diagrama modificado de asignación de sistema estructural – Parte C. Fuente: Prieto (2018)** **72**

Borrador V1

# 1 Introducción

La evaluación de la vulnerabilidad constituye un componente fundamental de la evaluación de riesgo, que representa una gran variedad de retos debido a sus múltiples dimensiones y complejidad. Este reporte presenta la metodología y resultados de evaluación de la vulnerabilidad física a inundaciones y avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada Limas como parte del estudio de riesgo de la cuenca.

La vulnerabilidad se aborda en su dimensión física mediante dos enfoques: uno cuantitativo que busca la identificación de curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la cuenca y otro basado en indicadores que busca identificar las variables principales que determinan la vulnerabilidad física y traducirlas en un indicador.

En el entendido de que otras dimensiones de la vulnerabilidad además de la física son igualmente relevantes, se realizó una exploración inicial de la vulnerabilidad social cuya finalidad es principalmente identificar los retos para el avance del conocimiento de la vulnerabilidad de cara a los estudios futuros a ser desarrollados en la ciudad.

# 2 Alcance y limitaciones

El análisis de vulnerabilidad se concentra en el daño directo a unidades residenciales. Otro tipo de elementos existentes no es considerado. Lo anterior debe tenerse en cuenta para la interpretación del análisis ya que la infraestructura crítica, edificios destinados a uso no residencial, vías, líneas vitales y vehículos no serán abordados a profundidad. Es claramente reconocido que el inventario de elementos expuestos no debe limitarse a las construcciones residenciales. Sin embargo, este análisis es el primer paso en el avance del conocimiento de la vulnerabilidad a inundaciones y avenidas torrenciales bajo las condiciones específicas de Bogotá luego del estudio desarrollado en 2006 por la UNAL (2006) por lo cual constituye una primera fase que a futuro deberá continuarse para avanzar en el conocimiento de la vulnerabilidad en Bogotá.

De otro lado, la vulnerabilidad física se aborda a través de la exploración de curvas de vulnerabilidad propuestas en la literatura. Esto representa una limitación importante debido a que no se cuenta con datos en la zona de estudio que permita el desarrollo de curvas de vulnerabilidad empíricas y el estudio no tiene el alcance para explorar otros métodos de generación de curvas de vulnerabilidad.

El análisis de vulnerabilidad está limitado a los daños directos que puedan sufrir las viviendas. En cuando a la vulnerabilidad humana, aunque se genera dentro del análisis un estimado de población en la cuenca asociado a las construcciones existentes, este estudio no tiene el alcance para establecer un modelo de vulnerabilidad humana.

El análisis de vulnerabilidad para este informe tiene un alcance limitado a la exploración de las viviendas y personas expuestas. Las actividades económicas, líneas vitales,

Borrador V1

infraestructura crítica, vías y otros elementos que podrían estar localizadas en zonas de amenaza y que por lo tanto requieren un análisis de exposición y vulnerabilidad particular, no serán abordadas en este estudio. Su análisis se podrá realizar en etapas posteriores o por cada sector individualmente.

Aspectos relacionados con la vulnerabilidad al cambio climático están fuera del alcance de este estudio. En análisis futuros deberá incorporarse la evaluación de resiliencia que permita entender la capacidad de las comunidades y la ciudad para manejar las incertidumbres asociadas la cambio climático, lo mismo que la capacidad de adaptarse.

Este informe está enfocado en la vulnerabilidad física. Se reconoce que otras dimensiones de la vulnerabilidad son altamente importantes y se recomienda que en estudios posteriores se desarrollen estudios de resiliencia y vulnerabilidad socioeconómica.

Borrador V1

# 3 Metodología

## 3.1 Definiciones

La exposición está definida como *la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012)* (SNGRD 2017). La exposición es principalmente dependiente de la localización geográfica y en términos simples corresponde a las actividades humanas afectadas por un evento amenazante (Su y Kang 2005).

Aunque no existe una definición universal de vulnerabilidad, varias disciplinas han desarrollado sus propias definiciones y visiones analíticas (Birkmann 2006). La definición de vulnerabilidad según la legislación colombiana corresponde a: *susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por j. eventos físicos peligrosos* (Congreso de Colombia 2012). La definición del IPCC[1] es consistente con esta definición y corresponde a: propensión o predisposición a ser afectado de manera adversa (Lavell et al. 2012). Además el IPCC indica que la predisposición constituye una característica interna del elemento afectado e incluye las características de una persona o un grupo y su situación que influencia su capacidad de anticipar, manejar, resistir y recuperarse de los efectos adversos de eventos físicos (Lavell et al. 2012). En estas definiciones hay aspectos relevantes que muchos autores resaltan de la vulnerabilidad:

- La vulnerabilidad es una característica intrínseca del elemento expuesto (Birkmann 2006)
- La vulnerabilidad es multimensional y diferencial (varía en el espacio físico y entre y dentro de grupos sociales) (Vogel y O'Brien 2004)
- Depende de la escala de evaluación (varía en el tiempo, espacio y unidades de análisis tales como individuos, hogares, regiones o sistemas)
- Es dinámica (las características e impulsores de la vulnerabilidad cambian en el tiempo)

Aunque la vulnerabilidad de una comunidad tiene dimensiones sociales, económicas, físicas, ambientales, institucionales y culturales (Birkmann et al. 2013), estas dimensiones están interconectadas (Malgwi et al. 2020). Por ejemplo, el nivel de ingresos de los habitantes se refleja en lo robusto de las viviendas (Fuchs et al. 2019), así como la aplicación de códigos constructivos, que en el caso de la quebrada Limas está

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change

Borrador V.1

directamente relacionado con el origen de las viviendas (formal o informal). Por esta razón es esencial estudiar las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad y sus interacciones (Fuchs et al. 2019).

Fuchs et al. (2019) clasifica los métodos existentes de evaluación de vulnerabilidad en tres clases: matrices de vulnerabilidad, curvas de vulnerabilidad e indicadores de vulnerabilidad. Dependiendo de los datos de entrada, los modelos de vulnerabilidad pueden ser cualitativos (descritos con palabras), semicuantitativos (representados en una escala relativa, también llamados categóricos) o cuantitativos (descritos como un número sin dimensiones de 0 a 1) (Eidsvig et al. 2014). Los modelos de vulnerabilidad también pueden ser divididos en (Eidsvig et al. 2014): i) aquellos que describen el grado de pérdida como una función de la intensidad de la amenaza; y ii) aquellos que describen la probabilidad de exceder un estado de daño para diferentes intensidades, donde la definición de los estados de año es parte del modelo de vulnerabilidad. Los primeros resultan en una curva de vulnerabilidad y los segundos en una curva de fragilidad.

En general las curvas de vulnerabilidad son uno de los métodos más usados para la evaluación de la vulnerabilidad física[2] (Fuchs et al. 2019) mientras que el uso de indicadores es utilizado para hacer evaluaciones holísticas de vulnerabilidad y riesgo donde además de la dimensión física se consideran otras dimensiones de la vulnerabilidad. Sin embargo, no existe un método único ni curvas de vulnerabilidad únicas y aplicables en todos los casos, por el contrario las curvas de vulnerabilidad existentes son especificas para el sitio donde fueron desarrolladas (Fuchs et al. 2007). La transferibilidad de curvas de una región a otra es un aspecto que es muy discutible y que tiene pocos estudios. En teoría curvas de daños de una región similar a la región de estudio en donde son similares tanto los sistemas constructivos como las características de las inundaciones deberían estimar el daño suficientemente bien, sin embargo se requiere más investigación en este campo para validar la transferibilidad de las funciones en espacio y tiempo (Marvi 2020).

Las curvas de vulnerabilidad constituyen el único método puramente cuantitativo para evaluar la vulnerabilidad de elementos expuestos (Fuchs et al. 2019). Una curva o función de vulnerabilidad es una curva continua que relaciona la intensidad de una amenaza (eje X) y el estado de daño de una construcción (eje Y) (Tarbotton et al. 2015). Las curvas de vulnerabilidad pueden definirse en términos del daño absoluto o relativo (Olesen et al. 2017).

La construcción de estas curvas implica una alta incertidumbre. Las curvas de vulnerabilidad disponibles en la literatura en general aplican métodos que difieren para cada caso y pueden tener criterios con diferencias importantes en cuanto al

[2] La vulnerabilidad física en específico se define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos dentro de un área afectada por una amenaza y se expresa en una escala de 0 (sin pérdida) a 1 (pérdida total) (Fuchs et al. 2019).

Borrador V1

comportamiento de los elementos expuestos para determinados niveles de intensidad dependiendo de las características estructurales y de las condiciones de flujo que se usaron para su definición. Para una revisión de avances en el desarrollo de curvas de vulnerabilidad ver Fuchs et al. (2019). Debido a las limitaciones que tienen las curvas de vulnerabilidad se han desarrollado otros métodos como el uso de indicadores.

Las curvas de vulnerabilidad pueden ser desarrolladas utilizando datos empíricos, métodos sintéticos o conocimiento experto. Los métodos empíricos requieren datos de profundidad de flujo relacionados con patrones de daño o pérdidas monetarias luego de los eventos de inundación. Estos datos permiten el ajuste de curvas para correlacionar profundidades de flujo con daño o pérdidas. Los métodos sintéticos están basados en escenarios de análisis derivados de conocimiento experto para determinar el daño esperado para intervalos seleccionados de profundidad de flujo (Pistrika et al. 2014). Los enfoques multivariados deducen las relaciones entre los datos empíricos de daños o pérdidas y múltiples parámetros que influencian el daño (Malgwi et al. 2020). Sin embargo, para obtener las curvas de vulnerabilidad un limitante importante es la falta de datos. En la práctica las curvas de daño que utilizan datos empíricos generalmente se obtienen de muestra pequeñas de construcciones afectadas. Debido a la dificultad de cuantificar daños cuando ocurren eventos de gran magnitud, generalmente las curvas se derivan de datos de daño ocurridos con inundaciones no muy profundas y posteriormente se extrapolan para profundidades más altas, lo que genera incertidumbres importantes. Las curvas basadas en conocimiento experto se basan en el principio de analizar escenarios, por lo cual no requieren la observación de daños pero son dependientes del conocimiento de los expertos (Olesen et al. 2017). Las curvas de vulnerabilidad también pueden clasificarse en relativas o absolutas. Las primeras cuantifican el daño como un porcentaje del valor total del reemplazo de la estructura afectada mientras que las absolutas usan el valor monetario absoluto del daño por elemento (Pistrika et al. 2014).

El uso de indicadores es reconocido como de alta importancia para para la reducción de riesgo. Los indicadores de vulnerabilidad están basados en variables agregadas para comunicar el estado de un sistema y proporcionar información sobre el nivel al cual el sistema será impactado por cierto nivel de amenaza (Birkmann, 2006). Ya que los indicadores tienen bajos requerimientos de datos empíricos o datos de daños este tipo de métodos es ampliamente usado en zonas con escasez de datos. Constituyen además un muy buen complemento a los datos de curvas de daño ya que permiten tener una visión más holística o completa de la vulnerabilidad (Malgwi et al. 2020). Los enfoques que utilizan escalas de daño o indicadores son en general más adecuados en áreas con escasez de datos; sin embargo tienen el problema de la dificultad en la forma de vincular los indicadores de manera sistemática (Malgwi et al. 2020).

Un indicador de vulnerabilidad es un parámetro o variable que puede influir y/o comunicar el grado de daño (o pérdida) de un sistema (Malgwi et al. 2020). Los indicadores conducen a la construcción de índices en un marco que indica cómo se combinan a través de pesos y en donde claramente se establece el objetivo de cada indicador, la dimensión

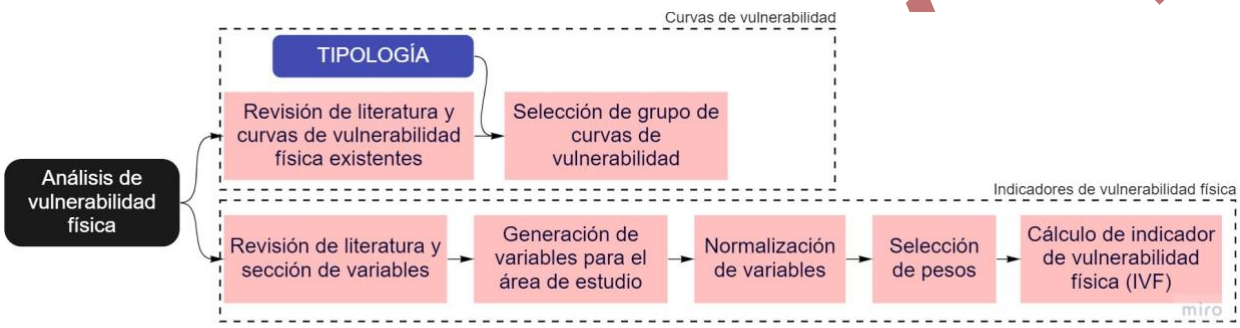
Borrador V1

de la vulnerabilidad a la que pertenece, la escala espacial y la región de aplicación (Malgwi et al. 2020).

## 3.2 Metodología general aplicada y datos

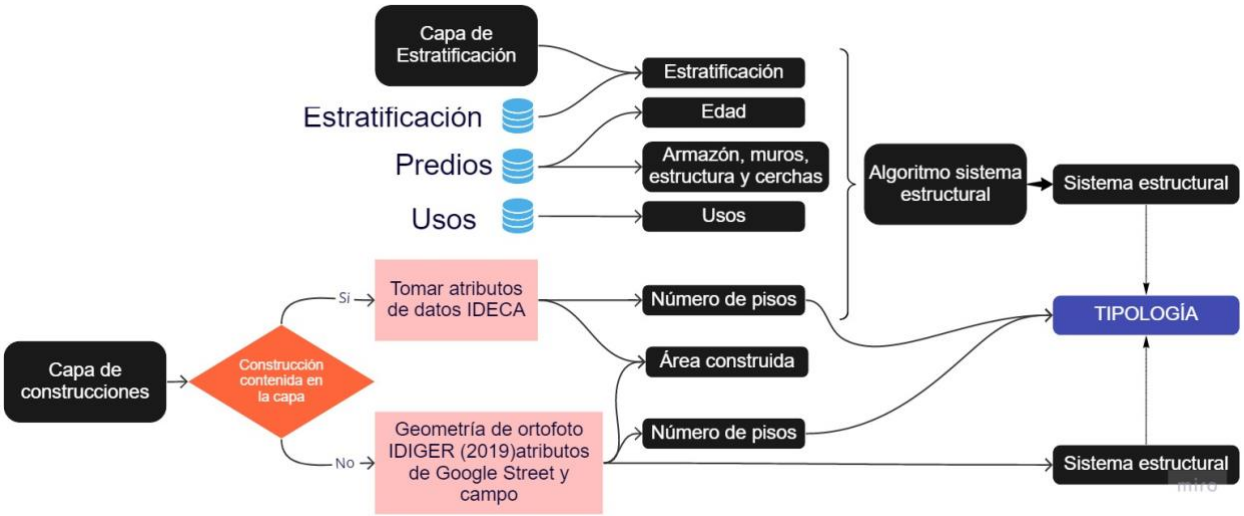
El análisis de vulnerabilidad física de la cuenca de la quebrada Limas ante inundaciones y avenidas torrenciales se llevará a cabo a través de dos enfoques (ver Figura 1): (1) identificación de curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la cuenca; y (2) generación de un indicador de vulnerabilidad física.

*Figura 1. Enfoque general para el análisis de vulnerabilidad física en la quebrada Limas*




La Figura 2 muestra la metodología general junto con las fuentes de datos que se utilizaron para generar una clasificación tipológica de las construcciones residenciales de la cuenca de la quebrada Limas.

*Figura 2. Metodología general para la construcción de una tipología de viviendas en la cuenca de la quebrada Limas*



La exposición en la quebrada Limas se analizó desde la perspectiva de la creación de una base de datos para el análisis de riesgo. La base de datos de exposición constituirá el conjunto de datos de entrada para asignar curvas de vulnerabilidad y para generar los indicadores de vulnerabilidad física, por lo cual la generación de una clasificación por tipología de construcción es fundamental, la cual podrá asociarse con una(s) curva(s) de vulnerabilidad para el análisis de riesgo, un valor y un número de personas expuestas.

La mayoría de los predios de la cuenca tienen información generada por la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD), disponible en IDECA[3]. Sin embargo, se identificaron construcciones en la ortofoto capturada por IDIGER en 2019 que no se encontraban en las bases de datos de IDECA, por lo cual estas construcciones fueron digitalizadas y los atributos de número de pisos y sistema estructural se asignaron utilizando Google Street view, cuando esta fuente estaba disponible, y con información de campo.

Como paso inicial se generó una base de elementos existentes (no necesariamente expuestos a inundaciones o avenidas torrenciales) en la cuenca de la quebrada Limas a los cuales se les asignó una tipología estructural siguiendo los procedimientos desarrollados por el IDIGER (Prieto 2018) para evaluación de amenaza sísmica. Se tomó la decisión de utilizar este enfoque, debido al valor agregado de generar una base de datos que pueda ser utilizada para la evaluación de riesgo por múltiples amenazas y que no solo se limite a la evaluación de riesgo por inundaciones o avenidas torrenciales. Cabe mencionar que la tipología estructural utilizada por el IDIGER para la evaluación de riesgo sísmico, indica los parámetros de número de pisos y material de construcción que son los más importantes relacionados con la vulnerabilidad a inundaciones y avenidas torrenciales. El método detallado usado para la asignación del sistema y tipología estructural siguiendo los lineamientos de IDIGER para amenaza sísmica se presenta en el ANEXO A.

Para eventos de inundaciones súbitas, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos, los parámetros más utilizados en la literatura para clasificación tipológica son el número de pisos, tipo estructural, tipo de techo y proporción, tipo y calidad de las aberturas de la casa (Thouret et al. 2014). El techo juega un papel menor en la respuesta de las estructuras en el caso de las inundaciones súbitas (Thouret et al. 2014) por lo que no será utilizado como criterio tipológico. En el caso de las aberturas de la vivienda —que están constituidas por ventanas y puertas— estas han sido consideradas por varios autores como un elemento importante en el nivel de daño de estructuras expuestas a flujos con alta concentración de sedimentos en especial en el rango de los flujos de detritos. Debido a que el rango de concentraciones esperado durante los eventos de creciente de la quebrada Limas está dentro de la clasificación de las crecientes de agua clara y flujos hiperconcentrados y a que no se dispone de esta información esta característica de las viviendas no se considerará.

[3] IDECA - Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital. https://www.ideca.gov.co/

Borrador V1

Aunque la práctica estándar es asignar a los elementos expuestos el valor de reconstrucción o reemplazo (Azmeri e Isa 2018a), el IDIGER utiliza el valor catastral dentro de sus cálculos de riesgo. El valor catastral se obtuvo de la base de datos de la UAECD a julio de 2021 que tiene valores por metro cuadrado a nivel de manzana. Con base en la información de avalúo catastral y comercial por metro cuadrado y las áreas de las construcciones se asignó a cada construcción un campo de valor (tanto comercial como catastral).

Con el fin de asignar un número de población expuesta en cada construcción, se utilizó la información del DANE[4] a nivel de manzana. Debido a que los códigos de las manzanas y los polígonos de las manzanas del DANE son diferentes a los de la UAECD, se hizo una identificación para cada construcción del código de manzana del DANE mediante una intersección espacial y la población de cada manzana se distribuyó en las construcciones proporcional al área.

### *3.2.1 Identificación de curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la cuenca*

En principio, cada bien expuesto tiene su propia función de vulnerabilidad específica. Sin embargo, no es práctico determinar funciones de vulnerabilidad para cada uno de los bienes expuestos. Por lo que se define un catálogo de clases estructurales con funciones de vulnerabilidad asignadas a cada una de ellas. Posteriormente, cada uno de los bienes expuestos individuales se clasifica de acuerdo con los tipos estructurales que constituyen el catálogo (Ordaz et al. 2013). Las funciones de vulnerabilidad deben construirse de tal suerte que, para diversos niveles de intensidad, quede definida la distribución de probabilidad de las pérdidas que se presentarían. Esto se consigue, usualmente, haciendo que las funciones de vulnerabilidad especifiquen curvas que relacionen el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno (Ordaz et al. 2013). La desviación estándar de los residuos del daño a cada profundidad es una de las formas de considerar la incertidumbre de las curvas de daño (Marvi 2020). También es posible llevar a cabo análisis de sensibilidad para estudiar que variables del modelo de vulnerabilidad influyen en mayor medida en los resultados de riesgo (Marvi 2020). Otro método para considerar la incertidumbre es usar curvas de fragilidad en lugar de curvas de daño, sin embargo todavía es necesario avanzar en la verificación de este tipo de curvas para llegar a modelos más sofisticados como por ejemplo los desarrollados en el caso de sismo (Marvi 2020). Para seleccionar curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la quebrada Limas, se realizó una revisión de literatura y se escogieron curvas potencialmente aplicables según las características de los sistemas estructurales identificados en la cuenca.

Borrador V1

[4] https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata

### *3.2.1 Generación de un indicador de vulnerabilidad física*

Para generar un indicador de vulnerabilidad física, se llevó a cabo una revisión de literatura para identificar las variables que pueden servir de indicadores. Las variables se calcularon a nivel de construcción y fueron normalizadas para constituir indicadores que describen las principales características que determinan la vulnerabilidad física. Estos indicadores fueron combinados linealmente mediante pesos para construir un indicador compuesto de vulnerabilidad física (IVF). Los pesos para realizar la combinación lineal fueron obtenidos de la literatura.

### *3.2.1 Consideraciones iniciales para la evaluación de la vulnerabilidad social*

Como contribución a la evaluación holística futura de la vulnerabilidad, se realizó una exploración inicial del indicador de pobreza multidimensional - IPM (DANE, 2018). Este indicador se asignó a las construcciones, se normalizó y se combinó mediante un promedio con el IVF. Este análisis no pretende realizar una evaluación detallada de la vulnerabilidad social, sino realizar una aproximación inicial mediante el uso del IPM que se encuentra disponible a nivel de manzana.

Las siguientes secciones discuten en detalle el procedimiento realizado y los análisis llevados acabo.

Borrador V1

# 4 Caracterización de los elementos existentes en la cuenca de la quebrada Limas

## 4.1 Características generales de las construcciones

La base de datos de construcciones existentes completa, obtenida mediante la complementación de la información disponible en IDECA con digitalización e información de campo, resultó en 71,746 polígonos en la cuenca. Varios de estos polígonos comparten el mismo código de lote, es decir, dentro de un lote pueden existir varias construcciones que han sido identificados por la UAECD con un polígono como construcciones individuales. La capa generada tiene 3,837 construcciones dentro de la cuenca que no tienen código de lote de catastro, debido a que fueron digitalizadas y se encontraron no coincidentes con lotes identificados por la UAECD; y tiene 31,233 lotes con código único asignado por la UAECD. Además, algunos de los polígonos de la capa corresponden a extensiones generadas en los segundos o más pisos en forma de voladizo que son representados en la información geográfica de la UAECD como un polígono adicional con el mismo código del lote (ver Figura 3). Al retirar esos polígonos se encontró que el número de construcciones en la cuenca es 50,356.

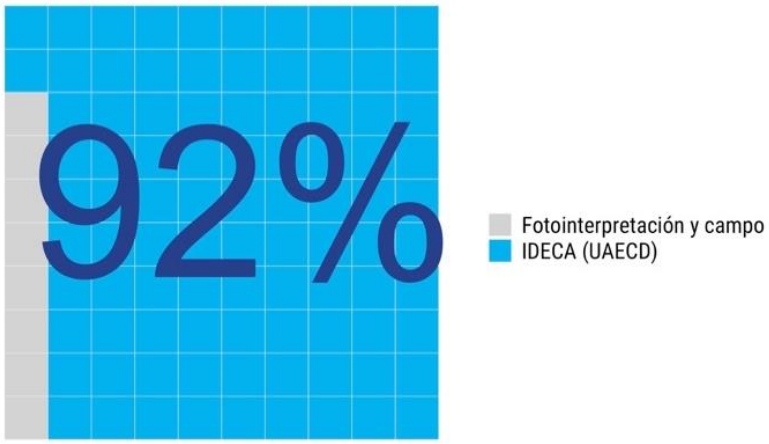
*Figura 3. Voladizos de las construcciones representadas como polígonos en la cobertura de la UAECD. Nota: en rojo se muestran los polígonos identificados como voladizos de las construcciones. En azul se muestran las construcciones con las divisiones generadas pro la UAECD*



Cabe aclarar que los análisis subsiguientes se centrarán en las construcciones identificadas y que no tienen el alcance para evaluar otro tipo de infraestructura. Del total de construcciones en la cuenca, el 92% estaba identificada en la información de IDECA con toda la información catastral disponible. El 8% restante corresponde a construcciones identificadas con fotointerpretación y con características obtenidas de información de campo y Google Street.

Borrador V1

*Figura 4. Porcentaje de construcciones con información IDECA y con fotointerpretación con información de campo*




Dentro de los trabajos de campo se identificó que la urbanización de la cuenca es altamente dinámica. En pocos meses se genera la ocupación y construcción de viviendas, lo que hace que la base de construcciones existentes se desactualice rápidamente. Además, las características de las viviendas también son dinámicas. Viviendas en material de recuperación en un tiempo de algunos meses pueden ser reemplazadas por viviendas en mampostería. Esta dinámica, es un ejemplo de los cambios que pueden tener en el tiempo las condiciones de riesgo y la necesidad de actualización periódica de los estudios.

## 4.2 Características de la ocupación urbana en la cuenca de la Quebrada Limas

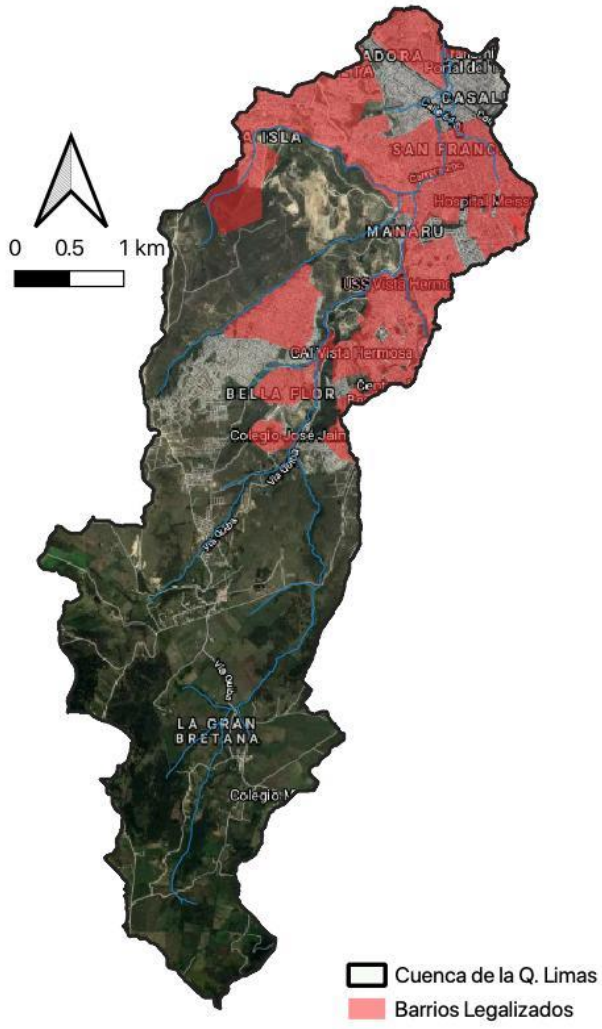
La mayoría de las construcciones en la cuenca de la quebrada Limas son de origen informal. La Figura 5 muestra los barrios legalizados[5] en la quebrada Limas, reflejando que la mayoría de las construcciones en la zona urbana más consolidada —localizada en el norte de la cuenca— originalmente fueron construcciones informales que fueron legalizadas. En el área no cubierta por la capa de barrios legalizados mostrada en la Figura 5, en la zona norte de la cuenca, se identificaron conjuntos residenciales, pero estos son solo unos pocos, en esta zona también la mayoría de las construcciones exhibe características de informalidad.

La cuenca alta está sufriendo un proceso intenso de ocupación ilegal, las zonas ocupadas en esta zona hoy en día constituyen barrios que aún no han sido legalizados.

Borrador

[5] Corresponde a la capa de IDECA denominada Barrio Legalizado, definida como área geográfica resultante del procedimiento mediante el cual la Administración Distrital, reconoce aprueba planos, regulariza y expide la reglamentación, para los desarrollos humanos realizados clandestinamente, que sin perjuicio de lo dispuesto en el régimen de transición, a la fecha de expedición del Plan de Ordenamiento Territorial, cumplan con las condiciones exigidas por la normativa nacional. https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/barrio-legalizado-bogota-dc

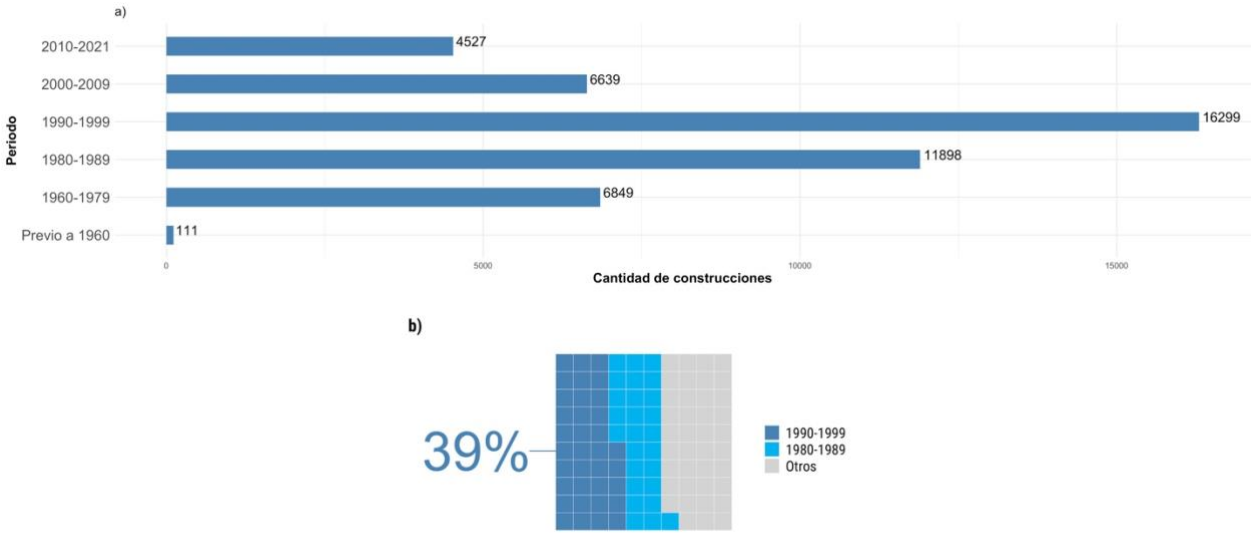
*Figura 5. Barrios legalizados en la cuenca de la Quebrada Limas. Fuente: Secretaría Distrital de Planeación*




La Figura 7 muestra la vetustez de las construcciones según la base de datos de predios de la Unidad Especial de Catastro Distrital actualizada a julio de 2021. Las construcciones más antiguas están localizadas al nororiente de la cuenca, en el barrio San Francisco, con fechas de construcción de los años 60. Estas viviendas fueron las primeras en ocupar la zona de inundación de la quebrada Limas. En la década de los 70 se produce una densificación de las zonas ya ocupadas y empieza la ocupación de otras zonas más hacia el oriente de la quebrada Limas y hacia el occidente. En la década de los 80 se produce una intensa ocupación de la zona central oriental de la cuenca de la quebrada Limas que hoy constituye los barrios Juan Pablo II, Villa Colombia y Nutibara. Para los años 90 la cuenca baja ya se encuentra densamente urbanizada. La densificación continuó durante esta década en las zonas ya ocupadas de la zona central occidental de la cuenca y se produce una ocupación acelerada de la cuenca media en los barrios Mirador, La Torre, Bella Flor y Los Alpes. Esta década corresponde a la de mayor actividad en la ocupación de la cuenca (39% de las construcciones fueron construidas en esta década, ver Figura 6). En la década de 2000 a 2010 continúa la densificación de la cuenca media y se produce la ocupación de la zona localizada al norte del barrio el Mirador (ver Figura 7). La ocupación de la cuenca media ha continuado y a 2021 es posible identificar nuevas ocupaciones y lotificaciones extendiéndose hacia la cuenca alta. La ocupación se ha producido de forma intensa hacia la cuenca alta a tal punto que, si esta tendencia continúa, las ocupaciones informales podrían alcanzar la mayoría de las zonas rurales e incluso presentarse una conurbación con la vereda Quiba.

BORRADOR

*Figura 6. Construcciones por año de construcción. a) número de construcciones por periodo; b) porcentaje de construcciones para los periodos de mayor dinámica de ocupación. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*




Dentro del alcance del proyecto de recuperación de la zona de ronda fueron reubicadas las viviendas localizadas dentro de la zona de ronda en la cuenca baja. La Figura 8 muestra los muros y cimentación de viviendas reubicadas que estaban localizadas en la zona inmediatamente aguas arriba de la confluencia de la quebrada Peña Colorada con la quebrada Limas. En las fotografías se puede observar como los métodos de construcción utilizados implicaban el relleno de bancas y la construcción de muros dentro del cauce. Este tipo de intervenciones, a lo largo de la zona que hoy se encuentra más consolidada, dieron lugar a cambios drásticos en la dinámica de los cuerpos de agua.

Este mismo tipo de prácticas están siendo utilizadas en la ocupación de la cuenca alta. Los cuerpos de agua son sometidos a relleno, el drenaje natural es modificado de manera drástica y se ocupan zonas cercanas a los cauces e incluso las bancas de los cuerpos de agua como ocurre en la cuenca de la quebrada Peña Colorada.

Borrador

*Figura 7. Vetustez de las construcciones. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*

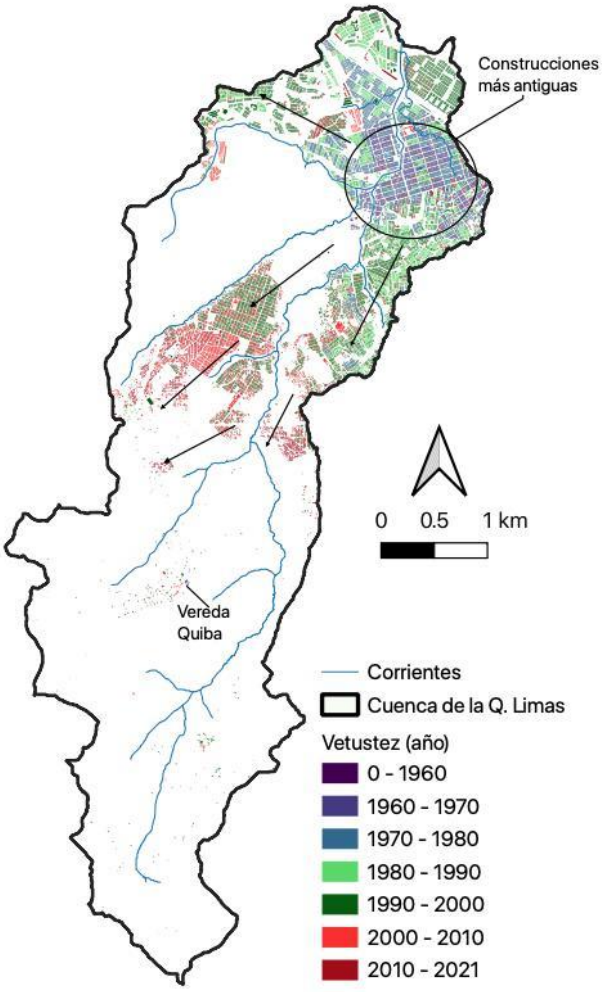
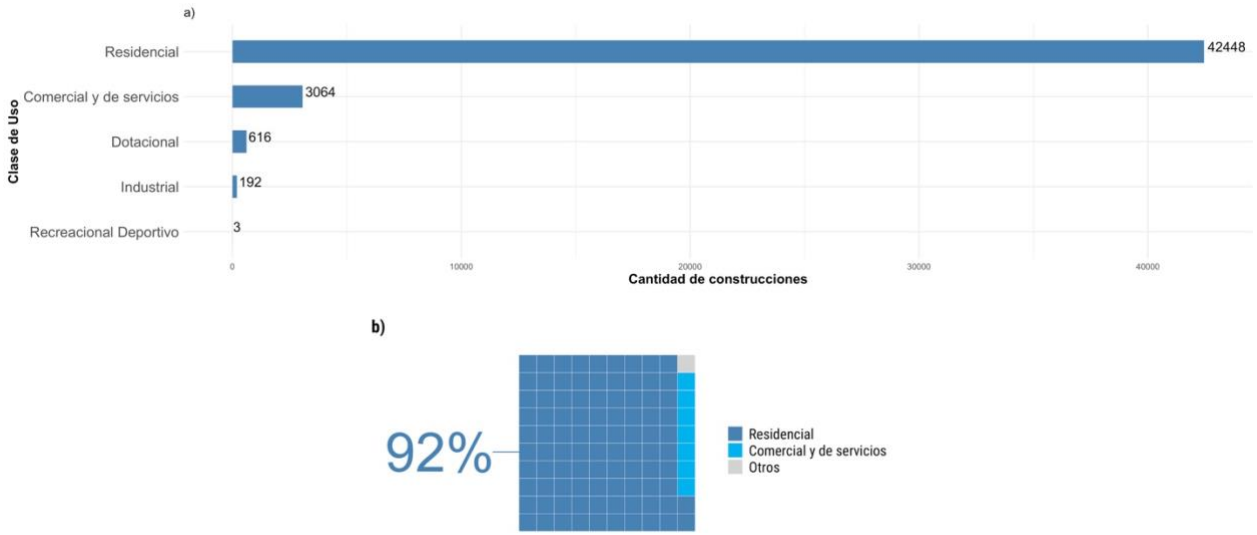



*Figura 8. Fotos de los remanentes de viviendas que fueron reubicadas en la quebrada Trompetica en la zona inmediatamente aguas arriba de la confluencia con la quebrada Limas.*



La mayoría de las construcciones (92%) de la cuenca son de uso residencial. La Figura 9 muestra la clasificación de las construcciones según la categoría de uso de la UAECD.

*Figura 9. Construcciones por categoría de uso. a) número de construcciones por tipo de uso; b) porcentaje de construcciones por tipo de uso. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*

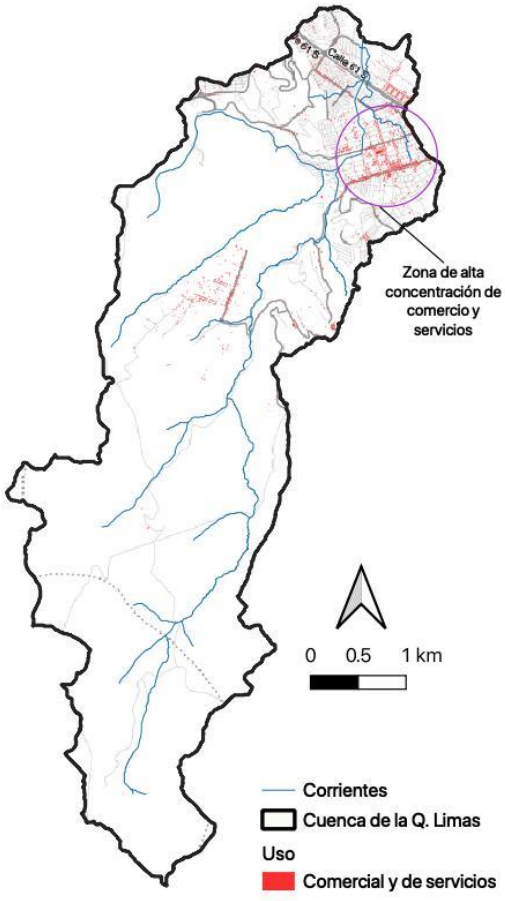



Las construcciones de uso comercial y de servicios se encuentran mezcladas con las de uso residencial (ver Foto 1).

*Foto 1. Actividades comerciales en la zona de San Francisco. Fuente: Google Street View*



*Figura 10. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente de datos: la Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*




La Figura 10 muestra la localización de construcciones con uso comercial y de servicios según la información de la base de datos de predios de la UAECD. La zona con mayor concentración de este tipo de uso se encuentra en la zona de mayor antigüedad de construcciones que corresponde al barrio San Francisco en el norte de la cuenca.

Como se evidencia en la Foto 1 las actividades comerciales formales se mezclan con un intenso comercio informal en las zonas de mayor concentración de actividades comerciales y de servicios.

Comúnmente el primer piso de la construcción es utilizado para actividades comerciales mientras que el segundo y demás pisos se utilizan para uso residencial. Esto implica una fuerte relación entre la vivienda y los medios de vida de la población de la zona.

La localización de las construcciones de uso dotacional se muestra en la Figura 11. Este tipo de infraestructura se encuentra disperso en la cuenca. La mayoría de la infraestructura dotacional pertenece a la categoría 12 (Institucional Puntual) [6] que corresponde a construcciones de tipo habitacional adaptado para fines institucionales (ver Tabla 1).

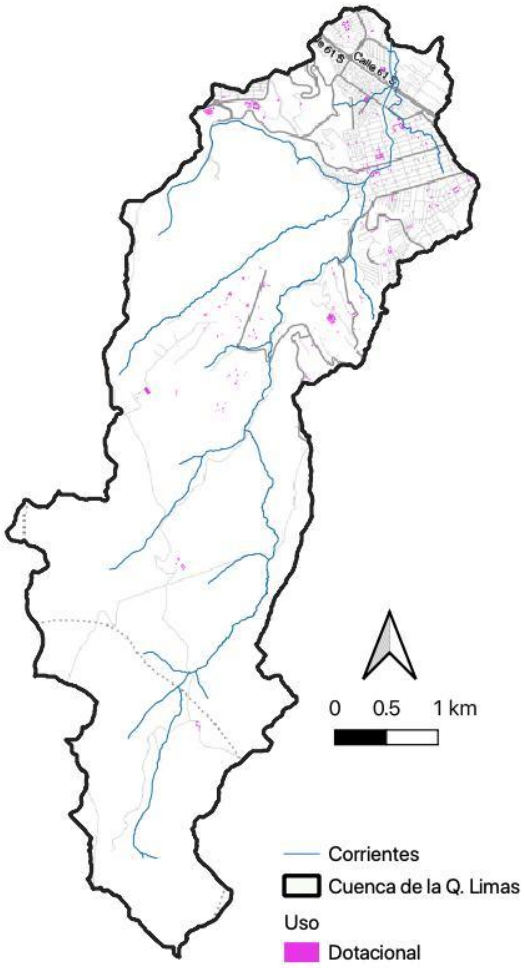
*Tabla 1. Tipo de construcciones dotacionales en la Cuenca de la Q. Limas. Fuente: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*

| ***Tipo*** | ***Código*** | ***Cantidad*** |
|---|---|---|
| Institucional Puntual | 12 | 297 |
| Colegios y Universidades de 1 a 3 pisos | 13 | 176 |
| Iglesias | 14 | 50 |
| Colegios y Universidades de 4 pisos o más | 16 | 46 |
| Oficinas y Consultorios oficiales en NPH | 15 | 24 |
| Clínicas Hospitales Centro Médicos | 17 | 11 |
| Culto Religioso en NPH | 58 | 8 |
| Aulas de Clases | 64 | 4 |

[6] http://redatam.sdp.gov.co:8080/redcol/SDPDOC/FPREDIALDOC/Definiciones.pdf

Borrador V1

*Figura 11. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente: la Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*




Existen construcciones de uso industrial en una menor proporción que los usos anteriores. Además, la base de datos de predios de la UAECD (2021) incluye dos predios de uso recreacional y deportivo que corresponden al polideportivo de Urbanizadora Alta y un predio en el barrio San Francisco identificado con el uso "clubes pequeños".

La mayoría de las construcciones son de 1 o 2 pisos (73%) con un 43% de viviendas de un solo piso. La cantidad de construcciones por número de pisos se muestra en la Figura 12, según la información de la capa de construcciones de la UAECD complementada con información fotointerpretada y de campo.

La mayoría de las construcciones (99%) son de estrato 1 o 2 con un 60% de viviendas en el estrato 1. La Figura 13 muestra el número de construcciones por estrato socio económico según la información de la UAECD complementada con fotointerpretación e información de campo.

Borrador V1

*Figura 12. Cantidad de construcciones por categoría de número de pisos. a) número de construcciones por categoría de número de pisos; b) porcentaje de construcciones por categoría de número de pisos. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*

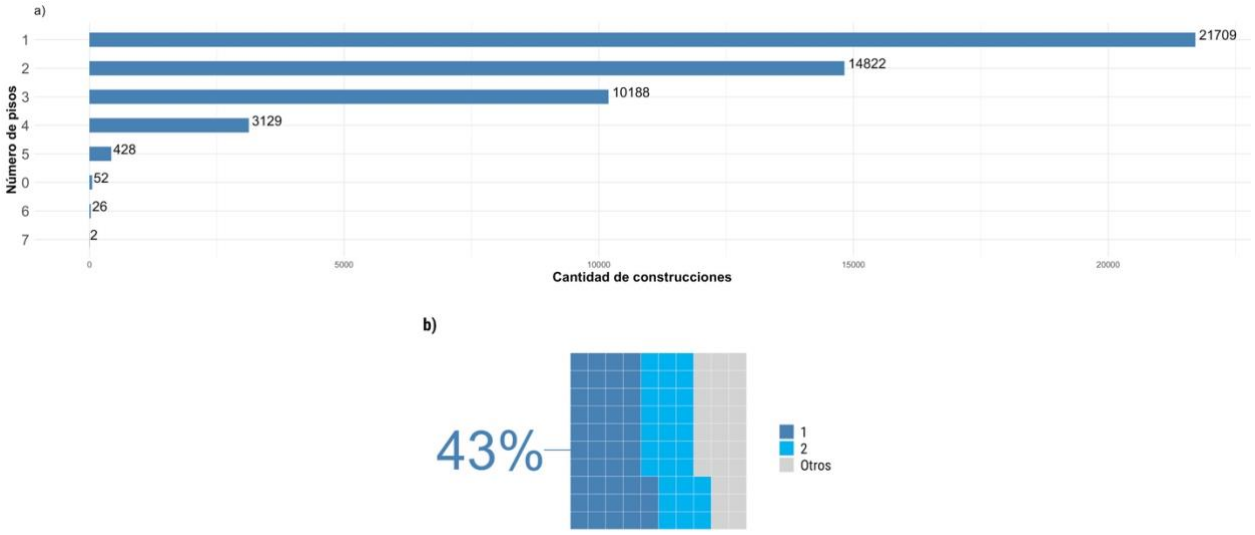
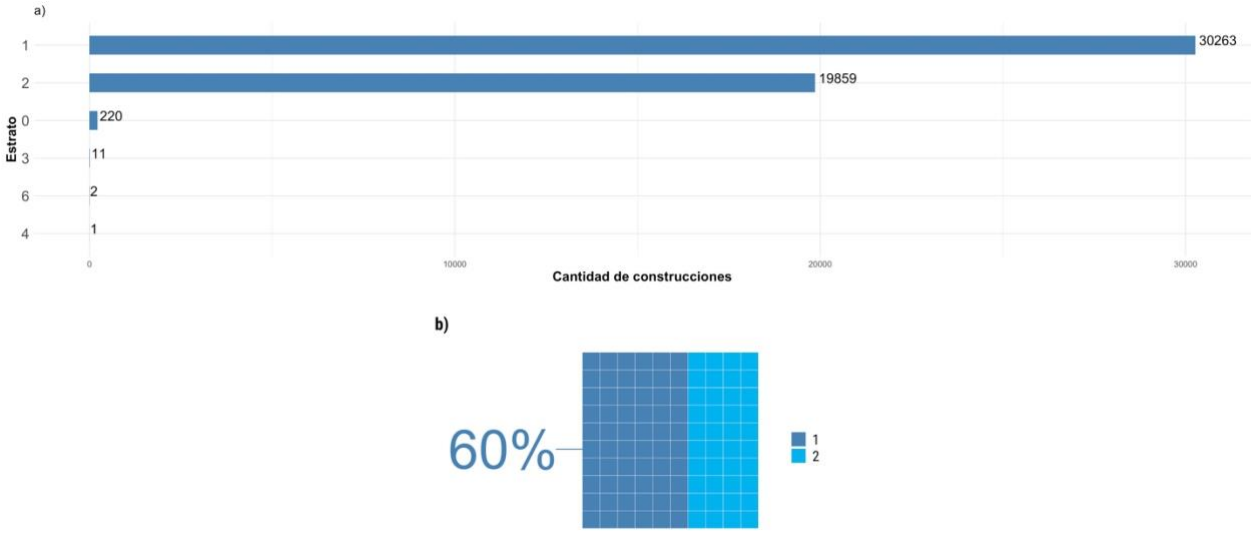


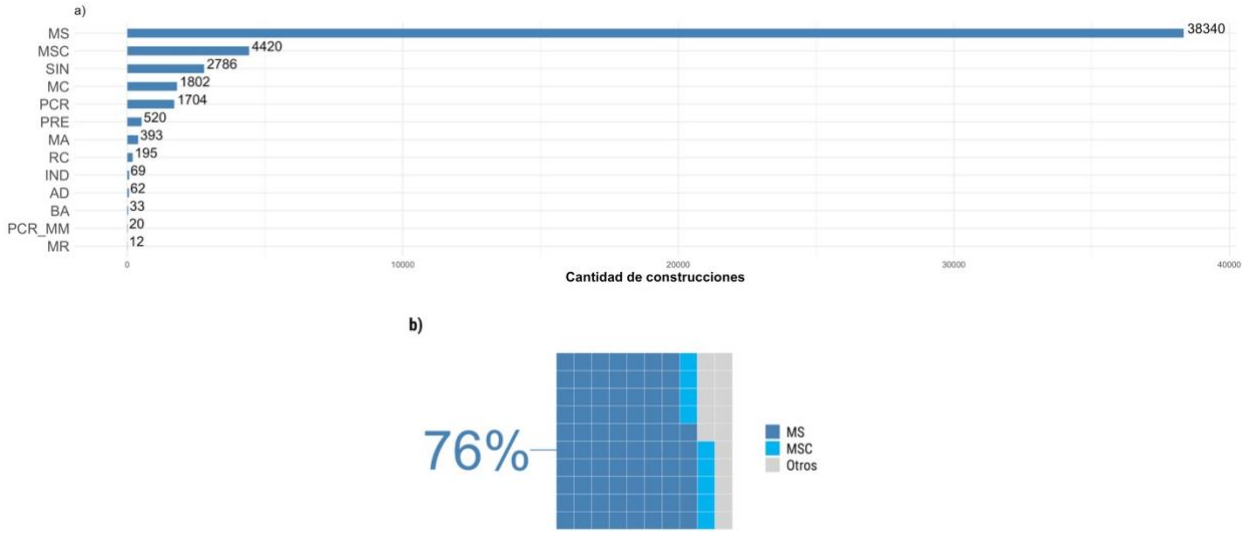

*Figura 13. Construcciones por estrato. a) número de construcciones por estrato; b) porcentaje de construcciones por estrato. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*



## 4.3 Asignación de sistema estructural y tipología

El sistema estructural fue asignado para todas las construcciones de la cuenca que cuentan con información de la UAECD siguiendo la metodología descrita en la sección 3 y ANEXO A. La cantidad de construcciones según tipo se muestra en la Figura 14. El 76% de las construcciones son de mampostería simple (MS) seguido de un 9% de construcciones en mampostería semiconfinada (MSC).

*Figura 14. Cantidad de construcciones según tipo de Sistema estructural. a) número de construcciones por sistema estructural; b) porcentaje de construcciones por sistema estructural*




La Foto 2 muestra un ejemplo del tipo de construcciones comúnmente encontrado en la cuenca.

*Foto 2. Viviendas de la cuenca de la quebrada Limas*



Borrador

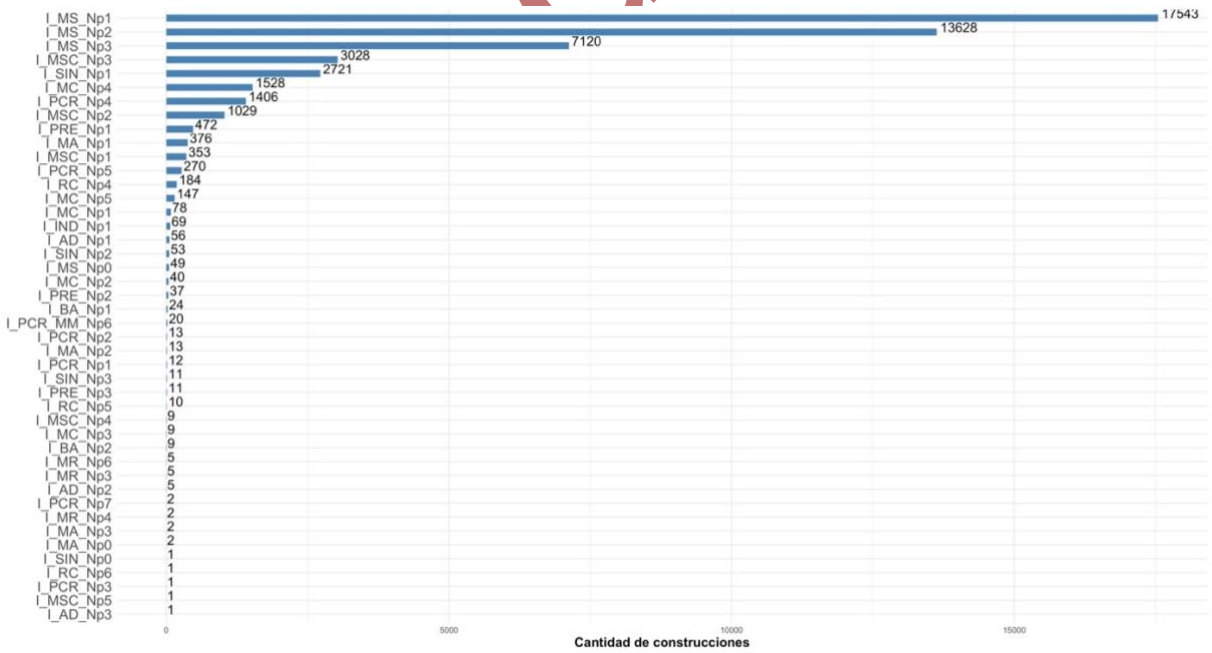
Una vez obtenido el sistema estructural para cada construcción, se generó un código tipológico siguiendo la metodología propuesta por Prieto (2018). Esta tipología obedece principalmente a consideraciones de vulnerabilidad ante amenaza sísmica, sin embargo, ofrece el punto de partida para asignar grupos tipológicos para la evaluación de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales.

La tipología para riesgo sísmico contiene 4 grupos de letras, el primero indica la amenaza, el segundo el sistema estructural, el tercero el número de pisos y el cuarto el periodo constructivo. Por ejemplo, el código tipológico "S_MS_Np1_PC4" indica que el código es para amenaza sísmica, el sistema estructural es mampostería simple, de un solo piso y construida en el periodo 4 que corresponde a menos de 21 años de construida.

Las curvas de vulnerabilidad para inundaciones y avenidas torrenciales generalmente vinculan el material o sistema estructural de la vivienda y el número de pisos. El periodo constructivo, aunque es usado en algunas ocasiones (ver por ejemplo las curvas desarrolladas por (Reese y Ramsay 2010)) dadas las grandes limitaciones que tiene la aplicación de estas curvas en Bogotá, el periodo constructivo no será utilizado (para una discusión de las limitaciones ver sección 5).

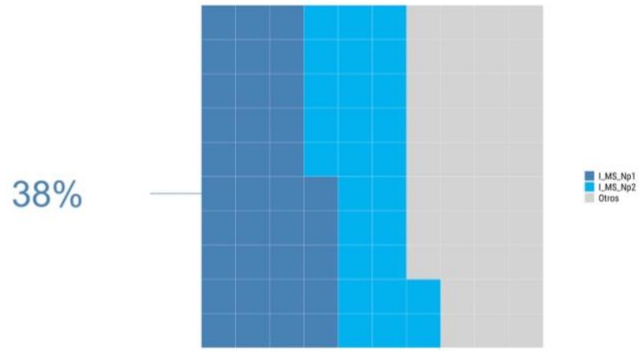
Al retirar el periodo constructivo de la tipología y considerar solo el sistema estructural y el número de pisos, se obtiene que el 70% de las construcciones en la cuenca pertenecen a dos grupos tipológicos (ver Figura 15 y Figura 16): (1) mampostería simple de un piso con el 40% de las construcciones y (2) mampostería simple de dos pisos con el 30%.

*Figura 15. Cantidad de construcciones según tipo de Sistema estructural*




borrador

*Figura 16. Porcentaje de construcciones por sistema estructural*

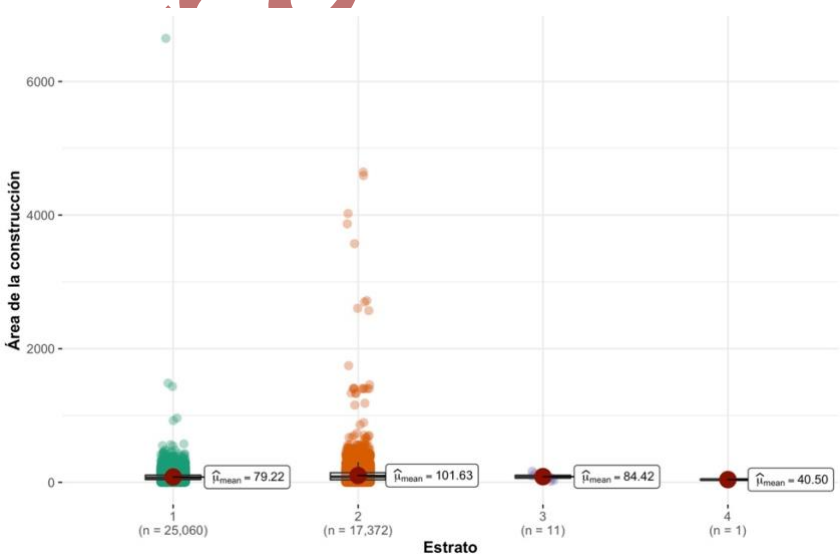



## 4.4 Valor de las construcciones de tipo residencial

El valor de las construcciones de tipo residencial se obtuvo de la capa de avalúo comercial y catastral disponible en IDECA cuya última actualización disponible para este análisis corresponde al 1 de enero de 2019. La información de UAECD está a nivel de manzana por lo cual, a las construcciones se les asignó el valor por metro cuadrado de las manzanas y según el área de la construcción, se obtuvo el valor total.

La Figura 17 muestra los diagramas de caja para el área de las construcciones según estrato. Dentro de la cuenca solo se identificaron 12 construcciones que tienen asignado el estrato 3 y 4. Las construcciones de estrato 1 muestran un área promedio menor ($\mu_{mean}$) que las de estrato 2. Sin embargo, hay construcciones de áreas hasta 6650 metros cuadrados correspondientes a edificios de conjuntos residenciales.

*Figura 17. Diagramas de caja del área construida de construcciones residenciales según estrato. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*




Borrador V 1

En el caso de las construcciones que no tienen datos de la UAECD (construcciones identificadas mediante interpretación de la ortofoto 2019 y no contenidas en la información disponible en IDECA), el valor del metro cuadrado se tomó como el valor promedio del estrato 1 (las construcciones nuevas son viviendas informales). La Figura 18 y la Figura 19 muestran los diagramas de caja y de violín de la distribución de valores de avalúo catastral y comercial. Ambos valores serán incluidos en la base de datos de construcciones existentes en la cuenca.

*Figura 18. Diagramas de caja del avalúo catastral según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*

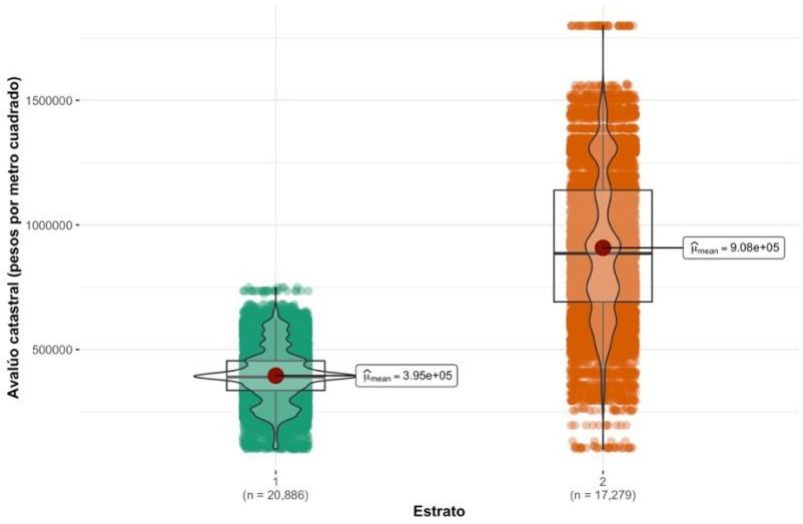
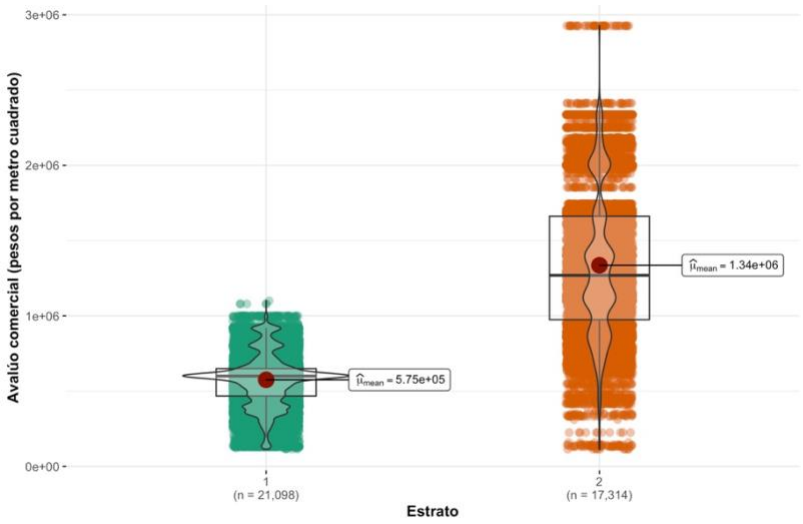



*Figura 19. Diagramas de caja del avalúo comercial según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Limas. Fuente de datos: Unidad A. Especial de Catastro Distrital (2021)*

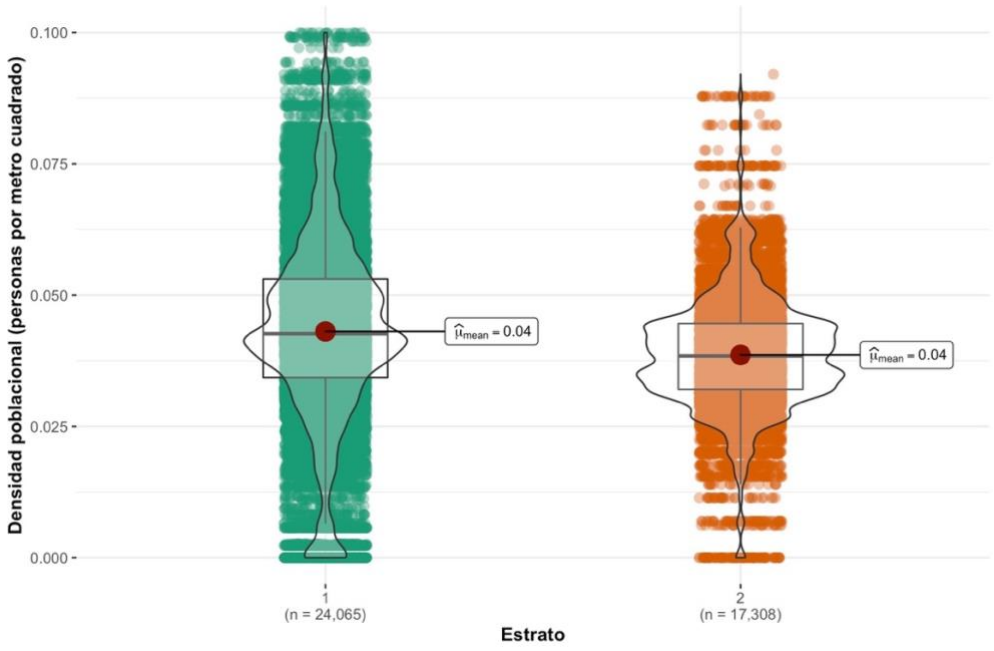


Cabe mencionar que muchos estudios de riesgo utilizan como valor de los elementos expuestos el costo de reposición, otros utilizan el valor presente neto (ver por ejemplo, (Wu y Guo 2021)) y otros utilizan el avalúo comercial (ver por ejemplo, (Arrighi et al. 2020). Por ejemplo la USACE en Estados Unidos el valor de las estructuras se estima como el costo de reemplazo depreciado (Marvi 2020). En este análisis se ha estimado el avalúo catastral y comercial ya que es consistente con la evaluación de riesgo de otras amenazas en Bogotá (el riesgo sísmico utiliza el avalúo catastral), pero se recomienda que a futuro se evalúe la posibilidad de utilizar el valor de reemplazo y se avance en una metodología para estimarlo.

## 4.5 Población

La población se obtuvo de la capa del censo 2018 del DANE[7]. La capa del DANE está disponible a nivel de manzana por lo cual se obtuvo la densidad por metro cuadrado en cada manzana y la población se asignó a cada construcción proporcional al área. Aunque las densidades poblacionales son ligeramente menores en el estrato 2 (ver Figura 20), el redondeo a dos decimales de la densidad produce un valor promedio ($\mu_{mean}$) de 0.04 personas por metro cuadrado para todas las viviendas de la cuenca de la quebrada Limas. Este valor se utilizó para estimar la población en las viviendas para las cuales no se tiene información del censo. Este enfoque resultó en un estimado de población para la cuenca de 186,529 personas.

*Figura 20. Densidad poblacional por estrato*




[7] https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata

## 4.6 Archivo shape de tipología estructural, valor de elementos y población

De los resultados de las secciones anteriores se generó un archivo shape con los campos fundamentales para el análisis de riesgo: a) la tipología de la construcción; b) el valor de la construcción y c) población. Este archivo constituye la base de datos de exposición de construcciones residenciales de la cuenca de la quebrada Limas no solo para evaluaciones posteriores de riesgo por inundación y avenida torrencial sino para riesgo sísmico ya que no se limita a las construcciones localizadas en zonas de exposición a inundaciones, sino que cubre toda la cuenca.

La Tabla 2 muestra la estructura de la tabla de atributos del archivo shape generado para todas las construcciones existentes de la cuenca. Los primeros dos campos corresponden a los códigos completos de la construcción (CONCODIGO) y del lote (LOTECOD); posteriormente se muestran el número de pisos (CONNPIS); la abreviatura del sistema estructural (SEAbr); la tipología para amenaza sísmica (TypoSis) y para inundaciones (TypoInun); código de la manzana (COD_MAN_AV); avalúos comercial (AVALUO_COM) y catastral (AVALUO_CAT); valores estimados catastral (VALFISca) y comercial (VALFISco); código de manzana del DANE (COD_DANE_A); población estimada (Pop); densidad poblacional de la manzana (Dens); estrato socio-económico (ESoEstrato) y grupo de uso (UsoClase).

*Tabla 2. Tabla del archivo shape generado con las construcciones existentes en la cuenca de la quebrada Limas*

| Llave | CONCODIGO | LOTECOD | CONNPIS | SEAbr | TypoInun | COD_MAN_AV | AVALUO_COM | AVALUO_CAT | VALFISco | VALFISca | COD_DANE_A | Pop | Dens | ESoEstrato | UsoClase | TypoSis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 92017 | 00243200202300000000000000 | 002432002023 | 2 | MS | I_MS_Np2 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 126748403.... | 93379543.52... | 11001100000000025660101 | 3.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MS_Np2_P... |
| 13268 | 00243200202100000000000000 | 002432002021 | 2 | MS | I_MS_Np2 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 132474050.... | 97597808.13... | 11001100000000025660101 | 3.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MS_Np2_P... |
| 21369 | 00243200200500000000000000 | 002432002005 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 138259724.... | 101860296.4... | 11001100000000025660101 | 3.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |
| 101425 | 00243200200800000000000000 | 002432002008 | 2 | MS | I_MS_Np2 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 160806543.... | 118471248.2... | 11001100000000025660101 | 4.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MS_Np2_P... |
| 40492 | 00243200200400000000000000 | 002432002004 | 3 | MS | I_MS_Np3 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 164129248.... | 120919189.3... | 11001100000000025660101 | 4.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MS_Np3_P... |
| 107814 | 00243200202200000000000000 | 002432002022 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 164950659.... | 121524349.3... | 11001100000000025660101 | 4.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |
| 102093 | 00243200201100000000000000 | 002432002011 | 3 | MS | I_MS_Np3 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 169056224.... | 124549048.5... | 11001100000000025660101 | 4.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MS_Np3_P... |
| 107811 | 00243200201000000000000000 | 002432002010 | 3 | MS | I_MS_Np3 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 184040917.... | 135588743.5... | 11001100000000025660101 | 4.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MS_Np3_P... |
| 101364 | 00243200201400000000000000 | 002432002014 | 5 | PCR | I_PCR_Np5 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 216257547.5... | 159323750.4... | 11001100000000025660101 | 5.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_PCR_Np5_... |
| 107813 | 00243200200100000000000000 | 002432002001 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 256729555.... | 189140754.1... | 11001100000000025660101 | 6.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |
| 76089 | 00243200202000000000000000 | 002432002020 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 269410238.... | 198483013.2... | 11001100000000025660101 | 6.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |
| 89451 | 00243200201900000000000000 | 002432002019 | 4 | PCR | I_PCR_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 273086920.... | 201191740.4... | 11001100000000025660101 | 6.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_PCR_Np4_... |
| 61599 | 00243200201800000000000000 | 002432002018 | 4 | PCR | I_PCR_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 276842740.... | 203958771.6... | 11001100000000025660101 | 7.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_PCR_Np4_... |
| 101390 | 00243200201700000000000000 | 002432002017 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 281546046.... | 207423845.2... | 11001100000000025660101 | 7.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |
| 54068 | 00243200201600000000000000 | 002432002016 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 286136160.... | 210805526.9... | 11001100000000025660101 | 7.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |
| 13693 | 00243200201500000000000000 | 002432002015 | 4 | PCR | I_PCR_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 289554577.... | 213323982.4... | 11001100000000025660101 | 7.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_PCR_Np4_... |
| 104904 | 00243200201200000000000000 | 002432002012 | 4 | MC | I_MC_Np4 | 002432002 | 1237368.0... | 911608.0... | 301961402.... | 222464480.... | 11001100000000025660101 | 7.00... | 0.029... | 2 | Residencial | S_MC_Np4_P... |

Borrador V1

# 5 Vulnerabilidad

## 5.1 Curvas de vulnerabilidad

Existen pocos estudios que describen la vulnerabilidad de elementos expuestos ante impactos generados por inundaciones súbitas y flujos en el rango de la hiperconcetración y los flujos de detritos (Thouret et al. 2014). Particularmente, hay una gran escasez de información en el medio colombiano. Generalmente, las curvas se obtienen de recopilación de datos en campo luego de que ocurre un evento permitiendo construir la relación entre el daño de la estructura y la magnitud de la amenaza. Sin embargo, la extrapolación de estos métodos y criterios para permitir la evaluación de la vulnerabilidad física en un área diferente donde no hay registros introduce una alta incertidumbre en el análisis (Thouret et al. 2014). En general las curvas de vulnerabilidad son específicas para cada sitio y no son siempre transferibles (Fuchs et al. 2019; Cammerer et al. 2013).

Además de la limitación en número de estudios, también existen limitaciones en cuanto a que (Fuchs et al. 2019): i) algunos estudios no describen con suficiente detalle el tipo de construcciones para las cuales se desarrollan las curvas, lo que hace que las curvas propuestas no sean aplicables (por ejemplo, Azmeri e Isa 2018b; Zhang et al. 2018); ii) los métodos de cálculo de las curvas difieren de un estudio a otro; y iii) algunos métodos agregan resultados de construcciones con diferente número de pisos. Muchos de los estudios utilizan como parámetro de intensidad la profundidad de flujo sin incluir la velocidad o un parámetro de impacto (Fuchs et al. 2019; Marvi 2020; Cammerer et al. 2013) lo que podría hacer que la curva sea más difícil de aplicar a otras áreas donde las velocidades que se desarrollan en el evento son diferentes a las que se alcanzan en el área donde se desarrolló la curva (Malgwi et al. 2020). Sin embargo, vale pena resaltar que la mayoría de curvas de vulnerabilidad para inundaciones (tanto lentas como súbitas) y flujos de detritos utilizan la profundidad del flujo como único parámetro de intensidad de la curva de vulnerabilidad (Fuchs et al. 2019; Eidsvig et al. 2014).

Según Romali et al. (2015) los daños resultantes de una inundación súbita o avenida torrencial depende de las características de la inundación incluyendo: profundidad del agua, velocidad, duración, contenido de sedimentos, área cubierta por la inundación, existencia de sistema de alerta. Debido a que en la quebrada Limas no existe un sistema de alerta específico para la cuenca, este aspecto no será considerado. En cuanto al contenido de sedimentos, de las evaluaciones preliminares se ha concluido que los flujos dominantes en la cuenca corresponden a agua clara y existe la posibilidad de algún grado de concentración de sedimentos, pero se espera que los rangos de concentración sean relativamente bajos sin alcanzar valores cercanos a los flujos de lodos/detritos. Esta suposición inicial será confirmada por los estudios de amenaza detallada que son posteriores al presente análisis.

Para identificar curvas de vulnerabilidad aplicables al caso de la quebrada Limas, se realizó una revisión literatura y de bases de datos de curvas de vulnerabilidad disponibles.

Borrador V1

En la revisión de curvas de vulnerabilidad para amenazas torrenciales llevada a cabo por Fuchs et al. (2019) se observa que la mayoría de las curvas han sido desarrolladas para construcciones en países europeos, cuyas características difieren significativamente del tipo de construcciones en la cuenca de la quebrada Limas. Lo et al. (2012) desarrollaron curvas de vulnerabilidad para viviendas de un piso de mampostería con columnas con concreto reforzado y mampostería simple en Taiwan para flujos de detritos. Las curvas de vulnerabilidad desarrolladas por Lo et al. (2012) se muestran en el ANEXO B y serán consideradas como una alternativa para la cuenca de la quebrada Limas en caso de que existan áreas de la cuenca en donde se puedan presentar flujos de detritos.

Prieto et al. (2018) desarrolló una curva de fragilidad[8] para edificaciones de mampostería simple que validó en Colombia. La curva usa como parámetro de intensidad el producto de la profundidad por la velocidad al cuadrado, y considera solamente el daño total (ver ANEXO B).

En Latinoamérica se han adelantado esfuerzos para construir curvas de daño para inundaciones. Pero principalmente han estado asociadas a inundaciones lentas. Por ejemplo, en el contexto de México, Salas (2011) presenta curvas de vulnerabilidad a inundaciones lentas por tipología de viviendas mexicanas con base en la profundidad de flujo. Sin embargo, no se presenta información sobre la metodología utilizada para construirlas.

En Nueva Zelanda el proyecto Riskscape (Reese y Ramsay 2010) generó curvas de vulnerabilidad para varios tipos constructivos. Las construcciones en mampostería en Nueva Zelanda generalmente tienen un pórtico en madera por lo cual a pesar de ser viviendas de mampostería son muy poco resistentes a las inundaciones. Aunque los métodos constructivos son diferentes, las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en Nueva Zelanda para viviendas en mampostería se compilaron para potencialmente ser utilizadas para describir la vulnerabilidad de viviendas de mampostería simple. Una de las ventajas de las curvas desarrolladas en Nueva Zelanda es que son de las pocas existentes en la literatura que consideran la velocidad del flujo junto con la profundidad como parámetros de la curva y están disponibles para 1 y 2 pisos. El proyecto Riskscape también generó curvas para viviendas en concreto y mampostería reforzada, estas también fueron compiladas (ver ANEXO B), aunque en la cuenca existen muy pocas viviendas de este tipo.

Mason et al. (2010) desarrollaron curvas para Australia considerando diferentes sistemas estructurales comúnmente usados en ese país y estudiaron la influencia de la velocidad en el daño de las construcciones. Sin embargo, los métodos constructivos y sistemas estructurales son significativamente diferentes a los utilizados en Bogotá en la cuenca de la Quebrada Limas.

Borrador V1

[8] Las funciones de fragilidad describen la probabilidad de exceder un umbral de estado de daño en un rango de valores de intensidad de la amenaza para una determinada tipología estructural (Prieto et al. 2018) (Nofal et al. 2020).

La plataforma CAPRA ofrece una base de datos de curvas de vulnerabilidad (www.ecapra.org). Las curvas de inundaciones están definidas con un único parámetro correspondiente a la profundidad de flujo con parámetros ajustables para definir la curva. De la revisión de literatura del uso de las curvas de la plataforma CAPRA, Ordaz et al. (2013) muestran las curvas usadas por Jaimes et al. (2011) para viviendas de materiales débiles (no se especifica que tipo de materiales) de dos pisos con cubierta ligera. Sin embargo, las curvas presentadas en ese estudio muestran niveles de daño muy bajos en comparación con otras curvas desarrolladas incluso para viviendas más resistentes. Para el estudio de riesgo por inundación en la cuenca del río Tocumen en la ciudad de Panamá JBA (2019) utilizó las curvas disponibles en la base de datos de CAPRA. Las tipologías estructurales de este estudio incluyeron viviendas de mampostería de 1 y 2 pisos, edificaciones en madera de 1 y 2 pisos y edificaciones de tierra de 1 y 2 pisos. Una de las limitaciones del estudio fue que las curvas se extrajeron de la base de datos de CAPRA sin que hubieran sido desarrolladas para el sitio del proyecto, sin embargo, se utilizaron como una primera aproximación y considerando que fueron las más aplicables de las existentes en la literatura. Estas curvas se encuentran compiladas en el ANEXO B.

Huizinga et al. (2017) desarrollaron una base de datos global de curvas de vulnerabilidad ante inundaciones. Los datos usados para el desarrollo de las curvas comprenden inundaciones fluviales y costeras, pero no están asociadas a un tipo específico de inundación por lo cual los autores recomiendan el uso de estas curvas solo para un primer análisis de un evento genérico de inundaciones.

Para el estudio de inundaciones súbitas y avenida torrencial de la cuenca alta del río San Cristóbal, la UNAL (2006) desarrolló modelos en ETABS de estructuras de pórtico en concreto de dos pisos, mampostería no confinada de un piso, sistemas en mampostería de dos pisos, estructuras en madera de un piso y estructuras prefabricadas de un piso. Los modelos incluyeron las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas para un rango de concentraciones de flujo. Sin embargo, la UNAL (2006) concluyó de las modelaciones que la diferencia entre densidades era insignificante por lo cual sus resultados finales corresponden a las modelaciones únicamente con agua. Esta conclusión es consistente con los análisis de Totschnig y Fuchs (2013) que encontraron en torrentes en Austria que el tipo de proceso geomorfológico (transporte fluvial de sedimentos y flujo de detritos) tuvo poca influencia en las curvas de daño para residencias y alojamientos turísticos y tampoco encontraron diferencias significativas en las curvas de daño de los dos tipos de construcciones por lo cual recomendaron utilizar una sola curva para los dos tipos de proceso torrencial (transporte fluvial de sedimentos y flujo de detritos) y los dos tipos de construcciones, utilizando como parámetro de intensidad la profundidad del depósito. Totschnig y Fuchs (2013) concluyeron que no hay necesidad de distinguir entre los diferentes procesos torrenciales con carga de sedimentos cuando se evalúa la vulnerabilidad física de construcciones residenciales con la salvedad de que esta distinción si es necesaria para el desarrollo de medidas de mitigación y la evaluación de vulnerabilidad de otro tipo de infraestructura y personas.

Borrador V1

Las curvas de vulnerabilidad presentadas por UNAL (2006) fueron obtenidas utilizando las derivas de la estructura generada por la presión hidrodinámica e hidrostática como dato de entrada para las curvas de Periodo de la Estructura (Ta) vs deriva. Estas curvas son las únicas identificadas de la revisión de literatura para la ciudad de Bogotá ante inundaciones súbitas y avenida torrencial y fueron compiladas en el ANEXO B. Sin embargo, es importante mencionar que estas curvas tienen grandes limitaciones debido a que los daños que producen las inundaciones no solamente se generan por el desplazamiento de la estructura, sino que diferencias de altura de agua entre el exterior y el interior de las viviendas es una causa común de la falla de las estructuras[9] y los daños también pueden producirse por el contacto de los materiales con el agua (HNFMSSC 2006). De otro lado los daños en el interior ocurren a pesar de que no se produzcan daños en la estructura.

Idealmente, no solo las características físicas de la construcción deben tenerse en cuenta sino también los contenidos. Sin embargo, contar con información específica de los contenidos para cada construcción tiene limitaciones. La única forma de obtener ese nivel de datos es a través de obtener los datos de campo para cada construcción individualmente, lo que es demasiado costoso para áreas grandes. Por lo tanto, generalmente la información disponible se limita a la información básica de la construcción. Las aproximaciones al daño de contenidos que se presentan en la literatura se basan en suposiciones sobre el tipo de contenidos de la vivienda y en el caso de viviendas de dos o más pisos en la dependencia del daño de los contenidos del área disponible en los pisos superiores y de la distribución de los contenidos en los diferentes pisos (Reese y Ramsay 2010). Baró-Suárez et al. (2011) generaron una base de datos para zonas habitacionales de México con el número de bienes existentes dentro de las viviendas, incluyendo electrodomésticos, automóviles, computadores, mobiliarios y ropa y definieron los contenidos para una vivienda tipo, su valor monetario y el porcentaje de afectación de los bienes en función de la profundidad de flujo. Para las viviendas con el índice de marginación más alto (condiciones de pobreza más alto) el porcentaje de afectación estimado por Baró-Suárez et al. (2011) se muestra en la Tabla 3. Este tipo de ejercicio es necesario en Bogotá para estimar los daños a los contenidos. Ante la falta de información, algunos autores han utilizado un porcentaje o tasa de daño de los contenidos con respecto a los daños en la estructura. En ciudad de Panamá por ejemplo, JBA (2019) utilizó la proporción entre el daño de la estructura y el daño a contenidos propuesta por el Manual Multicolor de Reino Unido - Multi-Coloured Manual (Flood Hazard Research Centre 2010) ajustado, considerando que no hay daños a contenidos por debajo de una profundidad de 0.1 m. Esto para tener en cuenta que en Panamá no hay alfombrado de las viviendas que es uno de los aspectos que genera daños a poca

Borrador V1

[9] La USACE ha mostrado ejemplos de como se requieren diferencias de nivel de flujo pequeñas (0.57-1 m) entre el interior y el exterior de viviendas para que se produzca la falla de muros de concreto. Otros autores han sugerido rangos de entre 0.8 y 2m de diferencia para que se produzca la falla de los muros (Mason et al. 2010).

profundidad. Esta es la misma situación de las viviendas en la quebrada Limas, por lo que ante la poca disponibilidad de datos se propone como alternativa utilizar el ajuste propuesto por JBA (2019) mosteado en la Tabla 4.

*Tabla 3. Porcentaje de afectación por inundación de una vivienda localizada en una zona de índice de marginación muy alto. Fuente: (Baró-Suárez et al. 2011)*

| IM muy alto | Altura de lámina de agua (m) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bienes en la vivienda | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.50 | 0.70 | 1.00 | 2.50 |
| Radio o radiograbadora | | | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| TV | | | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Videocasetera | | | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Licuadora | | | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Refrigerador | | 70 | 80 | 90 | 100 | 100 | 100 |
| Lavadora | | 70 | 80 | 90 | 100 | 100 | 100 |
| Teléfono | | | | | | 100 | 100 |
| Bóiler | | | | | 90 | 100 | 100 |
| Automóvil | | 10 | 20 | 50 | 60 | 70 | 100 |
| Computadora | | 50 | 60 | 70 | 90 | 100 | 100 |
| Estufa | | | | 90 | 100 | 100 | 100 |
| Sala-comedor | 10 | 30 | 50 | 80 | 100 | 100 | 100 |
| Recámaras-colchón | | | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Ropa | | | 50 | 100 | 100 | 100 | 100 |

*Tabla 4. Tasa de daños a contenidos/daños a la estructura en función de la profundidad. Fuente: (JBA 2019)*

| Profundidad (m) | Tasa de daño a contenidos/ Daños a la estructura |
|---|---|
| 0.1 | 0 |
| 0.2 | 0.93 |
| 0.3 | 0.77 |
| 0.6 | 0.72 |
| 0.9 | 0.71 |
| 1.2 | 0.64 |
| 1.5 | 0.59 |
| 1.8 | 0.59 |
| 2.1 | 0.54 |
| 2.4 | 0.50 |
| 2.7 | 0.43 |
| 3 | 0.40 |

Borrador

Las curvas de vulnerabilidad compiladas se presentan en el ANEXO B. Se recomienda que durante el análisis de riesgo se utilice no una sino la mayor cantidad de curvas posible de las compiladas en este informe y se evalúe la sensibilidad de los resultados de riesgo.

## 5.2 Vulnerabilidad de las personas

Existen pocos estudios sobre la mortalidad y la tasa de heridos para inundaciones. Algunos estudios indican que la mayoría de las muertes causadas por inundaciones

ocurren por ahogamiento y muchas de ellas ocurren en vehículos cuando las personas conducen en las vías inundadas (Reese and Ramsay 2010). Sin embargo, hay muy poca información sobre las muertes causadas por enfermedades generadas por las inundaciones. Los factores que afectan la pérdida de vidas o el número de heridos y su modelamiento son extremadamente complejos. Debido a la falta de información de la vulnerabilidad de las personas, el análisis de riesgo por inundación y avenidas torrenciales en la quebrada Limas se limitará a estimar la exposición de personas sin llegar a estimaciones de muertes o heridos. Se recomienda que este paso se adopte en el futuro cuando se cuente con mayor información y puedan desarrollarse modelos de riesgo para la vida de las personas ante este tipo de amenazas.

### 5.3 Indicadores

La vulnerabilidad física ha sido identificada como el origen para las otras dimensiones de la vulnerabilidad (Malgwi et al. 2020). Sin embargo, como se mencionó en las secciones anteriores, la falta de datos sobre el daño esperado según la intensidad de las inundaciones en la zona de estudio es un factor que introduce un alto nivel de incertidumbre. Bajo estas condiciones, varios autores han planteado que el uso de grados de daño cualitativos e indicadores podría ser más adecuado para los análisis de vulnerabilidad ya que no dependen de información sobre daños en términos económicos.

El uso de indicadores se enfoca en identificar y entender los factores principales que contribuyen a la configuración de la vulnerabilidad. Este tipo de enfoque permite un análisis integrado y puede extenderse al análisis multiamenaza y es particularmente útil en áreas donde no existe información de daños o esta es muy limitada (Godfrey et al. 2015).

Para seleccionar las variables para la construcción de indicadores se realizó una revisión de literatura y se identificaron aquellas que han sido reportadas como relevantes en la definición de la vulnerabilidad física de construcciones ante inundaciones y avenidas torrenciales. Un requerimiento adicional es que todas las variables deben estar disponibles para cada construcción de la cuenca.

Dentro de los indicadores reportados por varios autores para evaluar la vulnerabilidad física se encuentran: aplicación de códigos constructivos, sistema de transporte, material del techo, material de muros y piso, posición de la construcción en relación con el nivel de la calle, proporción de espacios verdes por edificio, tipo de edificación, uso de la edificación, condición de la edificación (considerando edad y mantenimiento), material constructivo, número de pisos, heterogeneidad de la manzana (usando tamaño de la edificación y uso), forma de la manzana, densidad de construcciones, elongación de la construcción (alto/ancho), compacidad, proximidad, presencia de sótanos, número de aberturas, calidad de la construcción, cobertura del suelo alrededor de la construcción (Malgwi et al. 2020).

Godfrey et al. (2015) compararon varios indicadores e identificaron su relevancia para diferentes amenazas incluyendo inundaciones súbitas y flujos de detritos, el resultado de

Borrador V 1

esta comparación se muestra en la Tabla 5, complementado con un ejercicio similar desarrollado por Kappes et al. (2012).

*Tabla 5. Comparación de relevancia de indicadores según amenaza. Fuente: Godfrey et al. (2015) y* Kappes et al. (2012). *En azul oscuro se encuentran resaltados los indicadores disponibles y con alta importancia (A) para el análisis de inundación súbita y flujos de detritos, en azul más claro se encuentran los indicadores de importancia media (M). La letra B corresponde a la categoría de baja importancia.*

| Indicador de vulnerabilidad física | Inundación fluvial | Inundación súbita | Deslizamientos | Flujos de detritos |
|---|---|---|---|---|
| Altura de la construcción | A | A | B | M |
| **Número de pisos** | **A** | **A** | **B** | **M** |
| Numero de ventanas y puertas | A | A | | A |
| Puertas y ventanas en la dirección de la ladera | A | M | M | A |
| Altura de puerta o ventana más baja | A | M | - | M |
| **Tamaño de la construcción** | **L** | **M** | **M** | **M** |
| **Sistema estructural** | **M** | **M** | **A** | **A** |
| Tipo de cimentación | B | B | A | M |
| Profundidad de la cimentación | B | M | A | M |
| **Material de muros** | **M** | **A** | **M** | **A** |
| Calidad de la construcción | M | A | M | A |
| Mantenimiento | B | M | M | M |
| Presencia de sótano* | A | A | B | M |
| Grietas en la estructura | B | M | H | M |
| Muro alrededor de la construcción* | A | A | M | M |
| Localización en ladera* | - | B | A | M |
| Localización cerca a una ladera* | M | B | M | A |
| **Construcciones entre otras construcciones** | **-** | **A** | **B** | **A** |

Los indicadores en negrilla en la Tabla 5, son los que se encuentran disponibles para la cuenca de la quebrada Limas. Los indicadores que tienen un asterisco corresponden a aquellos que se encuentran disponibles pero que no se consideran relevantes para el análisis:

- Sótanos: en la cuenca no hay edificaciones con sótanos;
- Muros alrededor de las construcciones: tampoco existen muros alrededor de las construcciones con excepción de un parque;
- Localización en ladera o cerca a una ladera: este es un factor que se considera en la evaluación de amenaza a través de la simulación bidimensional del flujo en toda la cuenca;
- Altura de la construcción: al tomar como indicador el número de pisos no se considera necesario incluir también la altura de la construcción.

Borrador V1

Un factor importante tanto para inundaciones súbitas como para flujos de detritos es el número de ventanas y puertas, ya que una construcción es mas susceptible al daño y pérdidas si tiene puertas y ventanas localizadas en la dirección opuesta al flujo (Godfrey et al. 2015), sin embargo, esta información no está disponible lo mismo que la calidad de la construcción. Vale la pena mencionar que la calidad constructiva es una variable que se reconoce en la literatura como de gran importancia ya que el estado de la construcción es esencial para su integridad y estabilidad tanto frente a inundaciones como a procesos de remoción en masa (Godfrey et al. 2015; Totschnig y Fuchs 2013), por lo cual a futuro —cuando se cuente con la información— debería integrarse al análisis.

Ettinger et al. (2016) encontraron que la densidad de construcciones es una variable importante ya que densidades bajas implican que existen espacios entre las construcciones lo que crea rugosidad hidráulica y resistencia al flujo. Manzanas con baja densidad generalmente muestran más edificios dañados que las de alta densidad (Ettinger et al. 2016). Sin embargo, dado que los análisis de amenaza consideran la rugosidad producida por las edificaciones y permiten una estimación de las velocidades, se considera que este parámetro no requiere ser tenido en cuenta en los indicadores de vulnerabilidad. Ettinger et al. (2016) también encontró que la forma de la manzana es importante para la propagación del flujo y desviación de velocidades, sin embargo, de igual forma este efecto se considerará en la evaluación de la amenaza.

De la revisión de literatura realizada y la disponibilidad de información se escogieron como indicadores de la vulnerabilidad física de las construcciones (ver Tabla 6): (1) el número de pisos, (2) el tamaño de la construcción, (3) el sistema estructural, y (4) construcciones entre otras construcciones.

El material de muros no se incluyó como indicador debido a que hace parte del sistema estructural.

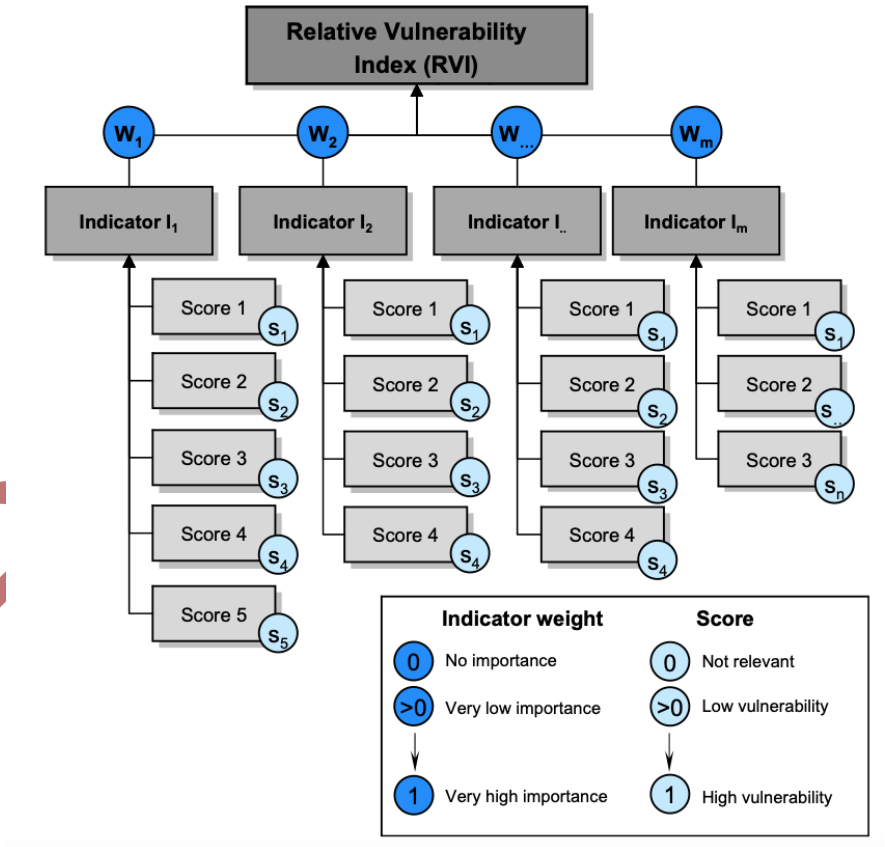
En cuanto al sistema estructural, como se mencionó en la sección 4.3, la mayoría de las construcciones son de mampostería simple, sin embargo también hay otros tipos de sistemas estructurales, por lo cual se asignará un puntaje al sistema estructural tomando como base la metodología presentada por Kappes et al. (2012) cuyo marco se muestra en la Figura 21.

Borrador V1

*Tabla 6. Variables consideradas para construir indicadores de vulnerabilidad física*

| Variable | Objetivo | Valor |
|---|---|---|
| Número de pisos | Para una profundidad de inundación específica la tasa de daño de una construcción es generalmente más alta en una construcción de un piso que en una de dos o más (Reese and Ramsay 2010) (Ettinger et al. 2016). Esta consideración es aplicable para cualquier tipo de flujo (inundaciones fluviales o flujos de detritos) debido a que en el caso de flujos de detritos generalmente entre más alta es la construcción, la posibilidad de daño debido a la entrada de material a través de las ventanas y puertas es menor (Godfrey et al. 2015). | 1-7 |
| Tamaño de la construcción | Edificios más grandes son más vulnerables que edificios pequeños debido a una mayor presencia y tamaño de orificios y generalmente menor cantidad de columnas (Ettinger et al. 2016). El tamaño de la construcción también fue seleccionado por (Godfrey et al. 2015) como uno de los indicadores para evaluar vulnerabilidad física ante inundaciones súbitas y flujos de detritos. | M2 |
| Sistema estructural | Según el tipo de estructura y material las construcciones muestran diferente respuesta a la presión dinámica causada por inundaciones y movimientos en masa (Godfrey et al. 2015). | 0-1 |
| Construcciones entre otras construcciones | Este criterio fue usado por (Godfrey et al. 2015) ya que construcciones que están adyacentes a otras tienen menos superficie de estructura expuesta al impacto directo del flujo y menos ventanas. Para medir este variable se propone utilizar el perímetro de la construcción no colindante con otra edificación. | metros |

*Figura 21. Marco metodológico para el cálculo de índices de vulnerabilidad. Fuente: Kappes et al. (2012)*




Revisión V1

El puntaje del sistema estructural se asignó en una escala de 0 (no relevante) a 1 (altamente vulnerable). Los sistemas estructurales que se identificaron en la cuenca se agruparon como se muestra en la Tabla 7, con puntajes basados en valores asignados en la literatura generados a través de juicio experto (Leal et al. 2021). Se buscó que las categorías de sistema estructural coincidieran en lo posible con las categorías definidas por Leal et al. (2021) que compila los trabajos previos de asignación de pesos para sistemas estructurales para inundaciones súbitas.

*Tabla 7. Categorías de sistemas estructurales y puntaje asignado*

| Categoría | Puntaje |
|---|---|
| Sin sistema estructural (SIN) o material de recuperación o madera | 1 |
| Adobe y bahareque | 0.9 |
| Mampostería simple, semiconfinada y prefabricada | 0.6 |
| Mampostería confinada, pórticos en concreto reforzado, reticular celulado, pórticos en concreto con muros de mampostería y mampostería reforzada | 0.3 |
| Concreto* | 0.1 |

*En la cuenca no existen viviendas en concreto, sin embargo se incluyó esta tipología estructural debido a que es utilizado por Kappes et al. (2012) y Leal et al. (2021) para asignar el puntaje de menor vulnerabilidad.

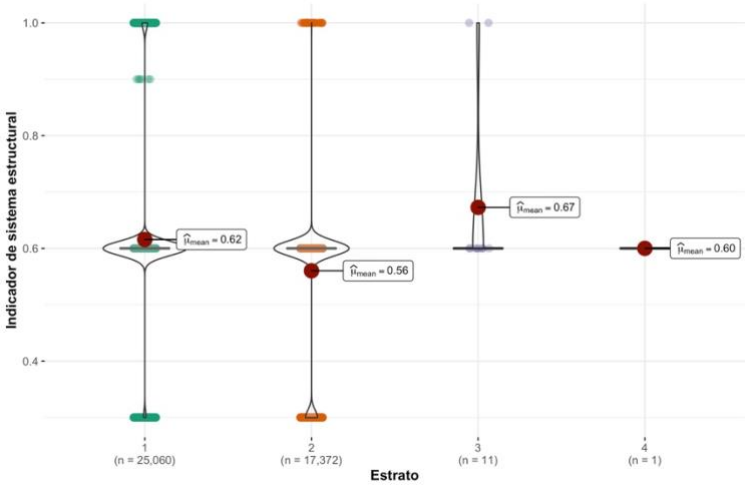
Los puntajes asignados recopilando el juicio experto presentados por Leal et al. (2021) y que son la base de la Tabla 7, reflejan las consideraciones sobre los materiales encontradas por otros autores:

1. Edificios de mampostería (simple, semiconfinada y confinada) son más vulnerables que edificaciones en concreto (Ettinger et al. 2016). En general edificaciones con muros de concreto ofrecen la mayor resistencia a las inundaciones y a los flujos de detritos; construcciones en madera tienden a flotar mientras que las de mampostería son más estables (Godfrey et al. 2015).
2. En general las viviendas de concreto y mampostería reforzada se consideran más resistentes a las inundaciones e incluso es uno de los tipos constructivos recomendados en zonas susceptibles a las inundaciones (Reese y Ramsay 2010).
3. La vulnerabilidad de viviendas construidas en mampostería simple es mayor que aquellas construidas en mampostería reforzada (Lo et al. 2012; Kang and Kim 2016).

Los diagramas de caja de los valores asignados a los sistemas estructurales de las construcciones de la cuenca se muestran en la Figura 22. La media de los valores se concentra en todos los estratos en valores cercanos a 0.6, esto porque la mayoría de las construcciones son de mampostería simple.

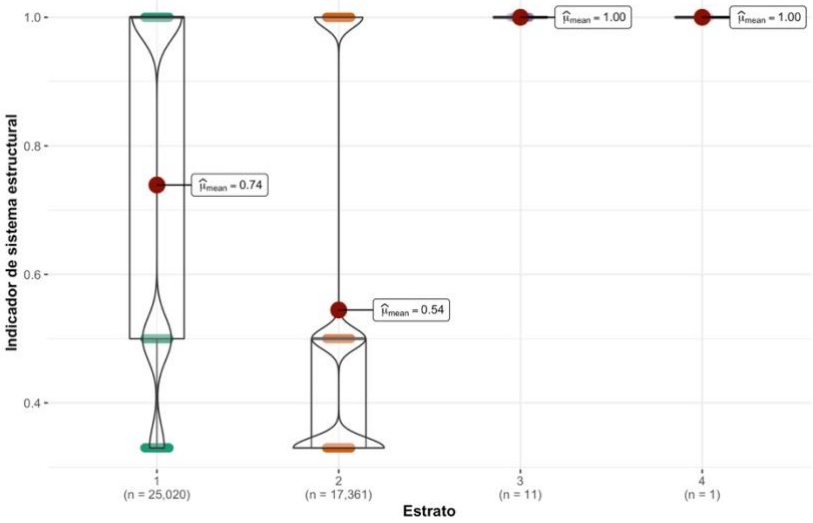
Borrador V 1

*Figura 22. Diagramas de caja de los valores del indicador de sistema estructural*



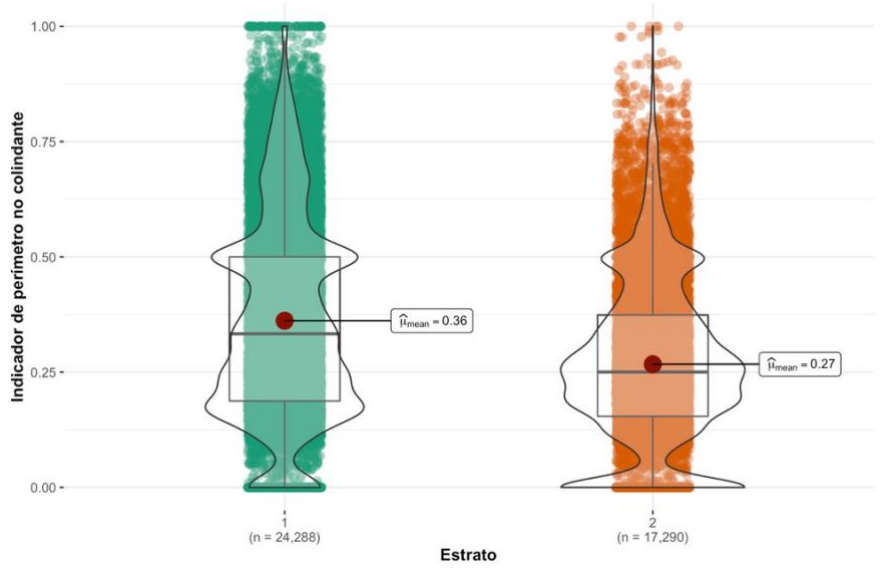

En lo que se refiere al número de pisos, se utilizaron los pesos propuestos por Leal et al. (2021) en donde para viviendas de 1 piso se asigna el mayor puntaje, es decir 1, para viviendas de 2 pisos 0.5 y para viviendas de 3 o más pisos 0.33, el diagrama de cajas de los pesos asignados se muestra en la Figura 23. La asignación del puntaje obedece al razonamiento de que edificios de un piso son afectados un 100% al estar expuestos a una inundación, edificios de 2 pisos generalmente son afectados en un 50% de su área en caso de que la inundación alcance una profundidad suficiente y edificios de 3 o más pisos se afectan en menor medida (Leal et al. 2021).

*Figura 23. Diagramas de caja de los valores del indicador de número de pisos*



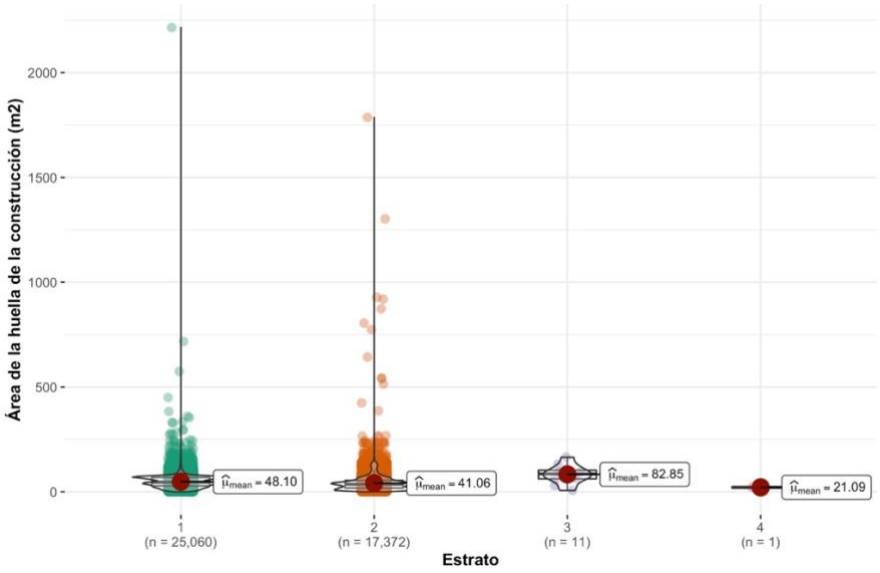
Para medir el criterio de construcciones entre construcciones, se calculó el porcentaje del perímetro de las construcciones que no colinda con otra construcción. Entre más alto es este porcentaje más expuesta está la vivienda al impacto directo del flujo. El diagrama de cajas de este indicador se muestra en la Figura 24.

*Figura 24. Diagramas de caja de los valores del indicador de perímetro no colindante*




Los valores del área de la huella del edificio que serán utilizados como indicador del tamaño de la construcción (Ettinger et al. 2016) se muestran por estrato en la Figura 25.

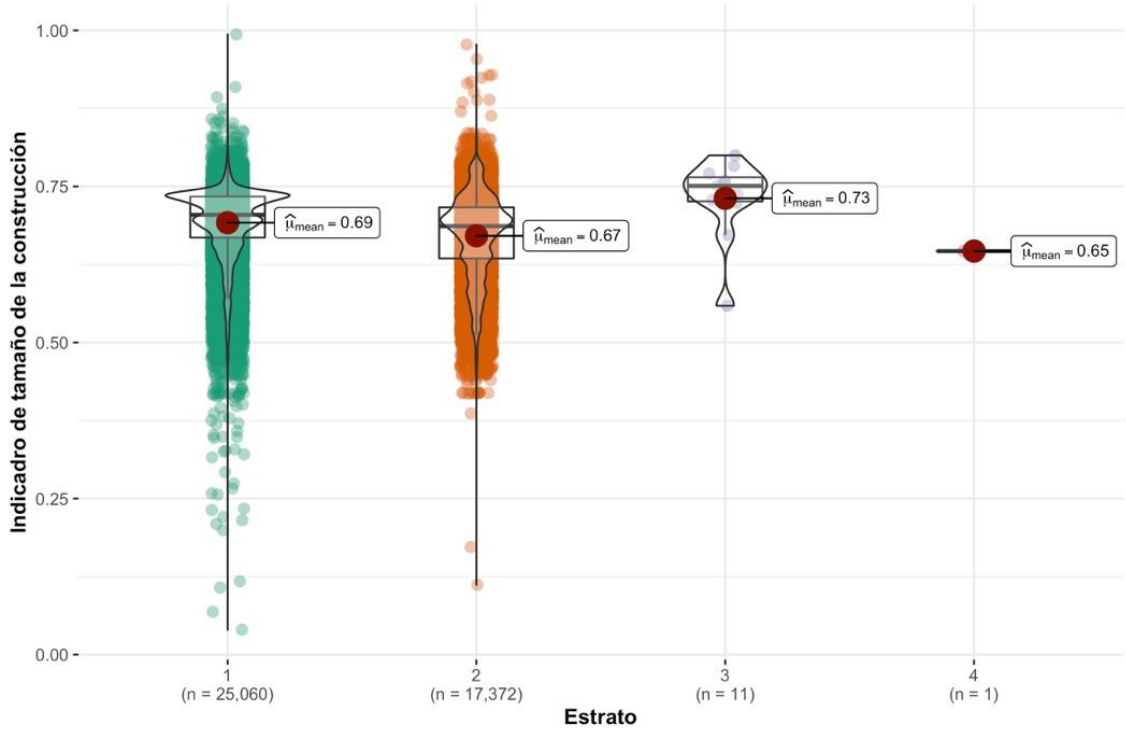
*Figura 25. Diagramas de caja del área de la huella de las construcciones*



Los diagramas de caja (Figura 25) muestran que en los estratos 1 y 2 se presentan valores extremos que generan una distribución altamente asimétrica. La asimetría de todo el conjunto de datos es 17.23 y la curtosis es 629.9. Para tratar los valores extremos se aplicó una transformación logarítmica antes de transformar los datos a una escala max-min (1-0) utilizando la Ecuación 1. Los valores transformados y normalizados se muestran en la Figura 26.

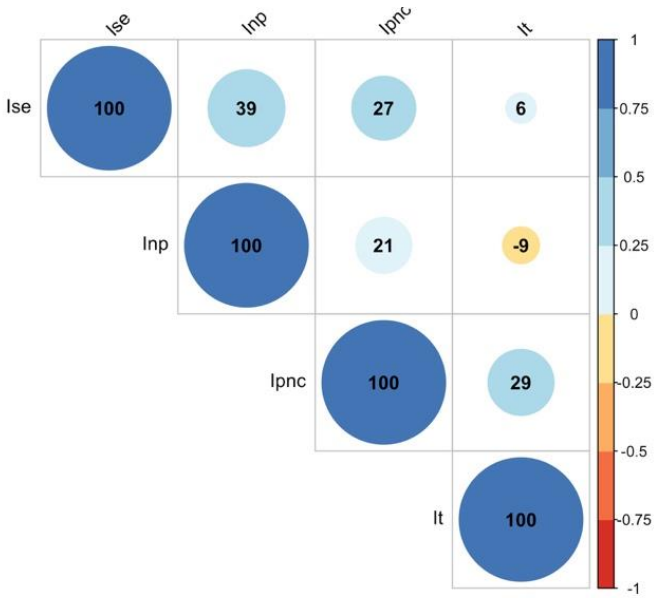
$$X_j = \frac{x_j - Min(x_j)}{Max(x_j) - Min(x_j)}$$ *Ecuación 1*

*Figura 26. Diagramas de caja de los valores del indicador de tamaño*




La matriz de correlación de los cuatro indicadores se muestra en la Figura 27. El valor máximo de correlación alcanzado es 39% entre el indicador de sistema estructural y el de número de pisos. Estos valores de correlación son bajos, e indican que cada indicador está midiendo aspectos diferentes y no relacionados de la vulnerabilidad física.

*Figura 27. Matriz de correlación de los indicadores*



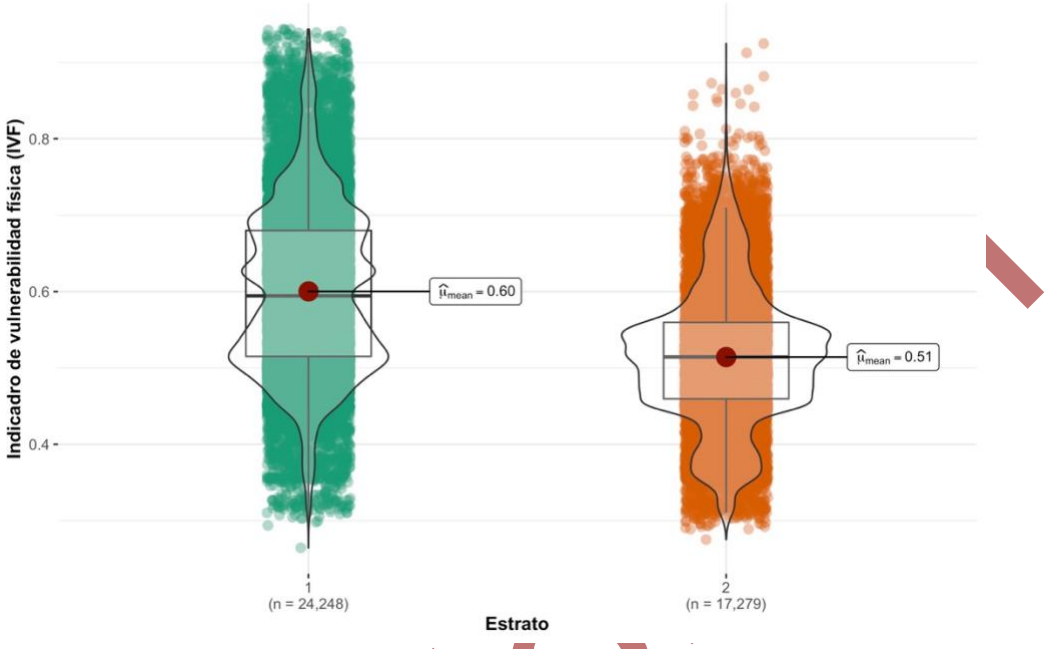

El sistema estructural ha sido identificado como uno de los factores más importantes en la vulnerabilidad de las construcciones ya que determina la fragilidad física y la resistencia al impacto del agua (Leal et al. 2021). Por esta razón algunos autores le han dado un peso mayor que a otros indicadores de evaluación de la vulnerabilidad física (ver por ejemplo (Leal et al. 2021)). Bajo esta consideración, para el análisis de la quebrada Limas se utilizará un peso para este indicador de 0.31 y a los demás indicadores un peso igual de 0.23. El indicador final estará dado por la combinación lineal de los cuatro indicadores como se muestra en la Ecuación 2 donde IVF es el indicador de vulnerabilidad física, Ise el indicador de sistema estructural, Inp el indicador del número de pisos, Ipnc el indicador de perímetro no colindante e It es el indicador de tamaño.

$$IVF = 0.31Ise + 0.23Inp + 0.23Ipnc + 0.23It \qquad \text{Ecuación 2}$$

La distribución de los valores del indicador se muestra en los diagramas de caja de la Figura 28. La distribución de los valores y la media muestran que las viviendas de estrato dos tienen en general un indicador de vulnerabilidad física (IVF) menor que las de estrato uno.

Borrador

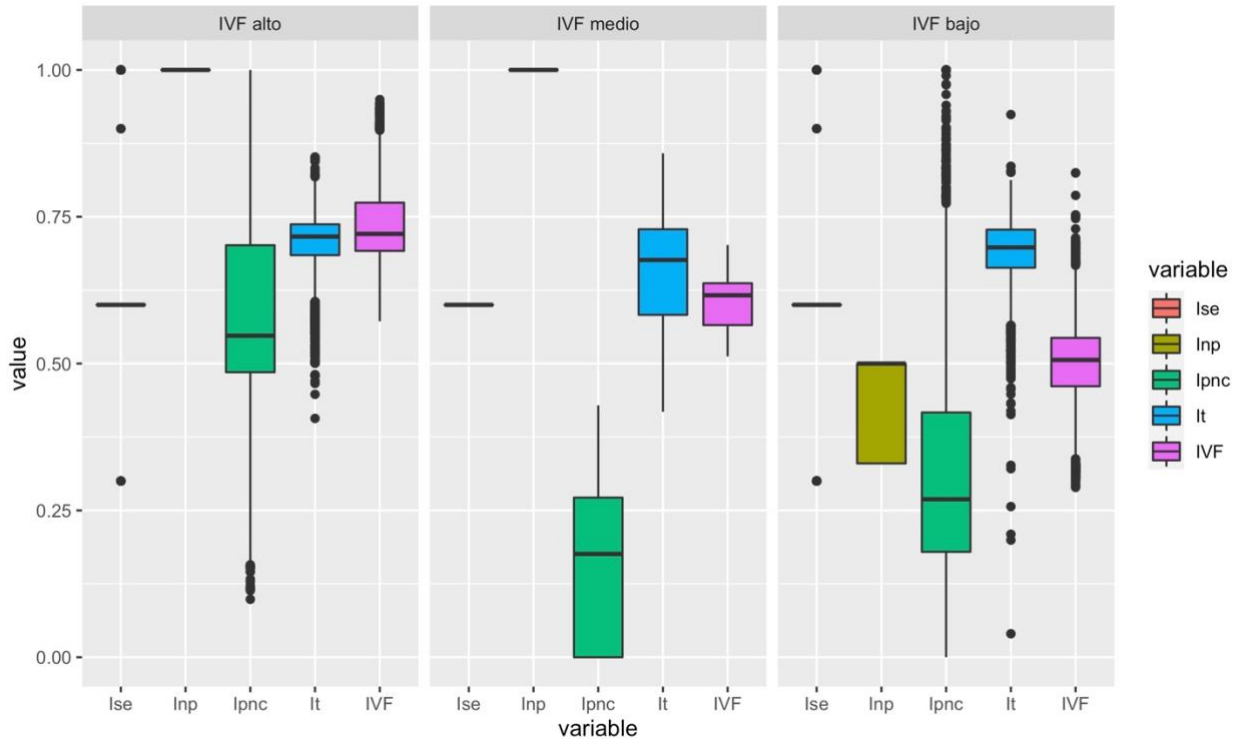
*Figura 28. Diagramas de caja del valor del indicador de vulnerabilidad física para las viviendas de la cuenca*




La distribución espacial del IVF se muestra en la Figura 31. Para identificar las características de grupos de construcciones agrupadas según los indicadores y el IVF, se utilizó agrupamiento jerárquico (Clustering Jerárquico o Hierarchical Clustering en inglés). El agrupamiento jerárquico es un método de data mining para agrupar datos. El algoritmo de clúster jerárquico agrupa los datos basándose en la distancia entre cada uno y buscando que los datos que están dentro de un clúster sean los más similares entre sí (Estrategias de Trading 2020). De esta forma, se obtienen grupos de construcciones con características de vulnerabilidad similares. El resultado del agrupamiento se muestra en la Figura 29. Se utilizaron 3 grupos que pudieron ser asociados a valores del IVF altos, medios y bajos. Los valores del IVF altos corresponden a construcciones de un solo piso con sistemas estructurales poco resistentes y porcentajes de perímetro no colindante con mediana por encima del 60%. Los valores de IVF medios corresponden a sistemas estructurales medianamente resistentes, de un solo piso y perímetros no colindantes inferiores al 27% en su mayoría. Los valores de IVF bajos corresponden a viviendas con sistemas estructurales medianamente y poco resistentes de más de un piso y con perímetros no colindantes inferiores al 35% en su mayoría. En cuanto al indicador de tamaño, este no es un discriminante significativo.

Borrador

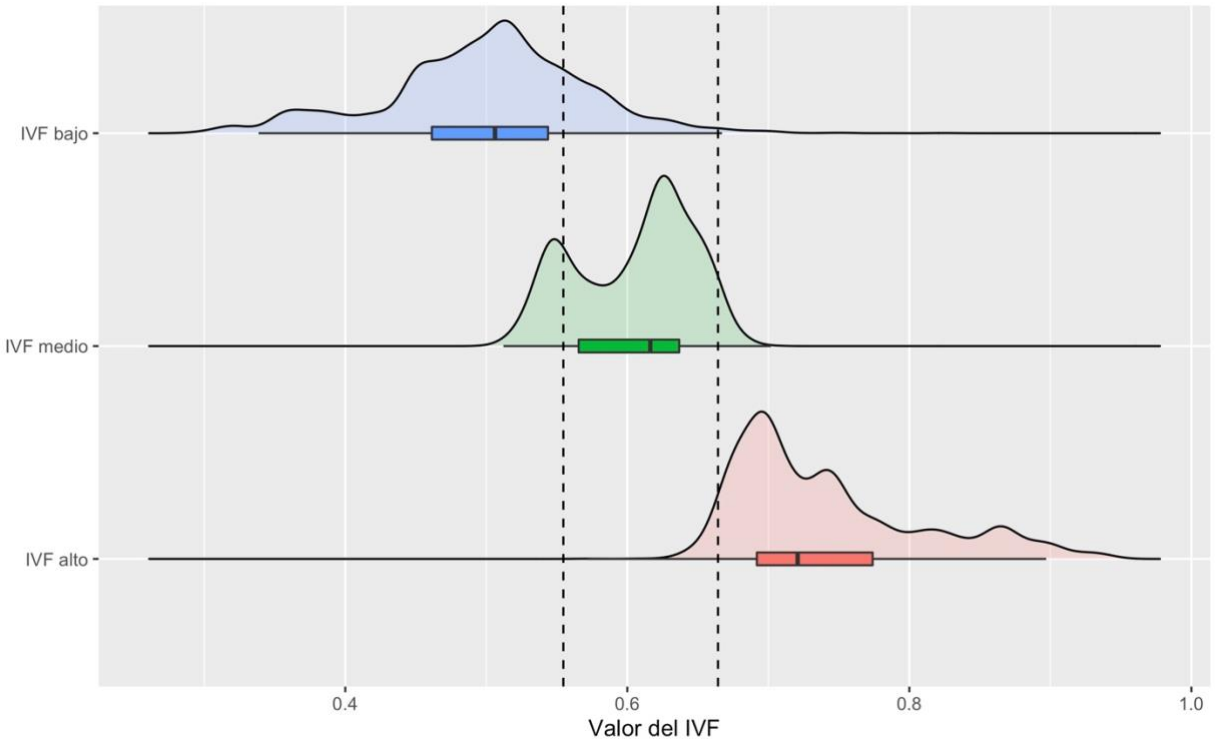
*Figura 29. Diagramas de caja de los indicadores y del IVF para cada grupo*




La Figura 30 muestra las gráficas de densidad y caja del IVF para los 3 grupos identificados. Las líneas punteadas de la gráfica fueron dibujadas en el punto intermedio entre el tercer cuartil de un grupo y el primer cuartil del siguiente con el fin de establecer un límite de valor del IVF que permita separar los 3 grupos. Es decir, el grupo de IVF bajo estará dado por el rango 0-0.55, el medio por el rango 0.55-0.66 y el alto entre 0.66 y 1.

Borrador

*Figura 30. Gráficas de densidad y caja de los valores del IVF para los grupos de IVF bajo, medio y alto*




La distribución espacial del IVF se muestra en la Figura 31. Los valores bajos de IVF se concentran el a zona norte de la cuenca, en donde las viviendas tienen más pisos y los sistemas constructivos son menos susceptibles, mientras que los valores altos se concentran en la zona norte donde los procesos de ocupación son más recientes y por lo tanto las viviendas tienen menos pisos, están más dispersas (muchas no tienen construcciones colindantes) y sistemas constructivos más susceptibles. Los indicadores de tamaño (It), perímetro no colindante (Ipnc), número de pisos (Inp) y sistema estructural (Ise) se muestran en la Figura 32.

Borrador

*Figura 31. Indicador de vulnerabilidad física (IVF). Las categorías del IVF corresponden a las definidas en la Figura 30*

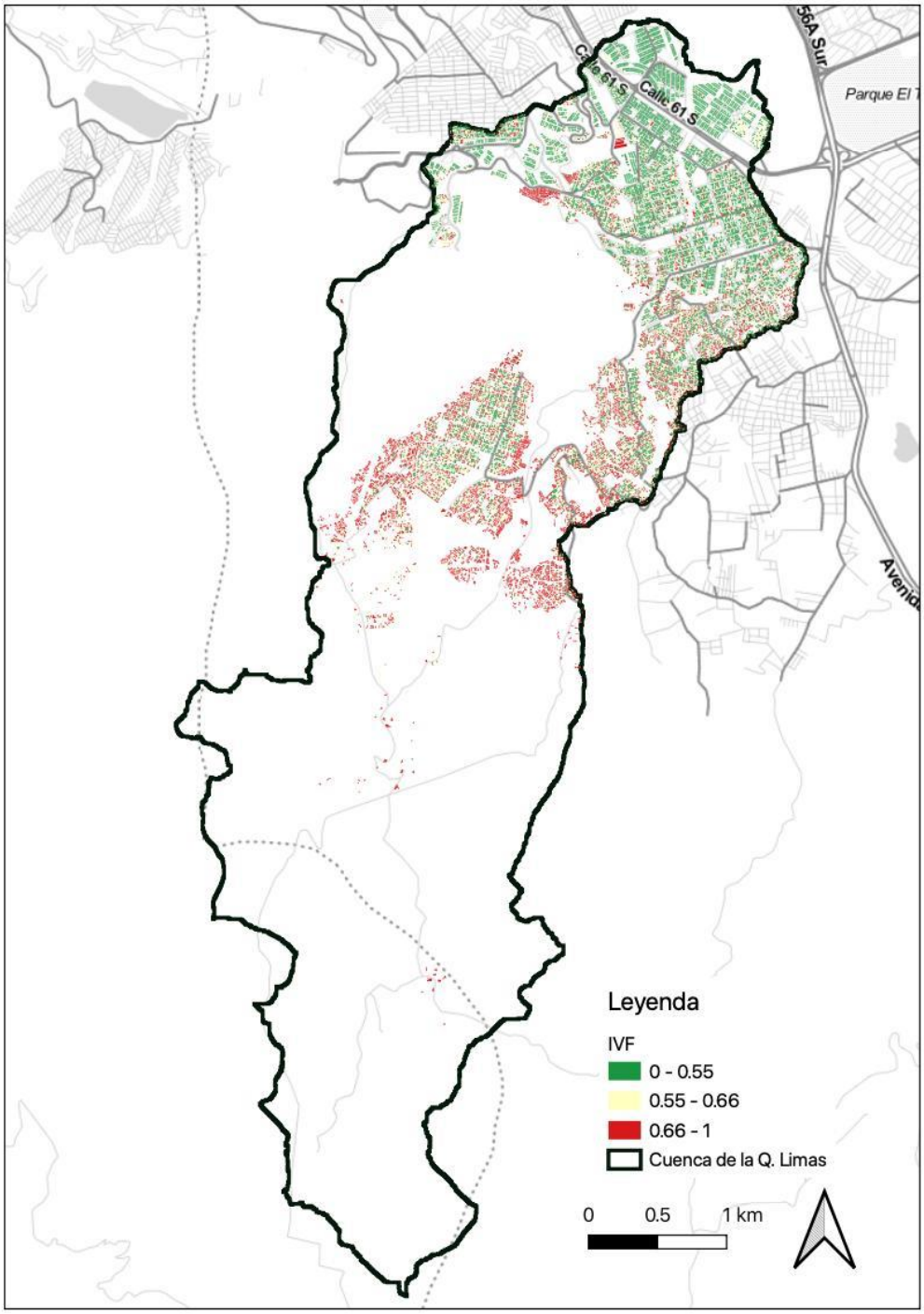
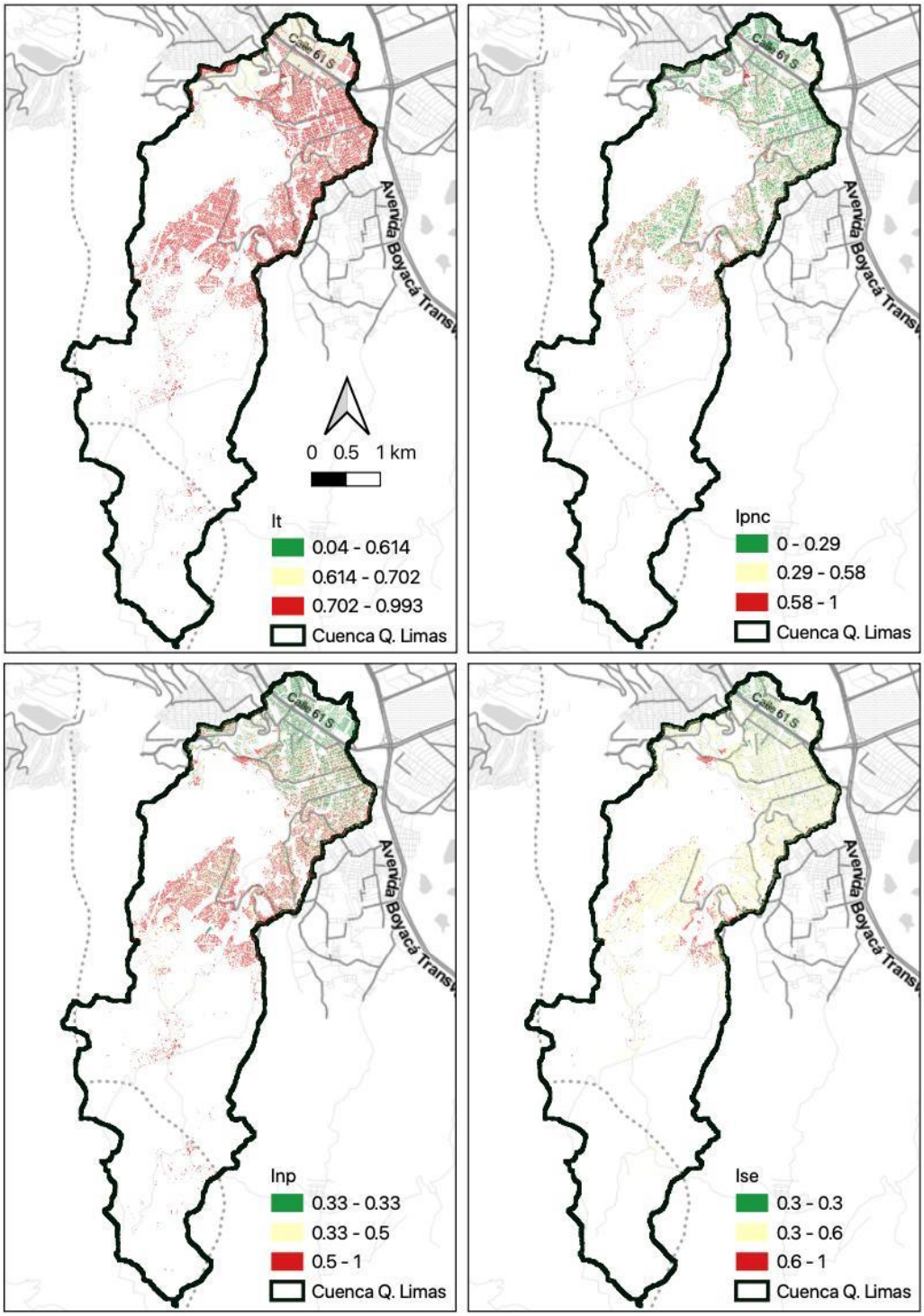


*Figura 32. Indicadores de tamaño (It), perímetro no colindante (Ipnc), número de pisos (Inp) y sistema estructural (Ise)*



## 6 Vulnerabilidad física en la zona inundable

El indicador de vulnerabilidad desarrollado en la sección anterior busca evaluar la vulnerabilidad física intrínseca de las viviendas, es por esto que puede ser calculado para todas las construcciones existentes en la cuenca. Sin embargo, un elemento solo es vulnerable cuando está expuesto a una amenaza. Con el fin de generar un área preliminar de exposición, se consideró la envolvente de todos los escenarios de amenaza obtenidos del modelo OpenLISEM que abarcan hasta el periodo de retorno de 500 años y se obtuvieron las estadísticas de las viviendas localizadas en esa área. Este es un análisis preliminar al que será desarrollado en el análisis de riesgo de detalle y que solo proporciona información general de los elementos considerados preliminarmente expuestos a cualquier condición de intensidad. Dentro de los análisis de riesgo se evaluará a que intensidad de amenaza está sometido cada elemento y esta condición a que daño conduce y su probabilidad asociada.

La capa con las huellas de las construcciones y el área de exposición preliminarmente estimada se intersectaron espacialmente para extraer las estadísticas asociadas a la población y a las construcciones. Una construcción y sus habitantes se consideran expuestos si parcialmente o completamente la huella de su polígono se sobrepone con el área preliminar de exposición.

Con el fin de analizar densidades y agregar espacialmente los resultados, se creó una malla arbitraria de 100 metros (una hectárea), para la cual se calculó la densidad de edificios expuestos (edificios/ha), densidad de personas expuestas (personas/ha), valor catastral expuesto (millones de pesos/ha) y valor económico expuesto (millones de pesos/ha). Las densidades para toda la cuenca (expuestas y no expuestas) se muestran en la Figura 33. Las densidades en la zona preliminar de exposición se muestran en la Figura 34. En la cuenca alta las zonas propensas a las inundaciones están limitadas al cauce y una franja angosta adyacente. Las zonas amplias donde se concentra la población y las viviendas expuestas se localizan en la cuenca baja, en la zona urbana. Una ampliación de esta área se muestra en la Figura 40, donde se muestra que los mayores valores de todas las densidades se concentran en el extremo norte de la cuenca, en la zona cercana a la confluencia de la quebrada Limas con el río Tunjuelo. En esta zona existen conjuntos residenciales con edificios de hasta 7 pisos que se encuentran en la zona preliminar de exposición, de ahí los altos valores de densidades expuestas.

Borrador V1

*Figura 33. Densidades de personas, edificaciones y valores para toda la cuenca*

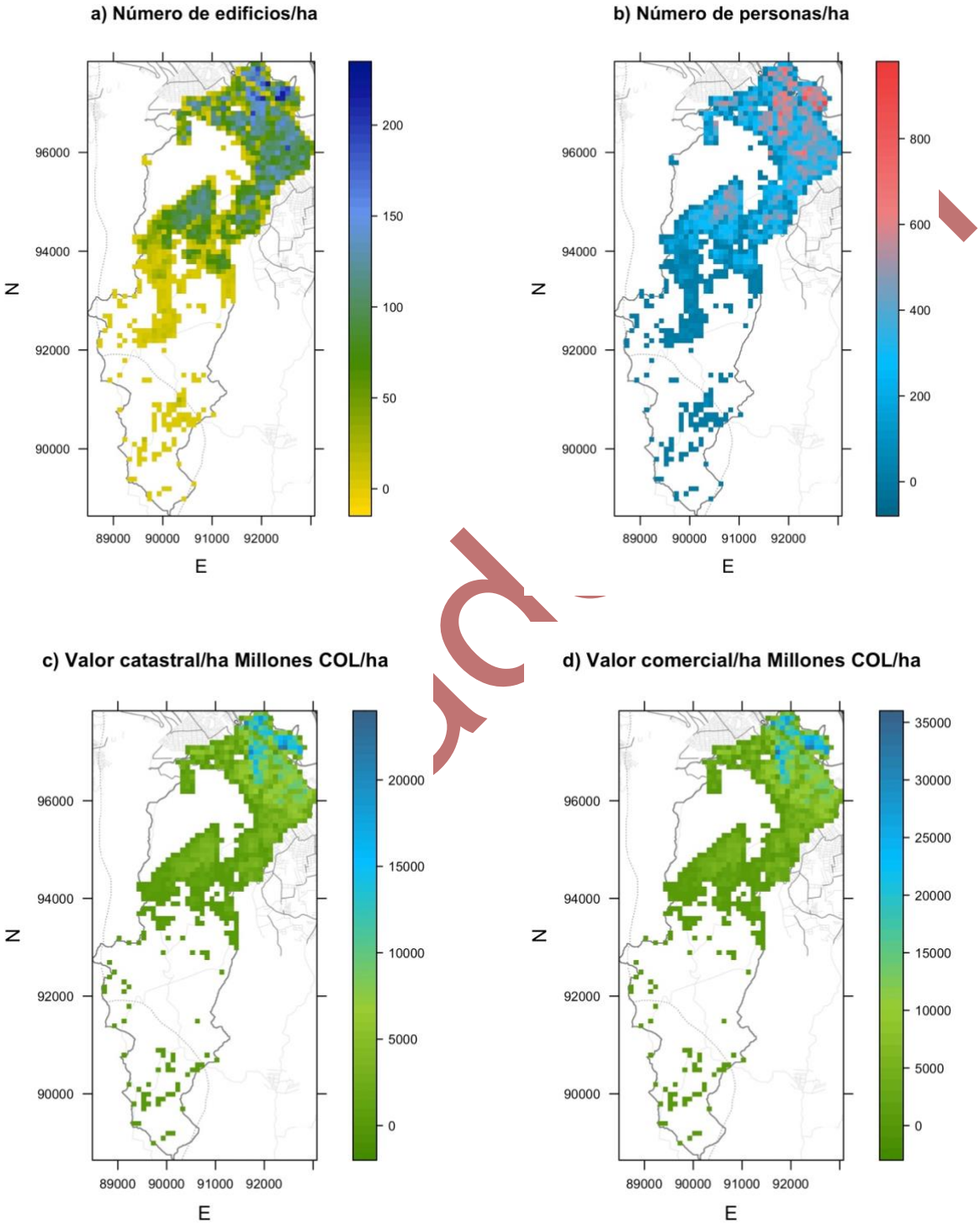


*Figura 34. Densidades de personas, edificaciones y valores para la zona preliminar de exposición*

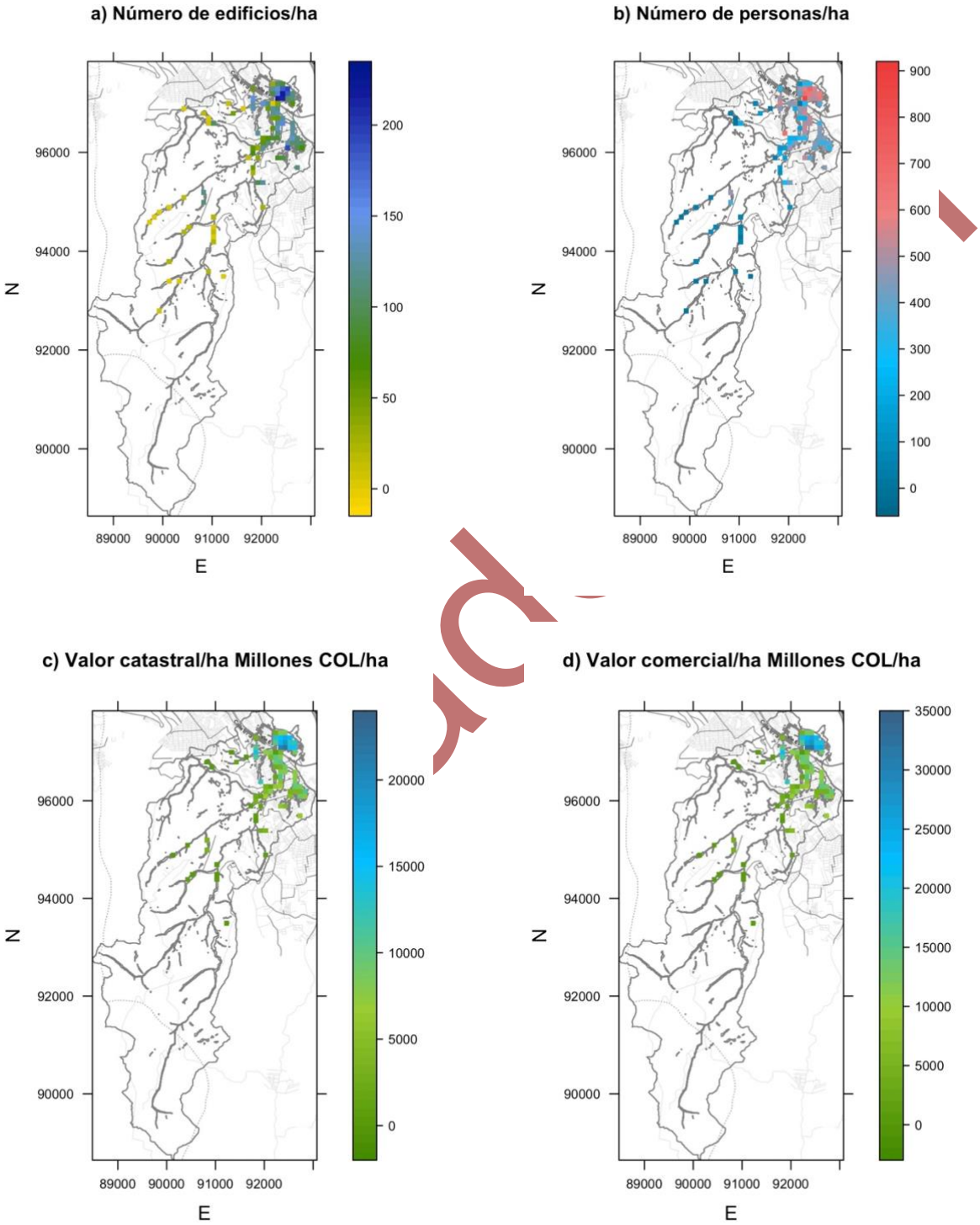
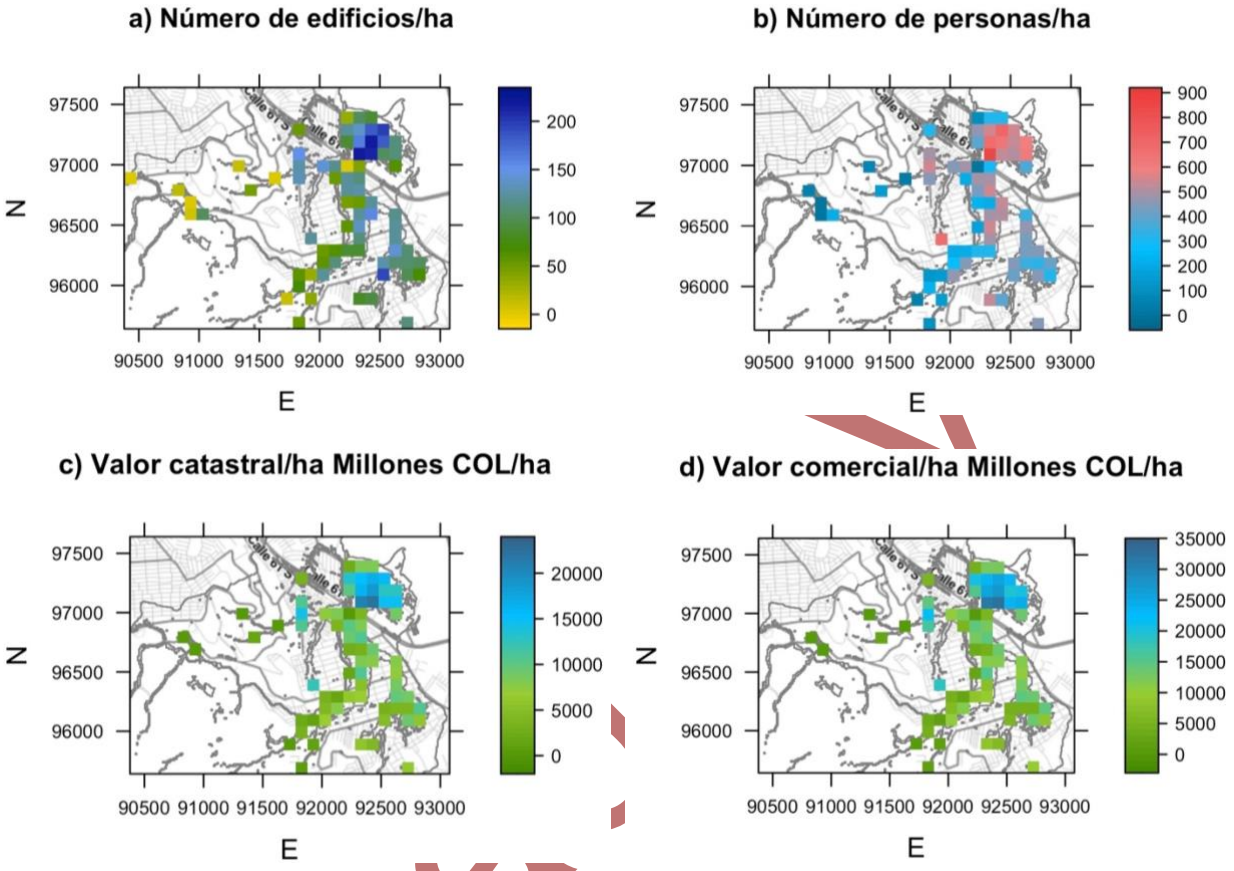


*Figura 35. Densidades de personas, edificaciones y valores para la zona preliminar de exposición cuenca baja*




Aunque de la Figura 33, Figura 34 y Figura 35 es clara la concentración de valores expuestos en el extremo norte de la cuenca, se aplicó la estadística de autocorrelación Gi*(d) desarrollada por Getis y Ord (1992) para identificar hotspots (puntos calientes) de exposición. Este procedimiento permite detectar estadísticamente grupos significativos de valores altos en términos de densidades u otros valores. La Figura 36 muestra los puntos calientes en tonalidades rojas mientras que los puntos fríos se muestran en tonalidades azules, entre más intenso es el rojo, la concentración de valores altos es más significativa. Las tonalidades rojas más intensas se encuentran localizadas en la zona norte de la cuenca y existen zonas de puntos calientes localizadas dentro del área preliminar de exposición. La Figura 37 muestra los puntos calientes para el IVF. Los puntos calientes del IVF se localizan en forma contraria a la densidad de construcciones y población, indicando que los valores más altos se concentran en la cuenca alta, esto debido a que es en esta zona donde se concentran las viviendas con menores pisos, sistemas estructurales menos resistentes y construcciones más aisladas unas de otras.

Borrador

*Figura 36. Hot spots (puntos calientes) para diferentes variables. Las tonalidades rojas muestran la concentración de valores altos, entre más oscuro el rojo más concentración*

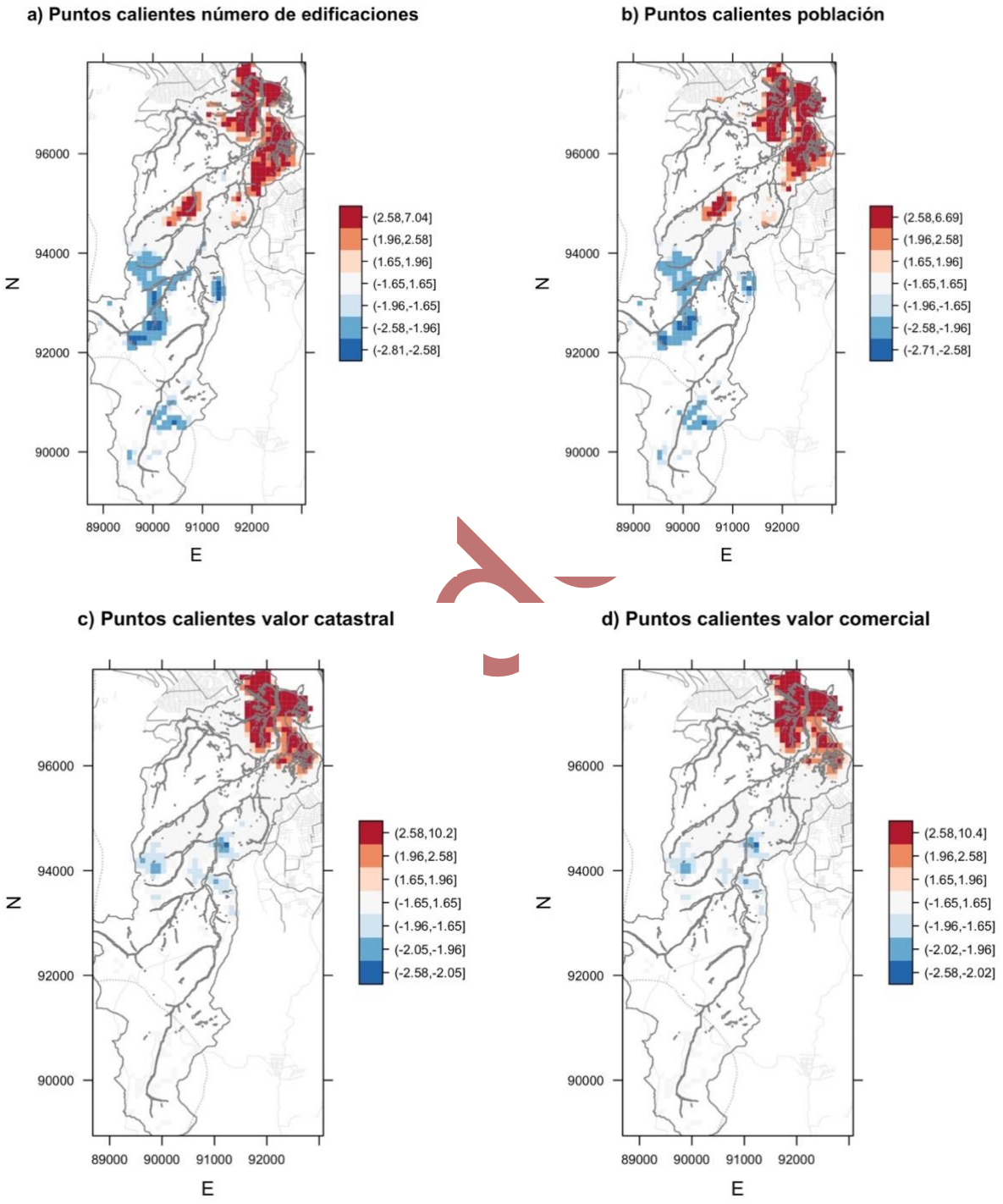
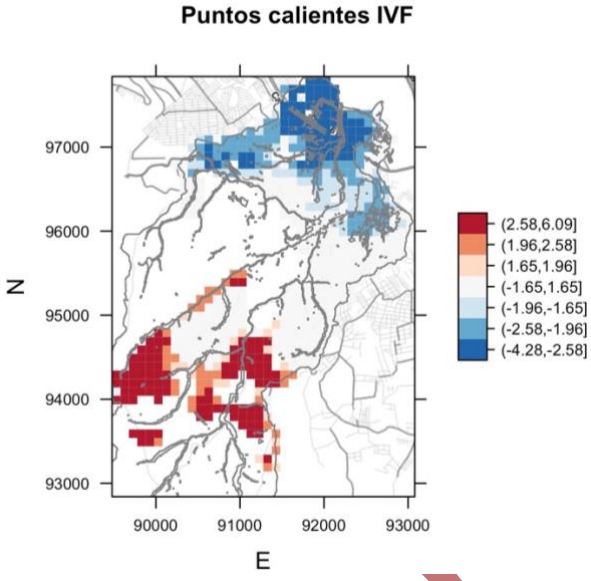


*Figura 37. Hot spots (puntos calientes) para el IVF*



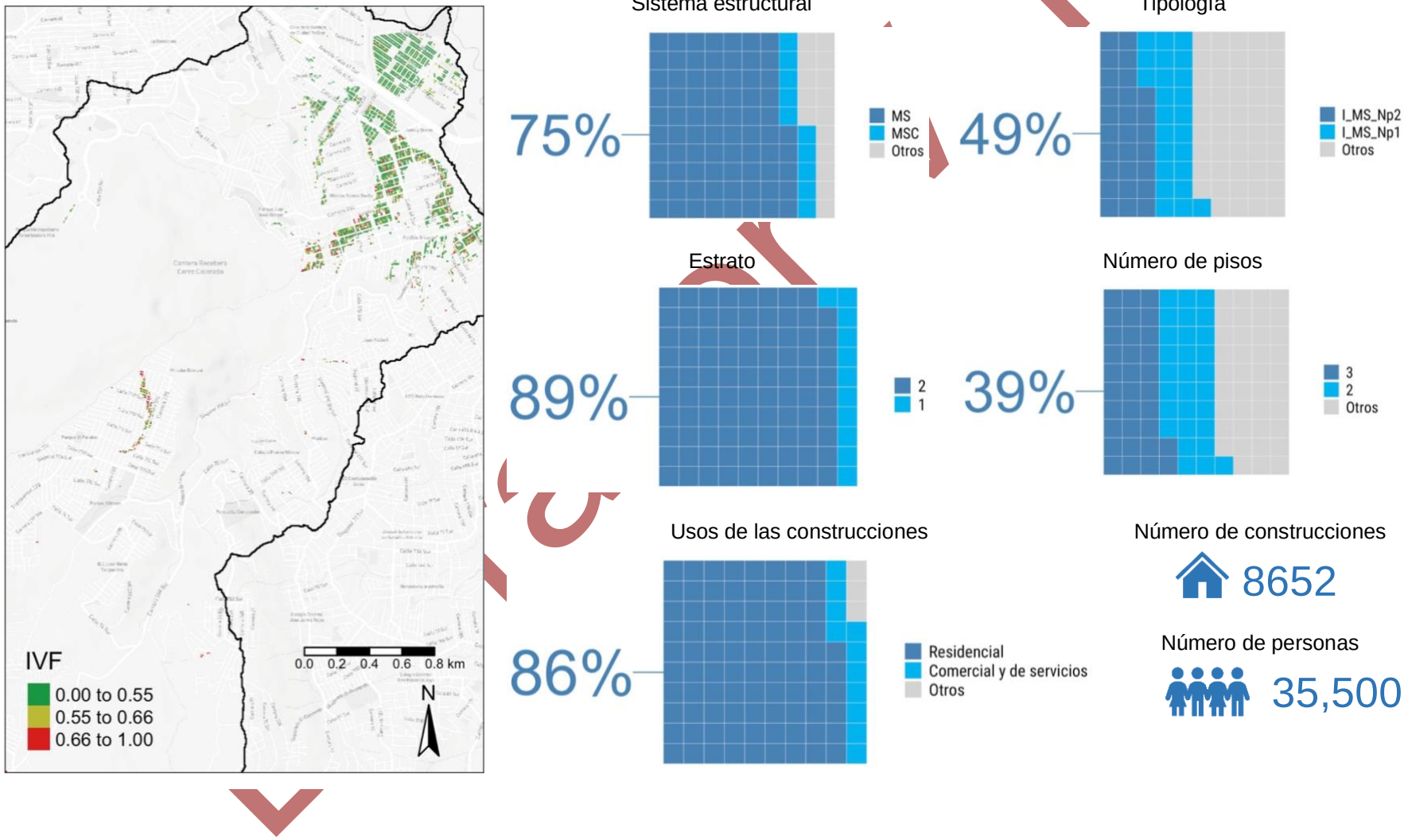

La Figura 38 muestra el resumen de las características de la zona preliminar de exposición. El sistema estructural dominante es la mampostería simple y la tipología estructural del 49% de las viviendas es la mampostería simple de dos pisos. La mayoría de la zona es de estrato 2 y la mayoría de las construcciones tiene dos o más pisos, pero hay construcciones de hasta 6 pisos. Las construcciones son primordialmente residenciales. La cantidad de construcciones con su respectivo uso según la identificación de la UAECD se muestra en la Tabla 8 (construcciones identificadas en la ortoforto IDIGER 2019 no se incluyen, por esta razón el valor difiere del presentado en la Figura 38).

*Tabla 8. Uso y cantidad de construcciones en la zona preliminar de exposición*

| Uso | Cantidad de construcciones |
|---|---|
| Comercial y de servicios | 942 |
| Dotacional | 129 |
| Industrial | 49 |
| Recreacional Deportivo | 1 |
| Residencial | 7169 |
| Total | 8290 |

Borrador v 1

*Figura 38. Resumen de características de la zona preliminar de exposición*



# 7 Consideraciones iniciales para la evaluación de la vulnerabilidad social

Las condiciones socio-económicas son un factor fundamental dentro de las evaluaciones de vulnerabilidad. Además de su uso en la construcción de indicadores, también han sido utilizadas dentro de la construcción de curvas de vulnerabilidad (Baró-Suárez et al. 2011).

El entendimiento de la vulnerabilidad social es fundamental para la gestión del riesgo. Aunque este informe no tiene alcance para realizar un análisis de vulnerabilidad social, se realizó un análisis preliminar espacial del indicador de pobreza multidimensional (IPM) (DANE, 2018) utilizándolo como proxy de la vulnerabilidad social. Esta es una suposición que lleva a varias simplificaciones: (i) se considera que el índice de pobreza multidimensional puede condensar toda la información que determina la variabilidad espacial de la vulnerabilidad social; (ii) se asume que el indicador desarrollado en el 2018 continúa vigente en el año 2021. Estas suposiciones conllevan a limitaciones, entre ellas: (i) la vulnerabilidad social también debería incluir aspectos sobre las capacidades de la sociedad para manejar y resistir el impacto de una amenaza, es decir, debería incluir aspectos de resiliencia de la sociedad, este aspecto no es explícitamente medido por el IPM y requiere análisis detallados que deberían llevarse a cabo posteriormente; (ii) el IPM podría no capturar las condiciones de pobreza y privaciones en 2021, particularmente luego de los impactos del COVID-19, sin embargo la actualización del indicador está fuera del alcance de este análisis.

Por las limitaciones expuestas, el análisis presentado en este capítulo debe ser considerado como preliminar y a ser complementado con información más reciente y con otros indicadores que capturen otras dimensiones de la vulnerabilidad.

Debido a la alta resolución del análisis, se realizó una búsqueda preliminar de indicadores disponibles como mínimo a nivel de manzana, esto debido a que la cuenca de la quebrada Limas tiene solo 18km$^2$ y unidades más grandes que la manzana no permiten identificar suficiente variabilidad en los parámetros. A esta escala, la información disponible más relevante es el IPM calculado por DANE con los datos censales de 2018. El IPM evalúa los resultados de satisfacción (o no privación) que tiene un individuo respecto a ciertas características que se consideran vitales como salud, educación, empleo, entre otras. La medición indirecta evalúa la capacidad de adquisición de bienes y servicios que tienen los hogares (DANE 2020). La Medida de Pobreza Multidimensional está conformada por cinco dimensiones (DANE 2020):

- Condiciones educativas del hogar: integra los indicadores de logro educativo y analfabetismo
- Condiciones de la niñez y la juventud: integra los indicadores inasistencia escolar, rezago escolar, barreras de acceso a servicios para el cuidado de la primera infancia y trabajo infantil

Borrador V1

- Salud: indicadores de aseguramiento a salud y barreras de acceso a servicios de salud
- Trabajo: integra los indicadores de tasa de dependencia económica y trabajo informal
- Condiciones de la vivienda y acceso a servicios públicos domiciliarios: integra los indicadores de acceso a fuente de agua mejorada, inadecuada eliminación de excretas, material de pisos inadecuados, material de paredes exteriores inadecuado y hacinamiento crítico.

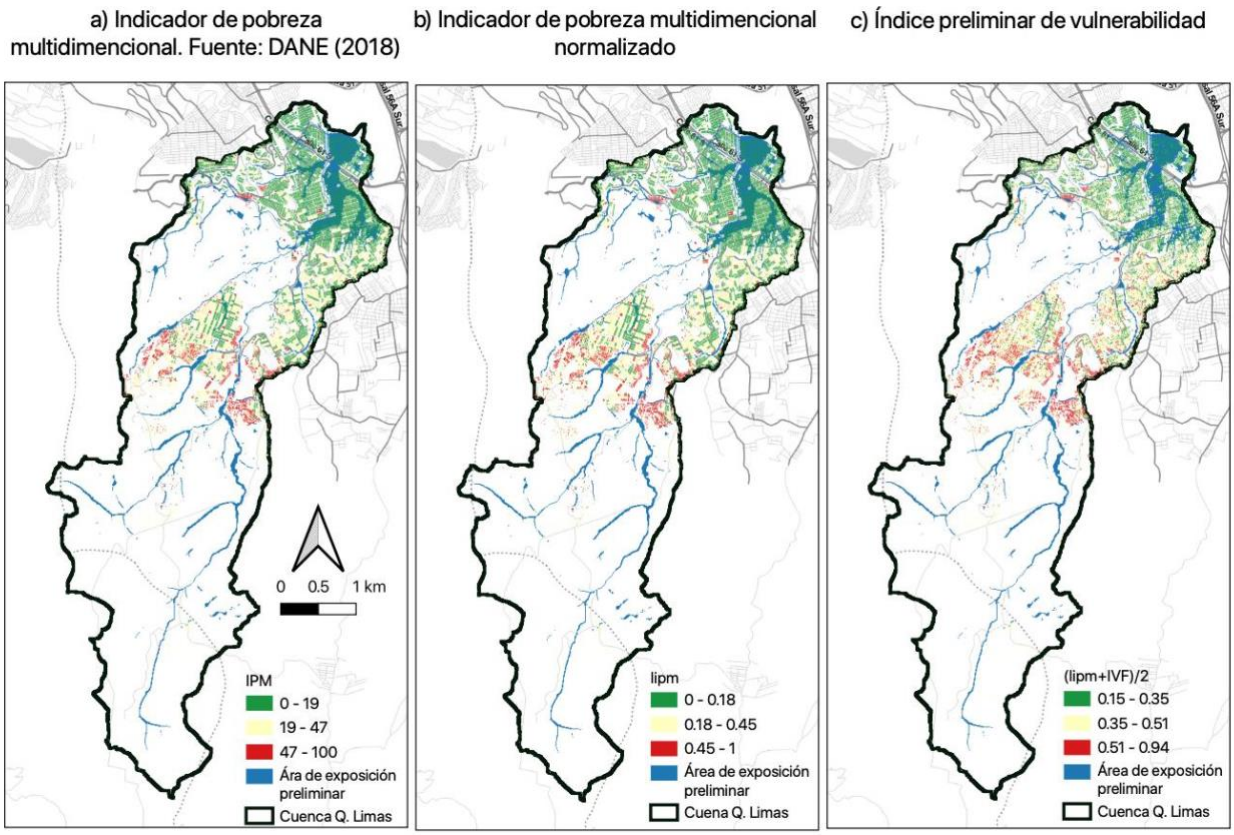
Estas dimensiones e indicadores capturan muchos de los criterios que se han utilizado para cuantificar la vulnerabilidad social, particularmente los relacionados con la fragilidad socio-económica [10] (Cardona 2001). Sin embargo, para futuros análisis aspectos demográficos (distribución por edades), de género y composición de la familia podrían ayudar a complementar la evaluación de fragilidad socio-económica. Lo mismo ocurre para la medición de la resiliencia, para lo cual medir la cohesión social, el nivel de organización de las comunidades, la capacidad de respuesta y el conocimiento del riesgo podrían ser de utilidad (Lundgren and Jonsson 2012). Sin embargo, existe un gran reto en obtener indicadores a la escala de detalle con la cual se está desarrollando el análisis. Con una unidad mínima de análisis de manzana, se requiere más investigación para revisar que tipo de información podría complementar el IPM que tenga una medición factible y que pueda ser monitoreada en el tiempo. Por ahora el análisis subsiguiente se concentrará en el IPM bajo las limitaciones establecidas.

La Figura 39 (a) muestra el IPM asignado a las construcciones (la información está originalmente a nivel de manzana pero se asignó a cada construcción). El indicador fue normalizado con una normalización max-min y finalmente se combinó con el IVF mediante un promedio. Los resultados muestran que los valores de vulnerabilidad combinada más altos se localizan en las construcciones que se encuentran en la cuenca media donde se combinan condiciones de pobreza, viviendas de 1 piso y sistemas estructurales menos resistentes. Es importante mencionar, que los indicadores son una medida relativa de la vulnerabilidad, por lo cual no debe interpretarse que las viviendas. y personas localizadas en la zona norte (cuenca baja) son poco vulnerables, solo que son menos vulnerables que las localizadas más hacia el norte en la cuenca media.

Borrador V1

[10] La fragilidad socio-económica se refiere a la predisposición que surge como resultado del nivel de marginalidad y segregación social del asentamiento humano y sus condiciones de desventaja y debilidad relativa por factores socioeconómicos (Cardona 2001).

*Figura 39. a) Indicador de pobreza multidimensional (IPM). Fuente: DANE (2018); b) Indicador de pobreza multidimensional normalizado; y c) Índice preliminar de vulnerabilidad. Los rangos de valores utilizados para visualizar los indicadores corresponden a una identificación automática del límites utilizando "natural jenks"*




Borrador

# 8 Recomendaciones

- Como conclusión de la revisión de información disponible, existen unas limitaciones importantes en la ciudad de Bogotá en cuanto a información de daños y desarrollo de curvas de daño para inundaciones y avenidas torrenciales. Por lo anterior, este estudio realizó una revisión de estudios internacionales e identificó cómo estos estudios podrían aplicarse a los atributos de las viviendas en la quebrada Limas. Sin embargo, las incertidumbres son altas y se recomienda que a futuro se recopile información de daño y se avance en el conocimiento de la vulnerabilidad de las construcciones existentes en Bogotá ante inundaciones y avenidas torrenciales.
- Debido a la falta de información de la vulnerabilidad de las personas, el análisis de riesgo por inundación y avenidas torrenciales en la quebrada Limas tendrá que limitarse a estimar la exposición de personas sin llegar a estimaciones de muertes o heridos. Se recomienda que este paso se adopte en el futuro cuando se cuente con más información y puedan desarrollarse modelos de riesgo para la vida de las personas ante este tipo de amenazas.
- El estado de conocimiento actual implica limitaciones importantes en el entendimiento del comportamiento de las estructuras típicas de la cuenca de la quebrada Limas. Avanzar en el desarrollo de curvas de vulnerabilidad específicas para la zona y para la ciudad de Bogotá contribuirá a la reducción de la incertidumbre en la evaluación del riesgo.
- Aunque se identificó un grupo de curvas de vulnerabilidad que podrían ser aplicables a la quebrada Limas, no es posible hacer una verificación con información de daños. Es muy importante que a futuro la información de daños en las viviendas e infraestructura expuesta se documente para construir curvas de vulnerabilidad propias de la ciudad de Bogotá y que además permita su validación.
- Mientras se recopila información o se desarrollan curvas propias para la ciudad de Bogotá se recomienda utilizar las curvas aquí recopiladas bajo el entendimiento de las limitaciones que tienen y la incertidumbre que conllevan. Se recomienda que durante los análisis de riesgo se evalúe la sensibilidad de resultados ante el uso de diferentes curvas de daño.
- El desarrollo de curvas de vulnerabilidad no debería limitarse a las viviendas. Si bien estos son los elementos expuestos que más existen en la zona inundable, también es necesario estudiar la vulnerabilidad de otra infraestructura y de daños indirectos. Esto requerirá el desarrollo de estudios futuros.
- Existen grandes limitaciones en las curvas de vulnerabilidad disponibles en la literatura. Una en particular, es el uso de un solo parámetro de intensidad (generalmente la profundidad de flujo). Estudios futuros deberían buscar incluir otros parámetros relevantes como la velocidad y duración bajo las condiciones de la ciudad de Bogotá.
- La vulnerabilidad social es fundamental para entender los impulsores del riesgo y por lo tanto fundamental para su gestión. En este informe se presenta una

Borrador V1

exploración inicial con el IPM pero se requiere fortalecer la investigación de la evaluación de la vulnerabilidad social, identificar indicadores a escalas de detalle y evaluar la resiliencia.

- En este análisis se ha estimado el valor de los elementos existentes en la cuenca y en el área preliminar expuesta mediante el uso del avalúo catastral y comercial. Sin embargo, se recomienda que se avance en el análisis de los valores de reemplazo de los elementos. Este avance deberá ser consistente con la evaluación de riesgo de otras amenazas como la sísmica.
- Se recomienda avanzar en el análisis de los contenidos expuestos de tal forma que puedan obtenerse curvas de vulnerabilidad de contenidos propias para la ciudad de Bogotá en las áreas específicas de los estudios de inundaciones y avenidas torrenciales.

Borrador V1

## 9 REFERENCIAS

Arrighi, C., B. Mazzanti, F. Pistone, and F. Castelli, 2020: Empirical flash flood vulnerability functions for residential buildings. *SN Appl. Sci.*, **2**, https://doi.org/10.1007/s42452-020-2696-1.

Azmeri, A., and A. H. Isa, 2018a: An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia. *Jamba J. Disaster Risk Stud.*, **10**, https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.550.

——, and ——, 2018b: An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia. *Jamba J. Disaster Risk Stud.*, **10**, https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.550.

Baró-Suárez, J. E., C. Díaz-Delgado, G. Calderón-Aragón, M. V. Esteller-Alberich, and E. Cadena-Vargas, 2011: Costo má probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnol. y Ciencias del Agua, antes Ing. hidráulica en México*, **II**.

Birkmann, J., 2006: *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*. U.N.U. Press, Ed. bepress,.

Birkmann, J., and Coauthors, 2013: Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Nat. Hazards*, **67**, 193–211, https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5.

Cammerer, H., A. H. Thieken, and J. Lammel, 2013: Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, **1**, 3485–3527, https://doi.org/10.5194/nhessd-1-3485-2013.

Cardona, O. D., 2001: Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, .

Congreso de Colombia, 2012: *Ley No 1523 de 2012*. http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Normatividad/LEY 1523 DEL 24 DE ABRIL DE 2012.pdf.

DANE, 2020: Medida de Pobreza Multidimensional Municipal de Fuente Censal.

Eidsvig, U. M. K., M. Papathoma-Köhle, J. Du, T. Glade, and B. V. Vangelsten, 2014: Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment. *Eng. Geol.*, **181**, 15–26, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.006.

Estrategias de Trading, 2020: Algoritmos de Data Mining para agrupar datos – Clustering Jerárquico. https://estrategiastrading.com/clustering-jerarquico/.

Ettinger, S., and Coauthors, 2016: Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *J. Hydrol.*, **541**, 563–581, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017.

Borrador V1

Flood Hazard Research Centre, 2010: Multi-Coloured Handbook.

Fuchs, S., K. Heiss, and J. Hübl, 2007: Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 495–506, https://doi.org/10.5194/nhess-7-495-2007.

——, M. Keiler, R. Ortlepp, R. Schinke, and M. Papathoma-Köhle, 2019: Recent advances in vulnerability assessment for the built environment exposed to torrential hazards: Challenges and the way forward. *J. Hydrol.*, **575**, 587–595, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.067.

Getis, A., and J. K. Ord, 1992: The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geogr. Anal.*, **24**, 189–206, https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.

Godfrey, A., R. L. Ciurean, C. J. van Westen, N. C. Kingma, and T. Glade, 2015: Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach - An application in Nehoiu Valley, Romania. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, **13**, 229–241, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.001.

HNFMSSC, 2006: *Designing Safer Subdivisions. Guidance On Subdivision Design In Flood Prone Areas*. 1–170 pp.

Huizinga, J., H. de Moel, and W. Szewczyk, 2017: *Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines*. 1–108 pp.

JBA, 2019: *Evaluación del riesgo de inundación y la situación costera del Río Tocumen Priorización de infraestructura híbrida para la reducción del riesgo de inundación en la zona urbana de la Ciudad de Panamá*.

Kang, H. sub, and Y. tae Kim, 2016: The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Nat. Hazards*, **80**, 1475–1493, https://doi.org/10.1007/s11069-015-2032-z.

Kappes, M. S., M. Papathoma-Köhle, and M. Keiler, 2012: Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Appl. Geogr.*, **32**, 577–590, https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002.

Lavell, A., and Coauthors, 2012: Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Vol. 9781107025 of, 25–64.

Leal, M., E. Reis, S. Pereira, and P. P. Santos, 2021: Physical vulnerability assessment to flash floods using an indicator-based methodology based on building properties and flow parameters. *J. Flood Risk Manag.*, **14**, https://doi.org/10.1111/jfr3.12712.

Lo, W. C., T. C. Tsao, and C. H. Hsu, 2012: Building vulnerability to debris flows in Taiwan: A preliminary study. *Nat. Hazards*, **64**, 2107–2128, https://doi.org/10.1007/s11069-012-0124-6.

Borrador V.1

Lundgren, L., and A. Jonsson, 2012: Assessment of social vulnerability: a literature review of vulnerability related to climate change and natural hazards. *CSPR Brief.*, **9**, 20.

Malgwi, M. B., S. Fuchs, and M. Keiler, 2020: A generic physical vulnerability model for floods: Review and concept for data-scarce regions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **20**, 2067–2090, https://doi.org/10.5194/nhess-20-2067-2020.

Marvi, M. T., 2020: A review of flood damage analysis for a building structure and contents. *Nat. Hazards*, **102**, 967–995, https://doi.org/10.1007/s11069-020-03941-w.

Mason, M., E. Phillips, T. Okada, and J. O. Brien, 2010: *Analysis of damage to buildings following the 2010 – 11 Eastern Australia floods*. National Climate Change Adaptation Facility,.

Nofal, O. M., J. W. van de Lindt, and T. Q. Do, 2020: Multi-variate and single-variable flood fragility and loss approaches for buildings. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **202**, https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106971.

Olesen, L., R. Löwe, and K. Arnbjerg-Nielsen, 2017: *Flood Damage Assessment Literature review and recommended procedure*. Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 44 pp.

Ordaz, M., M. A. Torres, and R. Domínguez, 2013: VULNERABILIDAD Y RIESGO POR INUNDACIONES. *Inst. Ing. UNAM*,.

Pistrika, A., G. Tsakiris, and I. Nalbantis, 2014: Flood Depth-Damage Functions for Built Environment. *Environ. Process.*, **1**, 553–572, https://doi.org/10.1007/s40710-014-0038-2.

Prieto, J. A., M. Journeay, A. B. Acevedo, J. D. Arbelaez, and M. Ulmi, 2018: Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter. *Eng. Geol.*, **239**, 144–157, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.014.

Prieto, J. C., 2018: *Modelación de escenarios de riesgo sísmico y estimación de daños - conformación y mantenimiento actualizado de las bases de datos requeridas para estimaciones de riesgo sísmico - Documento técnico de soporte*.

Reese, S., and D. Ramsay, 2010: *RiskScape: Flood Fragility Methodology*. 46 pp. https://www.wgtn.ac.nz/sgees/research-centres/documents/riskscape-flood-fragility-methodology.pdf.

Romali, N. S., M. @ S. A. K. Sulaiman, Z. Yusop, and Z. Ismail, 2015: Flood Damage Assessment: A Review of Flood Stage–Damage Function Curve. *ISFRAM 2014*, 147–159.

Salas, M., 2011: *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas*. http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/203.pdf.

SNGRD, 2017: *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos*

Borrador V1

*Amenazantes*. 45 pp. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf;jsessionid=7FA98F767F555A12649406FEA08CD870?sequence=2.

Su, M., and J. Kang, 2005: A grid-based GIS approach to regional flood damage assessment. *J. Mar. Sci. Technol.*, **13**, 184–192.

Tarbotton, C., F. Dall'Osso, D. Dominey-Howes, and J. Goff, 2015: The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice. *Earth-Science Rev.*, **142**, 120–134, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.002.

Thouret, J. C., and Coauthors, 2014: Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: The case of Arequipa (Peru). *Nat. Hazards*, **73**, 1771–1815, https://doi.org/10.1007/s11069-014-1172-x.

Totschnig, R., and S. Fuchs, 2013: Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Eng. Geol.*, **155**, 31–44, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.019.

UNAL, 2006: Análisis e investigación de procesos de flujos de detritos como eventos generadores de riesgo en la cuenca alta del río San Cristóbal.

Vogel, C., and K. O'Brien, 2004: Vulnerability and global environmental change: Rhetoric and reality. An Information Bulletin on Global Environmental Change and Human Security.

Wu, X., and J. Guo, 2021: Urban Flood Depth-Economic Loss Curves and Their Amendment Based on Resilience: Evidence from Lizhong Town in Lixia River and Houbai Town in Jurong River of China. *Economic Impacts and Emergency Management of Disasters in China*, 191–219.

Zhang, S., L. Zhang, X. Li, and Q. Xu, 2018: Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows. *Eng. Geol.*, **247**, 145–158, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.017.

Borrador V.1

## ANEXO A. Procedimiento para la asignación de tipología estructural

La tipología de los elementos expuestos fue construida tomando como base el proceso llevado a cabo para la construcción de la base de datos de elementos expuestos para la evaluación de riesgo sísmico, descrito en Prieto (2018). La información disponible en IDECA que fue utilizada se muestra en la Tabla 9. Además de esta información, las construcciones visibles en la ortofoto capturada en diciembre de 2019 generada por IDIGER, fueron digitalizadas y la información de número de pisos y sistema estructural fue recopilada en campo o identificada de Google Street.

*Tabla 9. Información disponible para la construcción de la base de datos de exposición*

| Formato | Indicador | Resolución | Campos |
|---|---|---|---|
| **Archivo Shape** | **Construcción. Bogotá D.C**<br>Edificación con cubierta de carácter permanente asociada a un lote destinada a proteger contra la intemperie a personas, animales o bienes.<br>Entidad Unidad A. Especial de Catastro Distrital<br>Fecha de actualización del contenido 25/07/2021<br>Publicado 07-10-2021<br>Descargado 05-10-2021 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/construccion-bogota-dc | Construcción | CONCODIGO<br>CONNPISOS<br>CONTSEMIS<br>CONNSOTANO<br>CONMEJORA<br>CONVOLADIZ<br>CONALTURA<br>CONELEVACI |
| **Archivo Shape** | **Manzana Estratificación. Bogotá D.C.**<br>Unidades geográficas tipo manzana las cuales se les asocia la variable de estrato socioeconómico, siendo esta, la clasificación de los inmuebles residenciales que deben recibir servicios públicos. Se realiza principalmente para cobrar de manera diferencial por estratos los servicios públicos domiciliarios, permitiendo asignar subsidios y cobrar contribuciones.<br>Entidad Secretaría Distrital de Planeación<br>Fecha de actualización del contenido 15/08/2019<br>Descargado 07-10-2021 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/manzana-estratificacion-bogota-dc | Manzana | CODIGO_MAN<br>ESTRATO<br>CODIGO_ZON<br>CODIGO_CRI<br>NORMATIVA<br>ACTO_ADMIN<br>NUMERO_ACT<br>FECHA_ACTO<br>ESCALA_CAP<br>RESPONSABL |
| **Tabla dbf** | **Uso. Bogotá D.C**<br>Descripción y cobertura del uso predominante de las construcciones existentes a nivel de Lote para Bogotá.<br>Fecha de actualización del contenido 25/07/2021<br>Unidad A. Especial de Catastro Distrital<br>Publicado 05-10-2021<br>Descargado 06-10-2021 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/uso-bogota-dc | Lote o predio | USOCLOTE<br>USOTUSO<br>USOAREA |
| **Tabla dbf** | **Predios. Bogotá D.C**<br>Es un inmueble no separado por otro predio público o privado, con o sin construcciones y/o edificaciones, perteneciente a personas naturales o jurídicas. El predio mantiene su unidad, aunque esté atravesado por corrientes de agua pública. Se incluyen en esta definición los baldíos, los ejidos, los vacantes, los resguardos indígenas, las reservas naturales, las tierras de las comunidades negras, la propiedad horizontal, los condominios (unidades inmobiliarias cerradas), las multipropiedades, las parcelaciones, los parques | Lote o predio | OBJECTID<br>PreCBarrio<br>PreNBarrio<br>PreCManz<br>PreCPredio<br>PreCCons<br>PreCResto<br>PreChip |

Borrador V 1

| | | | |
|---|---|---|---|
| | cementerios, los bienes de uso público y todos aquellos otros que se encuentren individualizados con una matrícula inmobiliaria, así como las mejoras por edificaciones en terreno ajeno. Resolución IGAC 070/2011<br>Fecha de actualización del contenido 25/07/2021<br>Unidad A. Especial de Catastro Distrital<br>Publicado 03-10-2021<br>Descargado 06-10-2021 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/predios-bogota-dc<br>Metadatos:<br>https://serviciosgis.catastrobogota.gov.co/arcgis/rest/services/catastro/lote/MapServer/3 | | PreCedCata<br>PreNupre<br>PreTProp<br>PreFIncorp<br>PreClase<br>PreDirecc<br>PreMDirecc<br>PreTDirecc<br>PreDSI<br>PreATerre<br>PreAConst<br>PreCZHF<br>PreCDestin<br>PreVetustz<br>PreVForma<br>PreVActual<br>PreCUso<br>PreAUso<br>PreUsoPH<br>PreUsoNPH<br>PreUVivien<br>PreUCalif<br>PreFCalif<br>PrePuntaje<br>PreEArmaz<br>PreEMuros<br>PreECubier<br>PreECons<br>PreAFachad<br>PreACubier<br>PreAPisos<br>PreACons<br>PreBTamano<br>PreBEnchap<br>PreBMobili<br>PreBCons<br>PreCTamano<br>PreCEnchap<br>PreCMobili<br>PreCConse<br>PreCIndus<br>PreACercha<br>PreClCons<br>Barmanpre |
| **Archivo Shape** | **Avalúo. Bogotá D.C**<br>Contiene los avalúos comerciales por manzana discriminado por propiedad horizontal y no propiedad horizontal, encontrando el grupo/clase predominante a nivel de manzana teniendo en cuenta la suma de áreas de terreno a nivel de lote para cada una de las manzanas.<br>Entidad Unidad A. Especial de Catastro Distrital<br>Fecha de actualización del contenido 01/01/2019<br>Fuente La IDE de Bogotá D.C<br>Licencia CC BY 4.0<br>https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/avaluo-comercial-bogota-dc<br>https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/avaluo-catastral-bogota-dc | Manzana | OBJECTID<br>MANZANA_ID<br>CP_TERR_AR<br>AVALUO_COM<br>AVALUO_CAT<br>OBSERVACIO<br>GLOBALID |

Borrador V 1

Para la construcción de la base de datos no se contó con la información no pública de catastro, solo con la información disponible en IDECA lo que impone limitaciones, debido a que en IDECA no se publica la información de valor por metro cuadrado asociada a cada predio. Por lo anterior, para la asignación del valor de las construcciones se utilizó el avalúo catastral y comercial por manzana.

La representación geográfica que se utilizó para los elementos expuestos corresponde a los polígonos contenidos en la capa "construcción" (ver Tabla 9). Este enfoque difiere del utilizado en la base de datos de exposición creada en 2017 para el análisis del riesgo sísmico debido a que según Prieto (2018) la representación geográfica usada en ese caso fue el lote. Para el análisis de riesgo por inundación es deseable que la representación geográfica sea lo más precisa posible en cuanto a la localización espacial de las construcciones y en muchos casos (particularmente en la cuenca alta) los lotes corresponden a áreas extensas en donde el área ocupada por las construcciones es pequeña o existen varias construcciones en un mismo lote.

Los campos asociados a cada construcción y que son usados para definir la tipología estructural se describen a continuación:

- Número de pisos:
  - Construcciones contenidas en la base de datos de construcciones de Catastro Distrital: corresponde al atributo CONNPISOS.
  - Construcciones no contenidas en la base de datos de Construcciones de Catastro Distrital pero que fueron identificadas con fotointerpretación de la ortofoto IDIGER 2019: el número de pisos se obtuvo mediante visita de campo o a través de Google Street View cuando esta fuente está disponible.
- Uso:
  - Construcciones contenidas en la base de datos de construcciones de Catastro Distrital: el uso se obtuvo de la base de datos uso de Catastro Distrital. Los usos que utiliza el algoritmo para definir el sistema estructural son los siguientes: i) industrial según la clasificación de uso de Prieto (2018) (ver Tabla 10); ii) habitacional menor o igual a 3 pisos PH (uso 37 en la Tabla 11) y iii) habitacional en propiedad horizontal (uso 38 en la Tabla 11).

*Tabla 10. Categoría de uso. Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital*

| CATEGORÍA DE USO | CÓDIGOS USO DE CATASTRO |
|---|---|
| Residencial | 001, 002, 037, 038, 048, 049, 051, 052, 057, 096 |
| Comercial y de servicios | 003, 004, 005, 006, 007, 008, 020, 021, 022, 023, 024, 025, 026, 027, 029, 031, 033, 039, 040, 041, 042, 045, 046, 047, 050, 056, 060, 066, 080, 081, 082, 091, 093, 094, 095, 097, 098 |
| Dotacional | 012, 013, 014, 015, 016, 017, 018, 035, 043, 044, 053, 055, 058, 059, 062, 064, 067, 092 |
| Industrial | 009, 010, 011, 019, 028, 034, 070, 071, 072, 073, 074, 075, 076, 077 |
| Recreacional y deportivo | 030, 032, 036, 065 |
| Sin construir | 090 |

Borrador V1

*Tabla 11. Códigos de uso del suelo de catastro. Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital*

| CODIGO | DESCRIPCION USO | CODIGO | DESCRIPCION USO |
|---|---|---|---|
| 0 | Sin Uso | 43 | Centros Médicos en PH |
| 1 | Habitacional Menor o Igual a 3 Pisos NPH | 44 | Institucional PH |
| 2 | Mayor o Igual a 4 Pisos NPH o 3 Pisos PH | 45 | Oficinas y Consultorios PH |
| 3 | Comercio Puntual NPH o Hasta 3 Unid PH | 46 | Hoteles PH |
| 4 | Corredor Comercial NPH o Hasta 3 Unid PH | 47 | Teatros y Cinemas PH |
| 5 | Estaciones de Servicio | 48 | Parqueo Libre PH |
| 6 | Centro Comercial Mediano NPH | 49 | Parqueo Cubierto PH |
| 7 | Centro Comercial Grande NPH | 50 | Edificios de Parqueo PH |
| 8 | Bodega Comercial NPH | 51 | Deposito (Lockers) PH |
| 9 | Industria Artesanal | 52 | Piscinas en PH |
| 10 | Industria Mediana | 53 | Iglesia PH |
| 11 | Industria Grande | 55 | Cementerios |
| 12 | Institucional Puntual | 56 | Restaurantes NPH |
| 13 | Colegios y Universidades 1 a 3 Pisos | 57 | Área de Mezanine en PH |
| 14 | Iglesias | 58 | Culto Religioso en NPH |
| 15 | Oficinas y Consultorios (Oficial) NPH | 59 | Culto Religioso en PH |
| 16 | Colegios y Universidades 4 o Más Pisos | 60 | Restaurantes PH |
| 17 | Clínicas, Hospitales, Centros Médicos | 62 | Pista Aeropuerto |
| 18 | Instalaciones Militares | 64 | Aulas de Clase |
| 19 | Industria Artesanal | 65 | Clubes Pequeños |
| 20 | Oficinas y Consultorios NPH | 66 | Plazas de Mercado |
| 21 | Hoteles NPH | 67 | Museos |
| 22 | Depósitos de Almacenamiento NPH | 70 | Enramadas, Cobertizos, Caneyes |
| 23 | Teatros y Cinemas NPH | 71 | Galpones, Gallineros |
| 24 | Edificios de Parqueo NPH | 72 | Establos, Pesebreras |
| 25 | Bodegas de Almacenamiento NPH | 73 | Cocheras, Marraneras, Porquerizas |
| 26 | Moteles, Amoblados, Residencias NPH | 74 | Beneficiaderos |
| 27 | Moteles, Amoblados, Residencias PH | 75 | Secaderos |
| 28 | Industria Mediana PH | 76 | Kioskos |
| 29 | Parques de Diversión | 77 | Silos |
| 30 | Clubes Mayor Extensión | 80 | Oficinas en Bodegas y/o Industrias |
| 31 | Piscinas en NPH | 81 | Oficina Bodega y/o Industria PH |
| 32 | Coliseos | 82 | Oficinas Operativas(Estaciones Servicio) |
| 33 | Bodega Económica | 90 | Lote en Propiedad Horizontal |
| 34 | Industria Grande PH | 91 | Bodega Comercial PH |
| 35 | Colegios en PH | 92 | Oficinas y Consultorios (Oficial) PH |
| 36 | Parques de Diversión en P.H. | 93 | Bodegas de Almacenamiento PH |
| 37 | Habitacional Menor o Igual a 3 Pisos PH | 94 | Centro Comercial Pequeño NPH |
| 38 | Habitacional en Propiedad Horizontal | 95 | Centro Comercial Pequeño PH |
| 39 | Comercio Puntual PH | 96 | Parqueo Cubierto NPH |
| 40 | Corredor Comercial PH | 97 | Bodega Económica (Serviteca, Esta.Servic.) |
| 41 | Centro Comercial Mediano PH | 98 | Deposito Almacenamiento PH |
| 42 | Centro Comercial Grande PH | 999 | Comodín |

- Construcciones no contenidas en la base de datos de Construcciones de Catastro Distrital pero que fueron identificadas con fotointerpretación de la ortofoto IDIGER 2019: el uso de la construcción se obtuvo mediante visita de campo o a través de Google Street View cuando esta fuente está disponible.

- Armazón, muros, estructura y cerchas
  - Construcciones contenidas en la base de datos de construcciones de Catastro Distrital: las características de estos elementos fueron obtenidos de los campos PreEArmaz, PreEMuros, PreCIndus de la base de datos de predios de Catastro Distrital con los códigos que se muestran en la Tabla 12.

BORRADOR

*Tabla 12. Códigos de calificación según catastro de: armazón, muros: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital*

| CODIGO CALIFICACION | DESCRIPCION CALIFICACION |
|---|---|
| 1 | Estructura |
| 11 | Armazón |
| 111 | Madera |
| 112 | Prefabricado |
| 113 | Ladrillo, Bloque |
| 114 | Concreto Hasta Tres Pisos |
| 115 | Concreto Cuatro o Más Pisos |
| 12 | Muros |
| 121 | Materiales de Desecho, Esterilla |
| 122 | Bahareque, Adobe, Tapia |
| 123 | Madera |
| 124 | Concreto Prefabricado |
| 125 | Bloque, Ladrillo |
| 5 | Complemento industria |
| 51 | Cerchas |
| 511 | Madera |
| 512 | Metálica liviana |
| 513 | Metálica mediana |
| 514 | Metálica pesada |
| 52 | Altura cerchas |
| 521 | Altura |

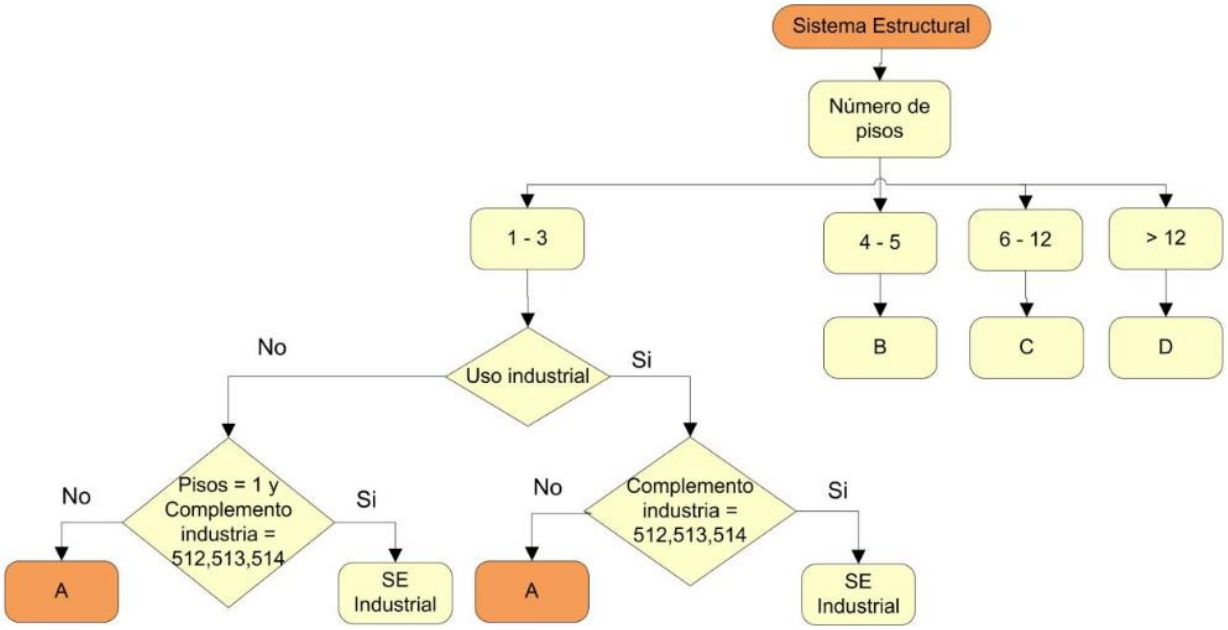
  - Construcciones no contenidas en la base de datos de Construcciones de Catastro Distrital pero que fueron identificadas con fotointerpretación de la ortofoto IDIGER 2019: las características de estos elementos se obtuvieron mediante visita de campo o a través de Google Street View cuando esta fuente está disponible.

- Edad de construcción: se obtuvo del campo vetustez de la base de datos de predios de Catastro Distrital. En la base de datos existen predios que no tienen información de vetustez para los cuales el valor se tomó como desconocido. Lo mismo ocurre en el caso de las construcciones identificadas en la ortofoto IDIGER (2019) para las cuales no se cuenta con información de vetustez y resulta de alta complejidad la recopilación de ese dato en campo.
- Estratificación: el estrato para cada construcción se obtuvo de la base de datos de estrato socio económico de la Secretaría Distrital de Planeación. Para las construcciones para las cuales este dato no se encontraba disponible, se utilizó la información de estratificación a nivel de manaza. Las construcciones para las cuales no fue posible identificar el estrato de estas dos fuentes se les asignó el estrato 1 ya que corresponden mayormente a construcciones informales recientes localizadas en la cuenca alta.
- El área construida se generó de la capa de construcciones y de los polígonos digitalizados correspondientes a construcciones no contenidas en la base de datos de Catastro Distrital. Se calculó el área de cada polígono y se multiplicó por el número de pisos. Este procedimiento difiere del utilizado por Prieto (2017) ya que en la generación de la información para sismo se realizó una sumatoria por código de predio ya que esta fue la unidad de análisis escogida, mientras que para el caso de inundaciones la unidad de análisis es la construcción.

Borrador v 1

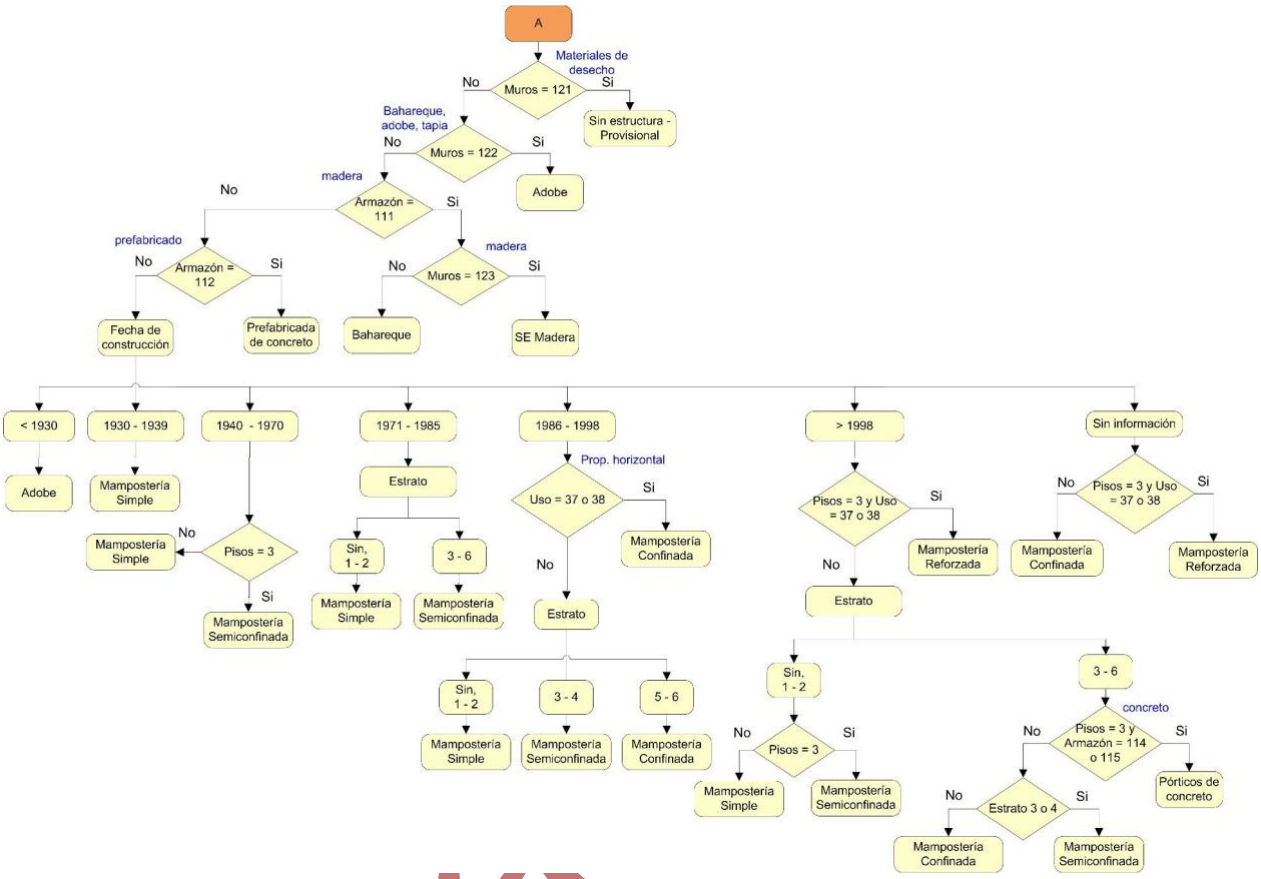
Una vez generada y organizada la información para cada construcción, se utilizó el algoritmo propuesto por Prieto (2018) para generar la tipología estructural de las construcciones. El algoritmo se muestra en la Figura 40 a Figura 43.

*Figura 40. Parte inicial del algoritmo para generar el sistema estructural de las construcciones. Fuente: Prieto (2018)*




Borrador

*Figura 41. Diagrama modificado de asignación de Sistema estructural parte A. Fuente: Fuente: Prieto (2018)*




Borra

*Figura 42. Algoritmo modificado para generar sistema estructural – Parte B. Fuente: Prieto (2018)*

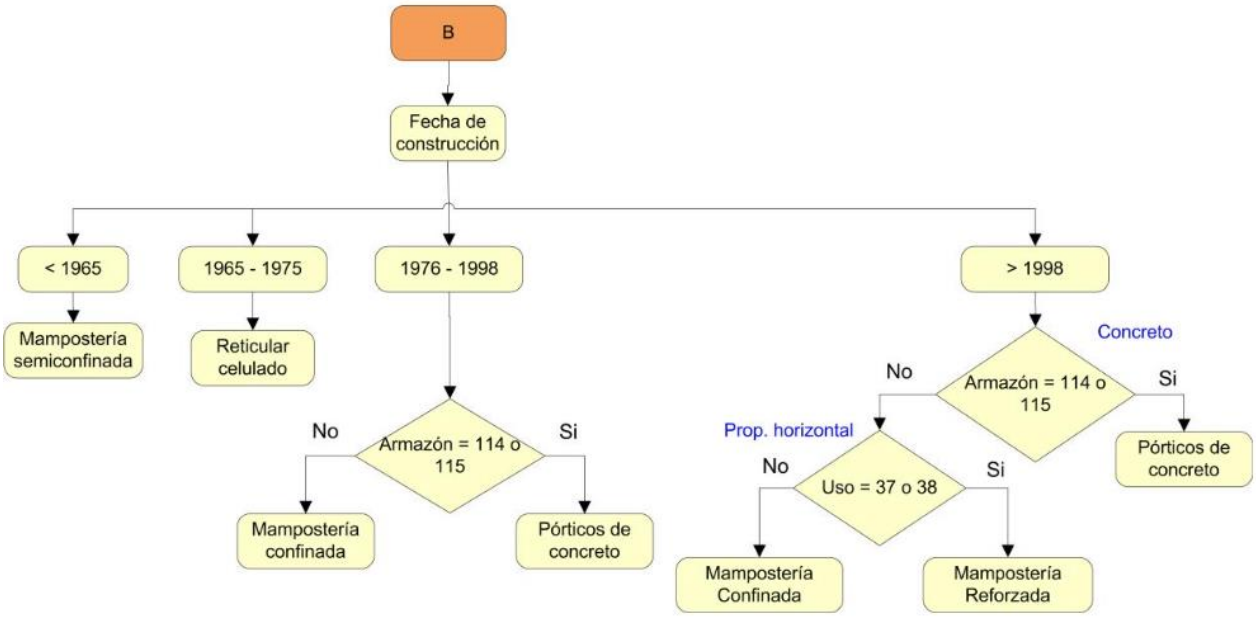
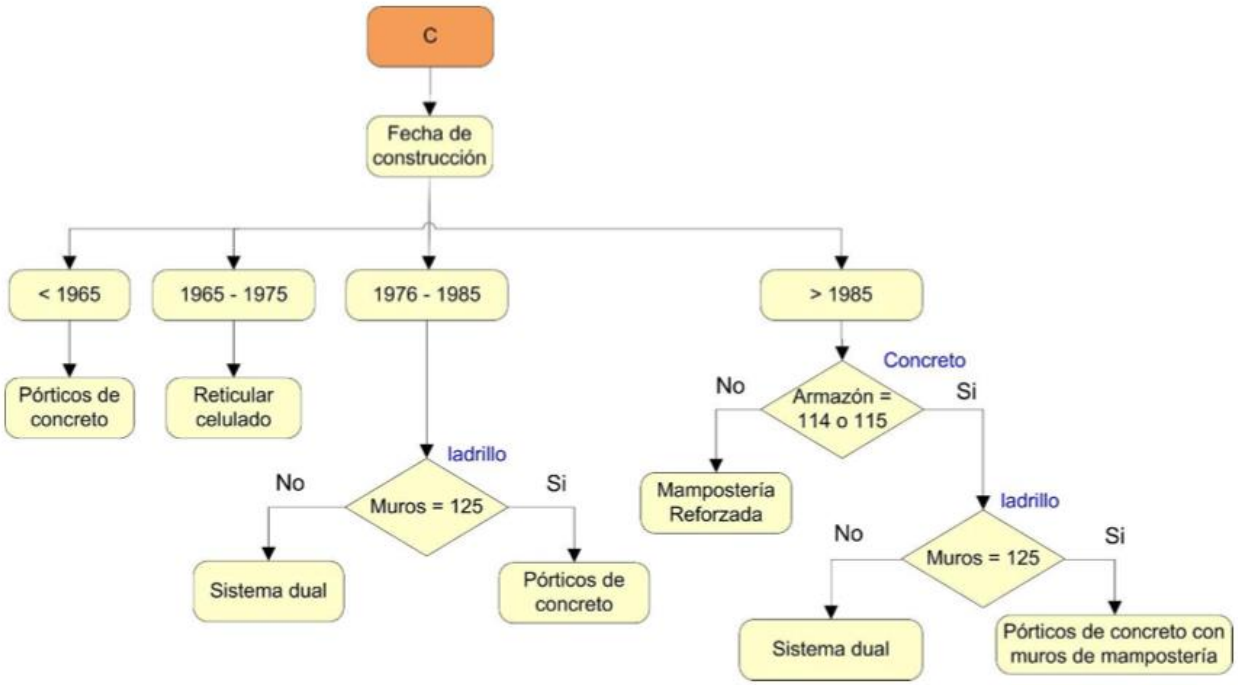



*Figura 43. Diagrama modificado de asignación de sistema estructural – Parte C. Fuente: Prieto (2018)*



Los sistemas estructurales resultantes de la aplicación del algoritmo corresponden a los mostrados en la Tabla 13.

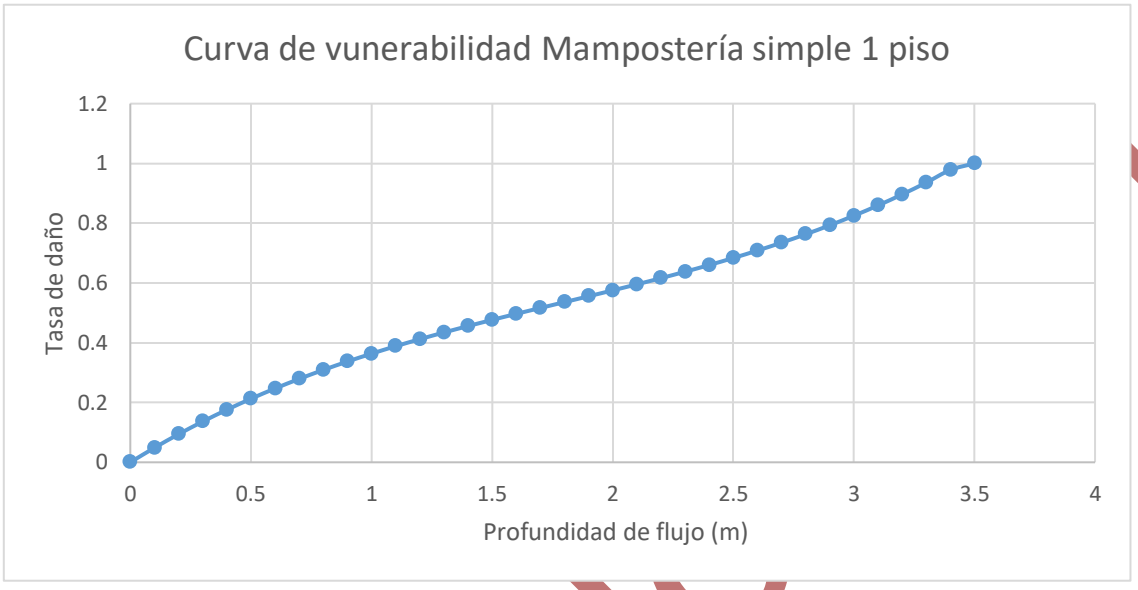
*Tabla 13. Sistemas estructurales. Fuente: Prieto (2018)*

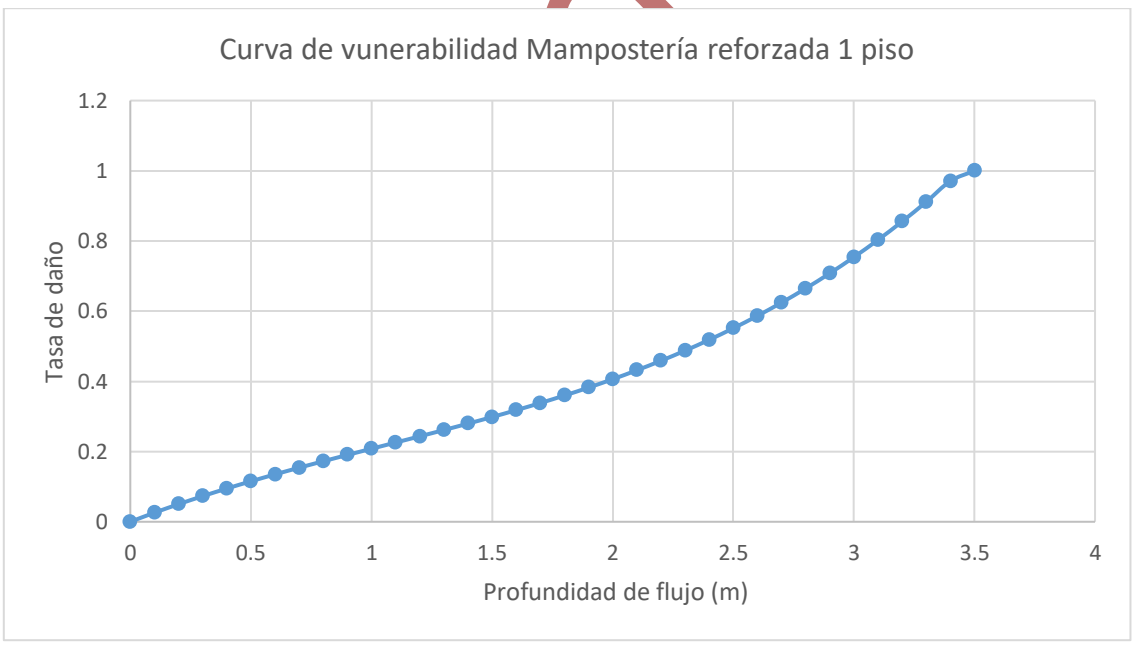
| SISTEMA ESTRUCTURAL |
| --- |
| Adobe |
| Bahareque |
| Estructura Prefabricada De Concreto |
| Mampostería Simple |
| Mampostería Semiconfinada |
| Mampostería Confinada |
| Losa Columna |
| Pórticos de Concreto Reforzado |
| Pórticos de Concreto con Muros Mampostería |
| Pórticos de Concreto con Muros Concreto |
| Industrial Con Cubierta Ligera |

Borrador V 1

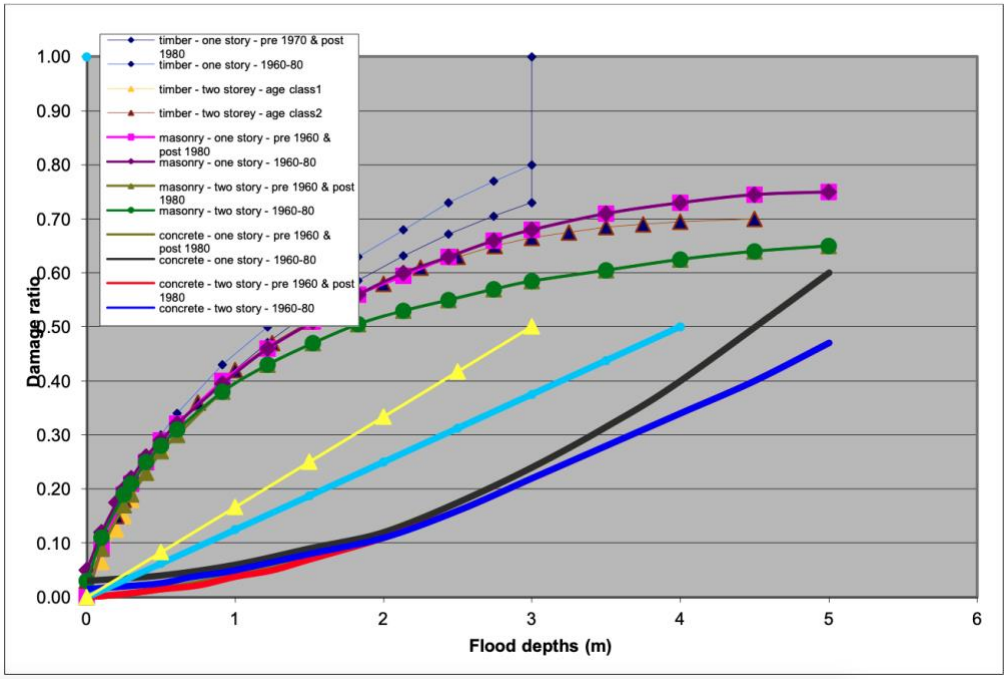
## ANEXO B. Recopilación de curvas de vulnerabilidad existentes

### B.1 Curvas de vulnerabilidad desarrolladas por Lo et al. (2012)

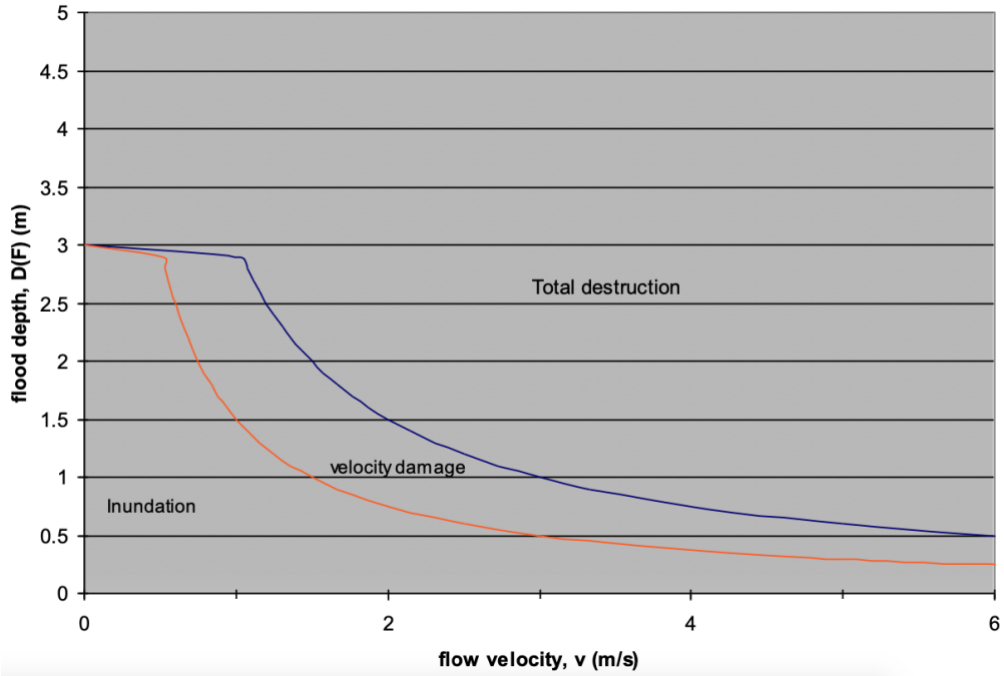


## B.2 Curvas de vulnerabilidad desarrolladas por el proyecto RiskScape (Reese and Ramsay 2010)

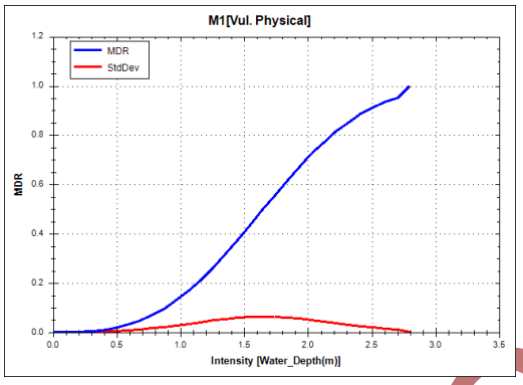


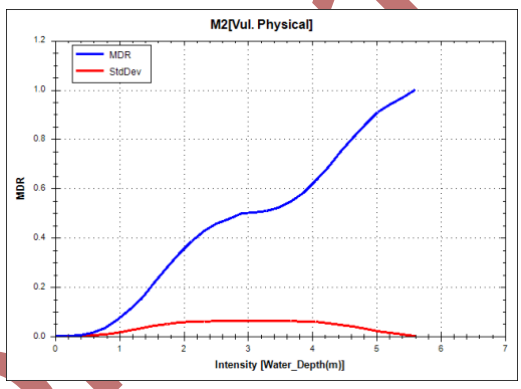

**Timber/weatherboard**



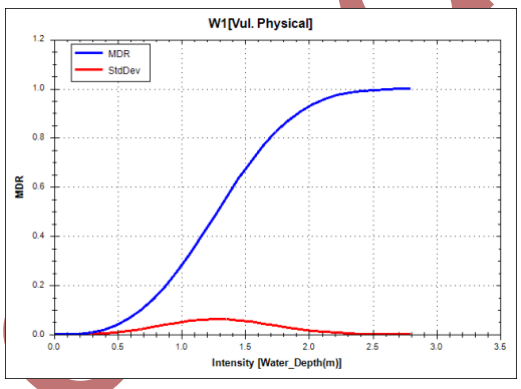
## B.3 Curvas desarrolladas por CAPRA y utilizadas por JBA (2019) en ciudad de Panamá

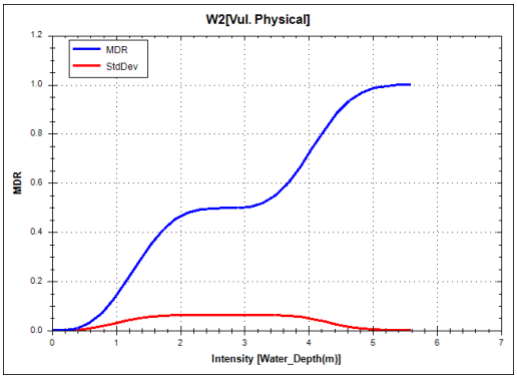
**M1 - Edificaciones de mampostería de 1 piso y M2 - Edificaciones de mampostería de 2 pisos.**



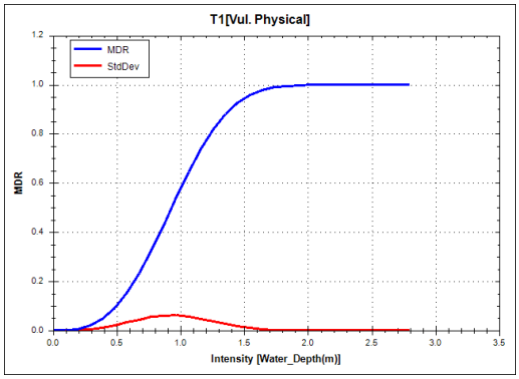



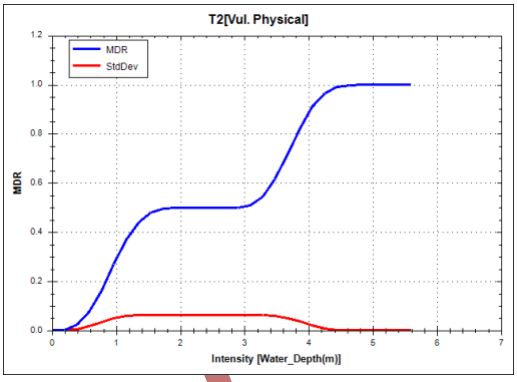

**W1 - Edificaciones de madera de 1 piso y W2 - Edificaciones de madera de 2 pisos.**



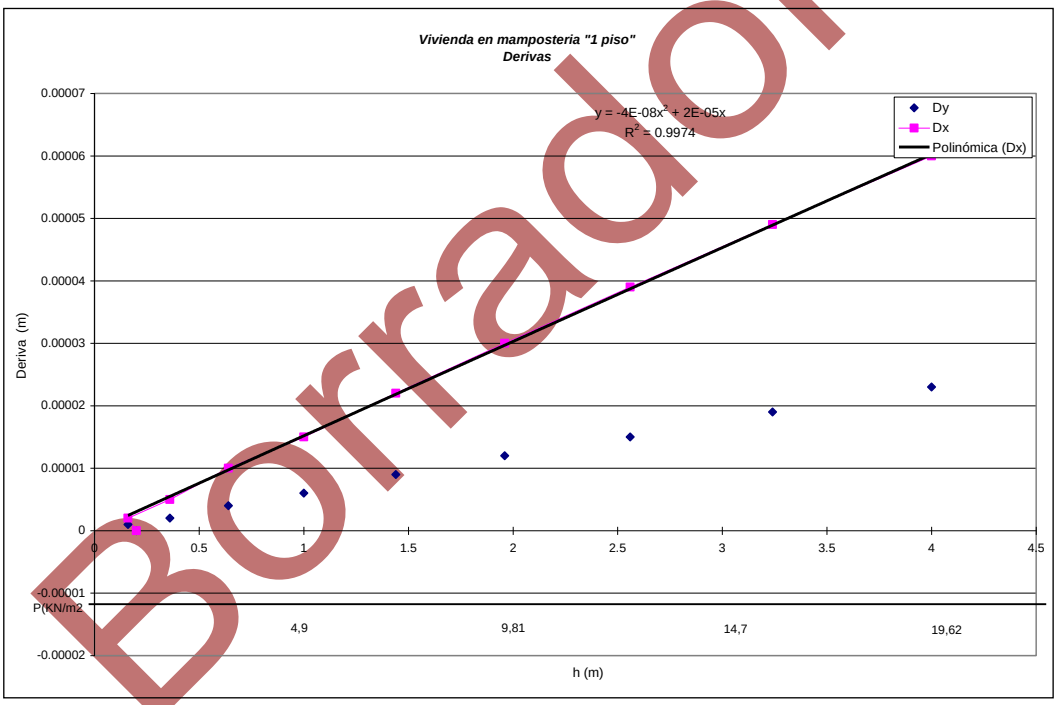



**T1 - Edificaciones de tierra de 1 piso y T2 - Edificaciones de tierra de 2 pisos.**



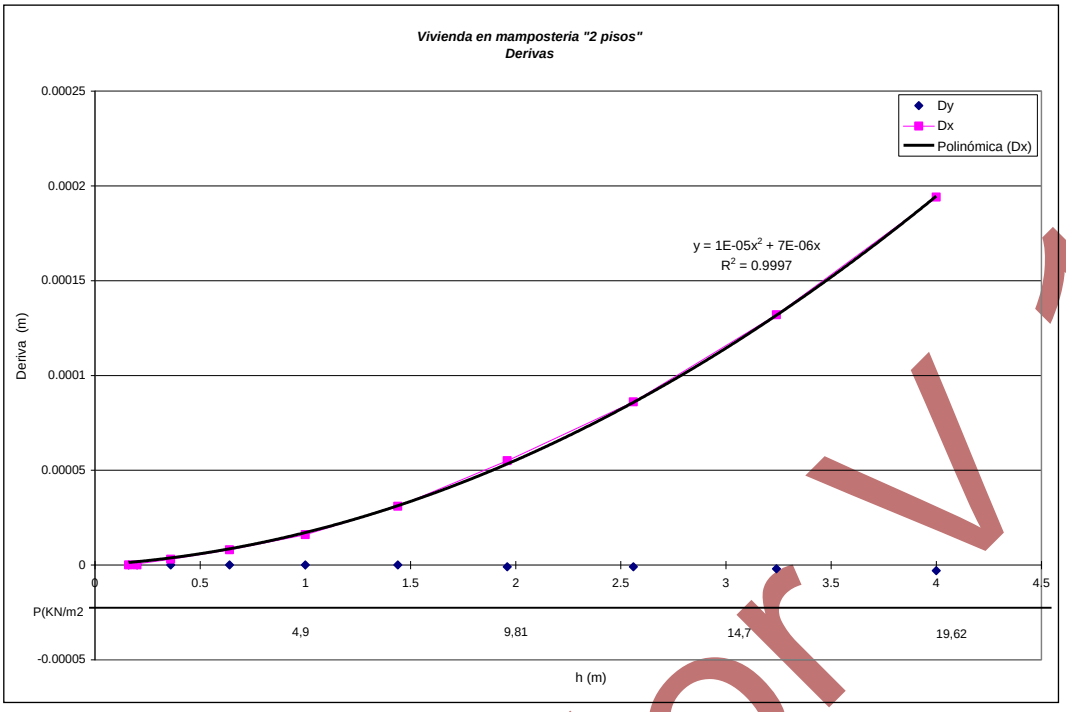




## B.4 Curvas desarrolladas por la UNAL (2006)

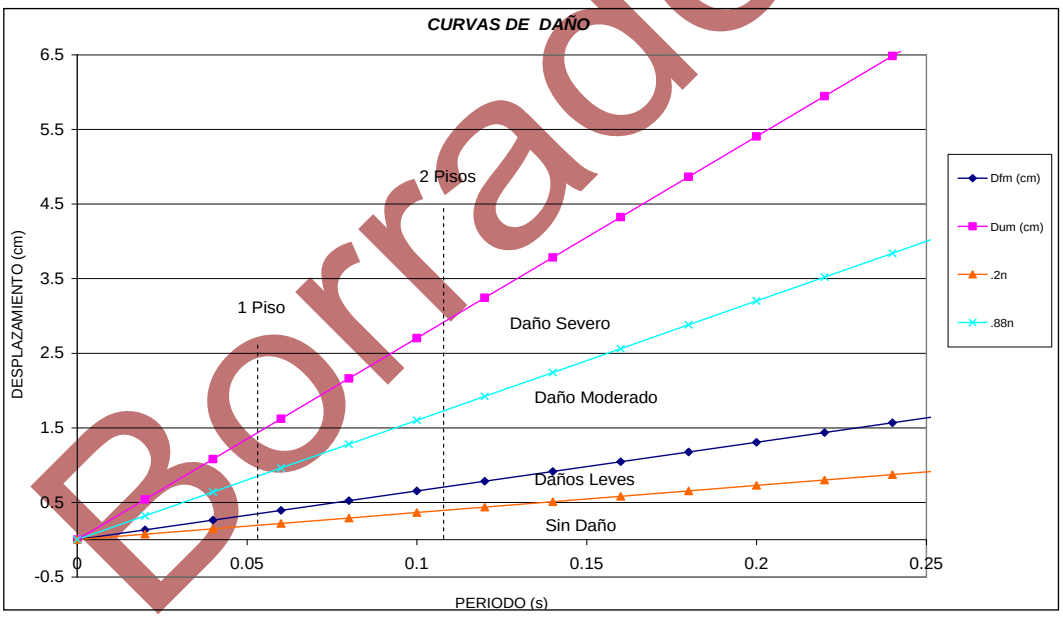



Curvas de derivas para estructuras en mampostería de un piso.

Borrador V

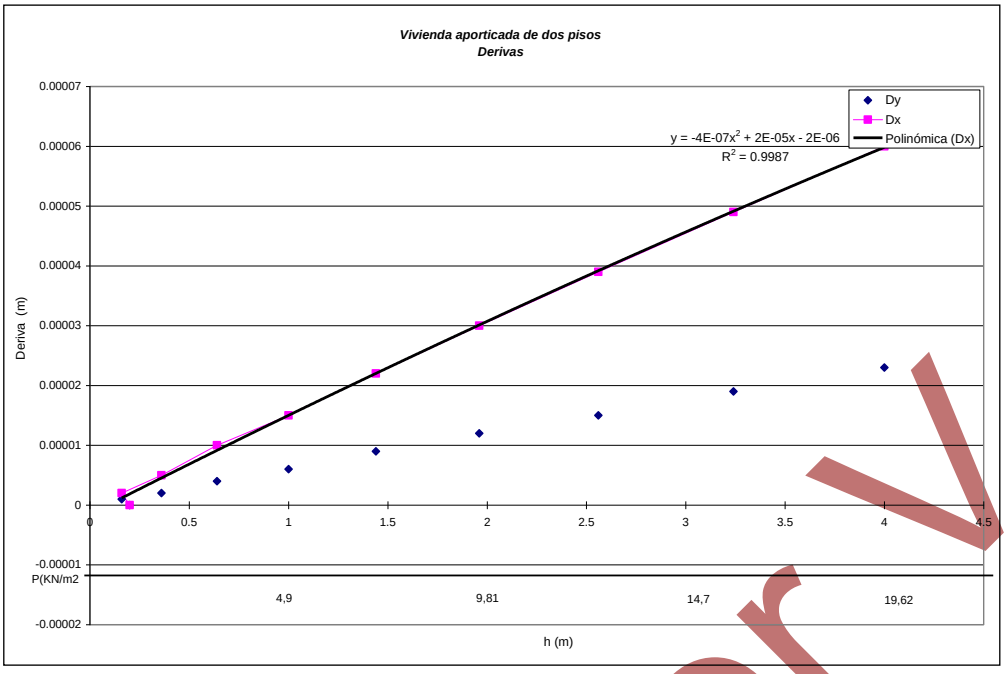



Curvas de derivas para estructuras en mampostería de dos pisos.

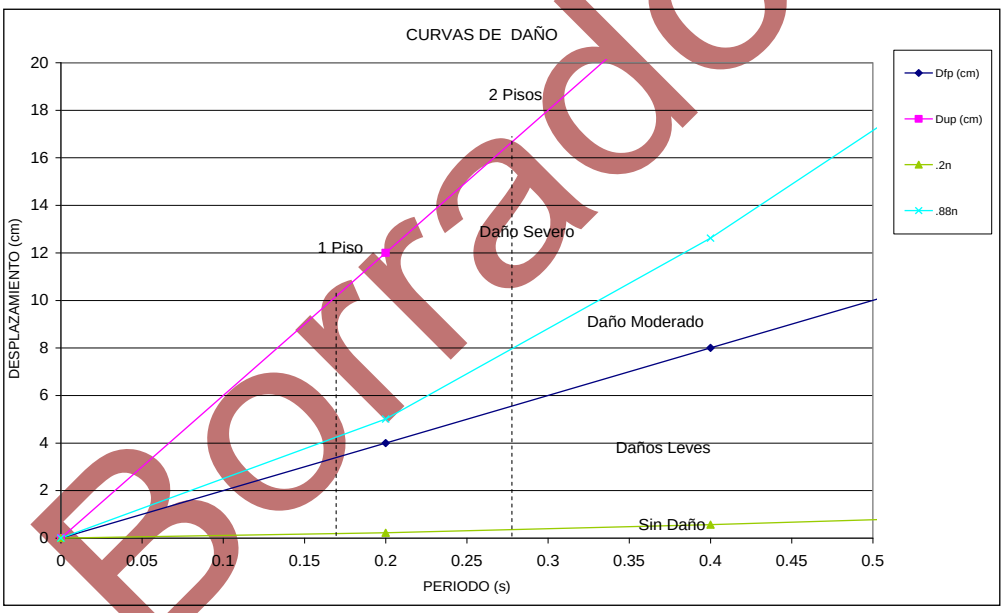



Curvas de daño para estructuras en mampostería.

Borrador V1

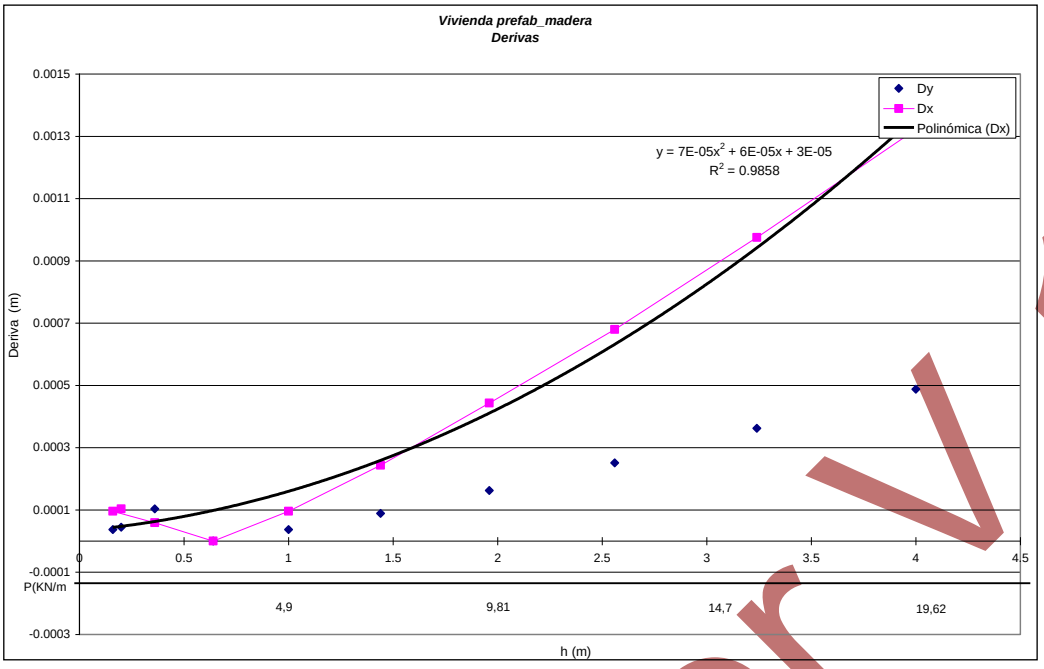



Curvas de derivas para estructuras aporticadas de 2 pisos.

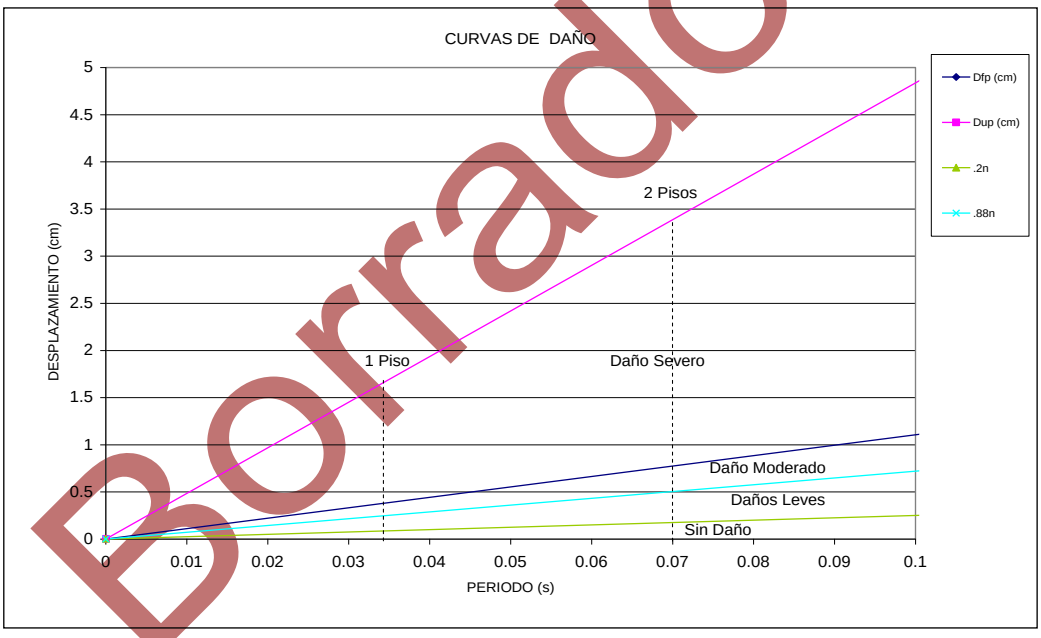



Curvas de daño para estructuras aporticadas.

Borrador V1



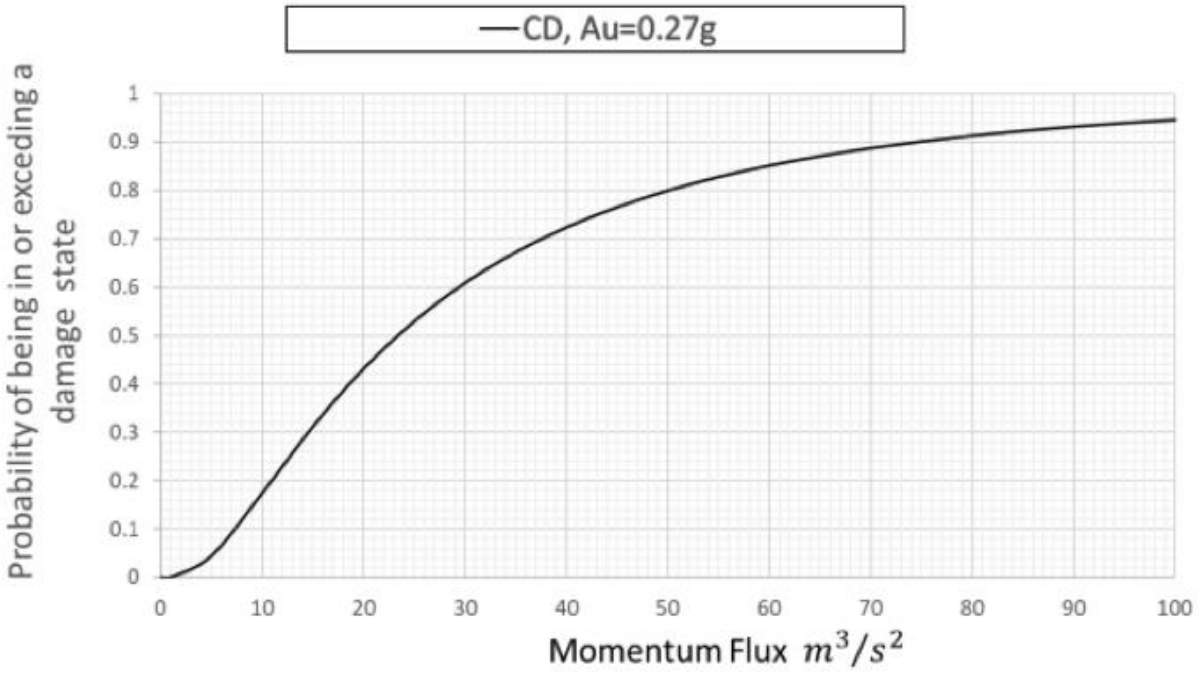

Curvas de derivas para estructuras en prefabricado y madera.




Curvas de daño para estructuras en prefabricado y madera.

Borrador V1

## B.5 **Curva de fragilidad desarrollada por** Prieto et al. (2018)




Borrador